

УДК 66.022.1.

# Влияние предварительной обработки импульсным электрическим полем на процесс сушки: обзор предметного поля

ООО «БЕЛРОСАКВА», г. Минск,  
Республика Беларусь

Л. Ч. Бурак, А. Н. Сапач

## КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Бурак Леонид Чеславович  
E-mail: leonidburak@gmail.com

**ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:**  
данные текущего исследования  
доступны по запросу  
у корреспондирующего автора.

## ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Бурак, Л.Ч., & Сапач, А.Н. (2023).  
Влияние предварительной обработки  
импульсным электрическим полем  
на процесс сушки: обзор предмет-  
ного поля. *Хранение и переработка  
сельхозсырья*, (2), 44-71. [https://doi.  
org/10.36107/spfp.2023.418](https://doi.org/10.36107/spfp.2023.418)

**ПОСТУПИЛА:** 20.03.2023

**ПРИНЯТА:** 14.06.2023

**ОПУБЛИКОВАНА:** 30.07.2023

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии  
конфликта интересов.



## АННОТАЦИЯ

**Введение:** Основное влияние на качество сушеных продуктов, включая физико-химические, микробиологические, органолептические показатели и пищевую ценность, оказывает используемый технологический процесс сушки. Цель данной статьи – критический обзор результатов опубликованных научных исследований применения импульсного электрического поля, с целью обработки пищевых продуктов перед процессом сушки.

**Материалы и методы:** Поиск научной литературы на английском языке по вопросам влияния предварительной обработки сырья импульсным электрическим полем на процесс сушки и качество готовой сушеной продукции проводили в библиографических базах «Scopus» и «Web of Science». В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был принят период 2006–2023 гг. При отборе публикаций для обзора приоритет отдавали высокоцитируемым источникам (показатель цитируемости выше 3). Протокол PRIZMA отражает этапы отбора источников. Результаты анализа источников представлены в виде таблиц и диаграмм для визуализации данных. Материалами для исследования послужили 126 статей.

**Результаты:** Сушка с применением предварительной обработки импульсным электрическим полем способствует сохранению физико-химических свойств высушенных продуктов, их цвета и содержащихся биологически активных соединений, а также улучшает кинетику сушки. В отличие от традиционных технологий, сушка с использованием импульсного электрического поля обеспечивает селективную дезинтеграцию клеток, не оказывая при этом отрицательного воздействия на качество продукта. Предварительная обработка импульсным электрическим полем вызывает инактивацию микроорганизмов и окислительных ферментов, что способствует максимальному сохранению качественных показателей готового продукта после сушки. Плоды и овощи, предварительно обработанные импульсным электрическим полем, обладают улучшенными качественными показателями после сушки по сравнению с теми, которые не подвергались обработке. Готовые продукты, обработанные импульсным электрическим полем перед сушкой, имели более насыщенный цвет и более высокую антиоксидантную активность, а также время процесса сушки таких продуктов значительно короче.

**Выводы:** Предварительная обработка импульсным электрическим полем перед сушкой способствует сокращению времени сушки, снижению энергоемкости и сохранению биологически активных соединений в готовом продукте. Материалы данной статьи могут быть использованы при проведении дальнейших научных исследований и промышленного использования данной технологии обработки.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

сушка, обработка, импульсное электрическое поле, проницаемость, вакуумная сушка, сублимационная сушка, качество, эффективность, энергоемкость

# Influence of Pre-Treatment by a Pulsed Electric Field on the Drying Process: Scoping Review

BELROSAKVA LLC, Minsk,  
Republic of Belarus

## CORRESPONDENCE:

Leonid Ch. Burak

E-mail: leonidburak@gmail.com

## FOR CITATIONS:

Burak, L.C., & Sapach, A.N. (2023).

Influence of pre-treatment by a pulsed electric field on the drying process:

Scoping review. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 44-71.

<https://doi.org/10.36107/spfp.2023.418>

RECEIVED: 20.03.2023

ACCEPTED: 14.06.2023

PUBLISHED: 30.07.2023

## DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



Leonid Ch. Burak, Aleksander N. Sapach

## ABSTRACT

**Background:** The main influence on the quality of dried products, including physicochemical, microbiological, organoleptic indicators and nutritional value, is exerted by the drying process used. Recently, as a method of pre-treatment of plant materials before drying, the method of exposure to a pulsed electric field is used. The purpose of this article is to critically review the results of published scientific studies on the use of a pulsed electric field to treat foodstuffs prior to the drying process. The assessment of the action of a pulsed electric field was analyzed on the basis of the obtained physical and organoleptic indicators of dried products and drying kinetics.

**Materials and Methods:** The search for foreign scientific literature in English on the influence of pre-treatment of raw materials by a pulsed electric field on the drying process and the quality of finished dried products was carried out in the bibliographic databases «Scopus» and «Web of Science». The period 2006–2023 was adopted as the time frame for the review of scientific publications. When performing the work, scientific methods were used to search and screen scientific literature, extract data, analyze them, systematize and generalize. When selecting publications for review, priority was given to highly cited sources (citation index above 3). The results of the analysis were presented in the form of tables and charts for data visualization. To review the subject field of the study, an algorithm was used in accordance with the PRIZMA protocol and a scheme for conducting the study was drawn up. Materials for the study were 126 articles.

**Results:** A review of the scientific literature showed that drying with the use of pre-treatment with a pulsed electric field contributes to the preservation of the physico-chemical properties of dried products, their colour and contained biologically active compounds, and also improves the drying kinetics. Unlike traditional technologies, drying using a pulsed electric field provides selective disintegration of cells without adversely affecting the quality of the product. Pre-treatment with a pulsed electric field causes inactivation of microorganisms and oxidative enzymes, which contributes to the maximum preservation of the quality indicators of the finished product after drying. Fruits and vegetables pre-treated with pulsed electric have improved quality after drying compared to those that have not been processed. Finished products treated with a pulsed electric field before drying had a more saturated color and higher antioxidant activity, and the drying process time for such products is much shorter.

**Conclusion:** Processing with a pulsed electric field is one of the innovative technologies that can be used to improve the quality of dried products and optimize traditional drying methods. Pre-treatment with a pulsed electric field before drying helps to reduce the drying time, reduce energy consumption and preserve biologically active compounds in the finished product. The materials of this article can be used in further scientific research and industrial use of this processing technology.

## KEYWORDS

drying, processing, pulsed electric field, permeability, vacuum drying, freeze drying, quality, efficiency, energy intensity

## ВВЕДЕНИЕ

Обработка импульсным электрическим полем (ИЭП) — это признанная нетермическая технология, которая используется для сохранения качества продуктов за счет применения коротких импульсов в диапазоне напряженности электрического поля (Zhang et al., 2020). ИЭП имеет различные преимущества, такие как экологичность, низкое энергопотребление, экономическая эффективность и короткое время обработки при сохранении органолептических и питательных качеств пищи и продлении срока ее хранения без использования химических остатков или загрязнения окружающей среды. Следовательно, эту технологию можно применять для стерилизации, обеззараживания, размораживания и консервирования пищевых продуктов (Gavahian et al., 2020; Gómez et al., 2019). ИЭП индуцирует разницу в трансмембранном потенциале, что приводит к разрушению мембраны или локальным структурным изменениям. Когда трансмембранный потенциал превышает определенный порог, клеточная мембрана подвергается обратимой или необратимой пермеабилитации, что приводит к биохимическим и физиологическим изменениям и даже гибели клетки (Zhang et al., 2020).

Одна из стратегий, используемых для сохранения пищевых продуктов, заключается в минимизации содержания воды посредством сушки — процесса, который удаляет воду из пищевой матрицы, увеличивая срок хранения продуктов и делая их менее подверженными порче (Ghasemi et al., 2021; Mousakhani-Ganjeh et al., 2021). Сушку можно проводить при низких (например, сублимационной сушке) и повышенных температурах. Хотя сушка при низких температурах занимает больше времени, сушка при высоких температурах может ухудшить качество пищевых продуктов. В последние годы новые технологии, такие как ИЭП, начали применять в качестве предварительной обработки, чтобы сократить время сушки и максимально сохранить органолептические показатели продукта, а также повысить энергоэффективность и снизить эксплуатационные расходы. (Llavata et al., 2020). Более того, скорость тепло- и массопереноса между клетками и окружающей их средой имеет тенденцию к увеличению внутри растительной ткани, что облегчает доступ воды к поверхности и ее испарение (Kempkes & Munderville, 2018; Barba et al., 2015). Эффективность использования ИЭП в ка-

честве предварительной обработки перед сушкой оценивали с использованием многих видов сырья, таких как нарезанные пастернак и морковь (Alam et al., 2018; Wiktor et al., 2016), яблоке (Chauhan et al., 2018; Lammerskitten et al., 2019; Parniakov et al., 2016), картофеле (Shorstkii et al., 2022), базилик (Telfser & Galindo, 2019), киви (Lamanauskas et al., 2015), красный перец (Won et al., 2015) и сливы (Rahaman et al., 2019). Действие ИЭП приводило к увеличению скорости распада клеток и выделению водяного пара на поверхность продукта. Это явление увеличивает диффузию, что, в свою очередь, может сократить время сушки (Ostermeier et al., 2018). В другом исследовании листья базилика были предварительно обработаны ИЭП и высушены в вакууме, в результате чего высушенные листья имели цвет и запах, похожие на свежие листья. Предварительная обработка ИЭП перед сушкой способствует сохранению многих биологически активных соединений, которые оказывают влияние на цвет, пищевую ценность и антиоксидантную активность (Wiktor et al., 2021). Комбинация ИЭП и методов сушки может использоваться для достижения максимального сохранения структуры высушенных продуктов (Telfser & Galindo, 2019).

Цель данной статьи — обзор, изучение и критический анализ результатов научных исследований о влиянии предварительной обработки ИЭП перед проведением сушки на кинетику сушки, сохранение физико-химических показателей, биологически активных соединений и пищевой ценности готовой продукции, а также на энергоемкость процесса сушки.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Базы данных и временные рамки

Поиск зарубежной научной литературы на английском языке по вопросам влияния предварительной обработки сырья импульсным электрическим полем на процесс сушки и качество готовой сушеной продукции проводили в библиографических базах «Scopus», «Web of Science». Анализировались научные публикации за период 2010–2023 гг.

## Критерии включения и исключения источников

Для поисковых запросов в зарубежных базах данных «Scopus», «Web of Science», были использованы следующие ключевые слова и словосочетания: processing, pulsed electric field, permeability, vacuum drying, freeze drying, quality, efficiency, energy intensity

Критерии включения:

- (1) Статья написана в период 2010–2023 год.
- (2) Статья соответствует теме исследования.
- (3) Типы анализируемых статей — оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи, материалы конференций, симпозиумов, краткие отчеты.

Критерии исключения:

- (1) Статья не соответствует теме данного обзора: не касаются тематики влияния предварительной обработки сырья импульсным электрическим полем на процесс сушки и изменения физико-химических и органолептических показателей сырья и готовой сушеной продукции.
- (2) Статья написана не на и английском языке.

- (3) Содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

## Анализ и систематизация данных

Результаты анализа были представлены в виде таблиц и диаграмм для визуализации данных. Для обзора предметного поля проведенного исследования использовали алгоритм в соответствии с протоколом PRISMA и составили схему проведения исследования (Рисунок 1).

## Извлечение и анализ данных

Для анализа источников и поиска ответов на поставленные вопросы исследования: рассмотреть влияние предварительной обработки пищевого сырья импульсным электрическим полем на процесс сушки, а также параметров процесса сушки и изменение физико-химических показателей и пищевой ценности сушеной продукции; установить влияние предварительной обработки на скорость процесса

Рисунок 1

Блок-схема, описывающая процесс выбора исследования, в соответствии с протоколом PRISMA.



Таблица 1

Пример извлечения данных из статей, включенных в обзор

№	Заглавие	Автор и год	Влияние предварительной обработки ИЭП на кинетику сушки и физические свойства продукта	Основные принципы обработки ИЭП	Влияние предварительной обработки ИЭП изменение качественных показателей сушеной продукции	Преимущества и недостатки обработки ИЭП перед сушкой
1	Effect of pulsed electric field pretreatment on drying kinetics, color, and texture of parsnip and carrot.	Alam, M. R., Lyng, J. G., Frontuto, D., Marra, F., & Cinquanta, L. (2018)	Dry carrots and parsnip slices can be used as food ingredients for further food preparations but also as healthy snacks, thanks to their health benefits. Pulsed electric field (PEF) resulted to be an effective pretreatment for carrots and parsnips before undergoing convective drying, because it reduced the drying time (up to 28 % in parsnip and 21 % in carrot slices) and, particularly at mild temperatures (50 to 60 °C), it did not affect the texture properties of both carrot and parsnip. PEF pretreatment of these roots before convective heating can be surely suggested as industrial application.	–	Also, PEF pretreatment influenced color changes: PEF pretreated dried carrots showed a significant ( $p < .05$ ) reduction in lightness values ( $L^*$ ) compared to untreated dried ones, although PEF pretreated parsnip had a significant ( $p < .05$ ) increase in redness values ( $a^*$ ).	–
2	Applicability of pulsed electric field (PEF) pre-treatment for a convective two-step drying process	Ostermeier, R., Parniakov, O., Töpfl, S., & Jäger, H. (2020).	It was shown that applying a PEF pre-treatment of 1.07 and 4.0 kJ/kg to whole onions prior to drying resulted in a positive change in the drying kinetics. For drying at a constant temperature of 85 °C, the BP was achieved 20 min faster. Moreover, PEF treatment resulted in a 25 % faster drying process.	–	Regarding the quality of the PEF pre-treated product dried at 85/65 °C, practically no blisters were present and the pyruvic acid content was 14.5 % higher in comparison to the untreated sample. Furthermore, PEF pre-treatment resulted in an enhanced rehydration behavior represented by a 47 % higher RC.	–
3	Correlation of the cell disintegration index with Luikov's heat and mass transfer parameters for drying of pulsed electric field (PEF) pretreated plant materials.	Shorstkii, I., Sosnin, M., Smetana, S., Toepfl, S., Parniakov, O., & Wiktor, A. (2022).	–	–	–	The formulation and the solution procedures were applied to simulate the simultaneous heat and mass transfer in selected vegetables subjected to the convective drying. Suggested model had a good correlation with experimental results. Moreover, cell disintegration index can be used as a controllable parameter in heat and mass transfer models to predict drying behavior of potato, onion, and carrot tissues. Obtained drying models can be used as a mathematical tool to predict drying behavior for various types of agricultural products pre-treated by pulsed electric field.

сушки, энергоемкость, преимущества и ограничения применения процесса предварительной обработки импульсным электрическим полем перед сушкой. Извлекались данные из 126 статей, соответствующих критериям включения, и вносились в Таблицу 1.

Источники были проанализированы для сравнения и анализа химического состава и качества сырья, применяемого при производстве напитков брожения из плодового сырья; влияния способов обработки и параметров окружающей среды на качество и сроки годности напитков.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Основные принципы предварительной обработки ИЭП и ее механизмы

Использование метода импульсного электрического поля (ИЭП) в пищевой промышленности имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами термической обработки пищевых продуктов. ИЭП использует электрическую амплитуду высокого напряжения, электрические волны высокого напряжения (обычно 10–80 кВ/см) и короткие электрические импульсы (обычно от микросекунд до миллисекунд) (Nowosad et al., 2021).

В отличие от термоэлектрических способов, таких как омический нагрев (Gavahian & Farahnaky, 2018) и другие низкотемпературные технологии, включая длительное воздействие электрического поля (Gavahian & Tiwari, 2020) и действие электростатического поля высокого напряжения (Nguyen et al., 2021) действие ИЭП не вызывает значительного увеличения температуры, поэтому данная обработка не является термической. Обработка ИЭП включает в себя подачу высоковольтных (от 100–300 В/см до 20–80 кВ/см) и коротких электрических импульсов (<1 с) на продукт в жидком или твердом состоянии, который находится между двумя электродами. Основные элементы установки ИЭП включают камеру обработки, генератор высоковольтных импульсов, устройства управления и контроля. Генератор импульсов вырабатывает высоковольтные импульсы, которые направляются на два электрода внутри этой камеры, между которыми помещается образец.

ИЭП улучшает электрическую проницаемость и проводимость клеточной мембраны. Действие электрического поля на клетку происходит в течение нескольких сотен микросекунд, что вызывает процесс электропорации, т. е. создание пор в мембране, что может вызывать разрыв ткани. Пористость является динамическим свойством продукта, поэтому эффекты электропорации могут быть обратимыми или необратимыми. Электрический пробой является обратимым, когда индуцированные отверстия малы по сравнению с площадью поверхности мембраны и вызваны низкоинтенсивной обработкой ИЭП (Vaessen et al., 2019).

Увеличение напряженности ИЭП и продолжительности обработки приводит к образованию крупных пор, а затем к необратимому разрыву мембраны, что приводит к гибели клеток (Nowosad et al., 2021; Chen et al., 2022a; Chen et al., 2022b). Необратимая пермеабиллизация мембран растительных клеток может применяться в самых разных областях. Обработка ИЭП способствует сохранению физико-химических и органолептических показателей жидких пищевых продуктов и увеличению срока годности, без изменения их пищевой ценности.

На эффективность электропроницаемости мембран влияют различные параметры, в том числе напряженность электрического поля, состав мембраны, параметры импульса (такие как число импульсов, продолжительность, амплитуда и частота повторения), конфигурация камеры обработки, окружающая среда и тип клеток. форма и размер (Saletnik et al., 2022; Dalvi-Isfahan et al., 2016; Dellaros et al., 2016; Demir et al., 2018; Devkota et al., 2022). Использование ИЭП по обработке пищевых продуктов широко изучается, так как действие ИЭП способно вызывать инактивацию микроорганизмов, улучшать массоперенос, не вызывая при этом изменение состава биологически активных соединений продукта.

При комнатной или температуре (20–50°C) напряженность электрического поля 300–1000 В/см и длительность импульса 100–1000 мкс позволяют относительно эффективно воздействовать на растительную ткань. Использование ИЭП в процессах экстракции является наиболее эффективной, по сравнению с другими методами, так как способствует максимальному извлечению экстраги-

рующих веществ (Kempkes & Munderville, 2018; Dhua et al., 2022; El Kantar et al., 2018; Fauster et al., 2018; Ferreira-Holderbaum et al., 2010; Gamboa-Santos et al., 2014).

Эффективность действия ИЭП по инактивации ферментов во многом зависит от типа фермента и условий проведения обработки. Структурные, конформационные и функциональные изменения ферментов под действием внешних электрических полей приводят к образованию свободных радикалов, вызывающих агрегацию и разворачивание белков за счет поглощения энергии полярными группами белков (Han et al., 2018).

### Влияние предварительной обработки ИЭП перед сушкой на качество продуктов

В промышленных масштабах сушку растительного сырья осуществляют различными способами сушки, включая сушку горячим воздухом, вакуумом, замораживанием и распылением, а также осмотическую дегидратацию (Tomasi et al., 2021; Gavahian et al., 2018; Guionet et al., 2021; Guionet et al., 2015; Heinz & Toepfl, 2022). В определенных условиях использования каждый метод имеет свои преимущества. Конвективная сушка или сушка горячим воздухом является наиболее часто ис-

пользуемым методом удаления влаги. На кинетику сушки горячим воздухом влияют температура, воздушный поток объем загрузки продукта. Более высокие температуры обычно увеличивают скорость сушки. Однако максимальная температура ограничена термочувствительностью материала, поскольку высокая температура может ухудшить биоактивные питательные вещества и качество продукта. При вакуумной сушке вода испаряется при низких температурах и низком атмосферном давлении (<101,330 кПа). Сушка вымораживанием или лиофилизацией позволяют получить высококачественный конечный продукт, поскольку процесс проводится при низкой температуре и незначительному присутствию кислорода воздуха.

Все методы сушки имеют общую способность изменять физические и химические свойства продукта, причем не всегда положительным образом. С целью обеспечения высокого качества продукта использование современных технологий, таких как обработка ИЭП представляет интерес как для научного сообщества, так и для предприятий пищевой промышленности (Lammerskitten et al., 2020; Al-Sayed et al., 2018; Hill et al., 2022; Huang et al., 2020; Iaccheri et al., 2021; Iaccheri et al., 2021b; Jacobo-Velázquez et al., 2017; Jacobo-Velázquez et al., 2011). Несколько исследований на фруктах и овощах продемонстрировали способность ИЭП

Таблица 2

Обзор результатов предварительной обработки ИЭП продуктов растительного происхождения перед сушкой

Способ сушки	Параметры качества	Параметры обработки ИЭП	Обрабатываемое сырье	Полученные результаты	Источник
Сушка горячим воздухом	Физические свойства	20 кВ/см, 1000 импульсов, 65,2 кДж/кг, 20 мкс	Морковь	Образец с предварительной обработкой ИЭП привел к уменьшению легкости по сравнению с необработанным. Предварительная обработка ИЭП не оказывала влияние на структуру при температурах (50–60 °C), но оно возрастало при температуре образца 70 °C.	Alam et al., 2018
		20 кВ/см, 20 мкс, 1,0 Гц	Гриб шиитаке	Высушенные (65 °C) грибы шиитаке, обработанные ИЭП, имели более высокое общее содержание фенолов (193,32 мкг/мкл), чем сушеные грибы без обработки ИЭП (161,76 мкг/мкл).	Liet al., 2021
		2 кВ/см, 2 мс, 200 импульсов, 2,5 кДж/кг	Черника	Предварительная обработка ИЭП перед сушкой горячим воздухом (45–75 °C) улучшила сохранение концентрации витамина С в чернике. Сохранение витамина С было выше в образцах, обработанных ИЭП (18–21 %), чем в необработанных (16–19 %).	Yu et al., 2017

Продолжение Таблицы 2

Способ сушки	Параметры качества	Параметры обработки ИЭП	Обрабатываемое сырье	Полученные результаты	Источник
Эффективность сушки		1–2 кВ/см, 25–75 импульсов	Яблоко	Предварительная обработка ИЭП ускоряет высушивание по сравнению с необработанными образцами. Более длительный ИЭП и более высокие температуры сушки ускоряют распад клеток и скорость сушки. На вход энергии ИЭП влияли сила и количество импульсов, а не температура.	Chauhan et al., 2018
		325 В, 65 импульсов, 650 В/см, 150 мкс	Листья базилика	При использовании ИЭП в качестве предварительной обработки время сушки сократилось на 57% (с 23,5 до 10,8 ч при температуре сушки 40 °С).	Telfser & Galindo, 2019
		40 мкс, 1 кВ/см, 0,25–10 кДж/кг	Картофель	Предварительная обработка сократила время сушки на 6,9–20% (с 483 до 380–450 мин). Безразмерный коэффициент влажности уменьшался с увеличением числа импульсов.	Shorstkii et al., 2022
Вакуумная сушка	Физические свойства	325 В, 65 импульсов, 650 В/см, 150 мкс	Листья базилика	Обработанные ИЭП, высушенные в вакууме листья лучше сохраняют железистые трихомы, чем необработанные. Высушенные в вакууме образцы, обработанные ИЭП, имели более свежий цвет (85,7%), чем необработанные образцы (14,3%).	Telfser & Galindo, 2019
		0,6 кВ/см, 10 импульсов, 100 мкс	Морковь	Применение обработки ИЭП приводило к меньшим изменениям окраски ( $\Delta E$ ) при всех исследованных температурах сушки от 25 до 90 °С по сравнению с необработанными образцами.	Liu et al., 2020
	Питательные свойства	0,6 кВ/см, 10 импульсов, 100 мкс	Морковь	Образцы, обработанные ИЭП и высушенные в вакууме при 25–90 °С, содержали на 24–33 мг/100 г сухого вещества больше $\beta$ -каротина, чем необработанные образцы. Больше $\beta$ -каротина разлагается при более высоких температурах сушки.	Liu et al., 2020
		2 кВ/см, 2 мс, 200 импульсов, 2,5 кДж/кг	Черника	Предварительная обработка ИЭП перед вакуумной сушкой (45–75 °С) улучшала концентрацию витамина С в чернике. Сохранение витамина С было выше в образцах, обработанных ИЭП (19–46%), чем в необработанных (16–43%).	Liu et al., 2017
	Эффективность сушки	325 В, 65 импульсов, 650 В/см, 150 мкс	Листья базилика	При использовании ИЭП в качестве предварительной обработки время сушки сократилось на 33% (с 15 до 10 часов).	Telfser & Galindo, 2019
		600 В/см, 100 импульсов, 100 мкс	Картофель	Предварительная обработка ИЭП сократила время вакуумной сушки на 22–27% при 40–70 °С по сравнению с необработанным материалом. Предварительная обработка ИЭП показала, что при низких температурах внутри образцов испаряется больше свободной воды на 18–27 °С.	Liu et al., 2018

Способ сушки	Параметры качества	Параметры обработки ИЭП	Обрабатываемое сырье	Полученные результаты	Источник
Сублимационная сушка	Физические свойства	325 В, 65 импульсов, 650 В/см, 150 мкс	Листья базилика	Как необработанные, так и обработанные ИЭП лиофилизированные листья имеют поврежденную поверхность трихом. Образцы, обработанные ИЭП, сохраняли менее свежий цвет (14,3%), чем необработанные (57,2%).	Telfser & Galindo, 2019
		400 В/см, 100 мкс	Клубника	Твердость клубники снижается после обработки ИЭП в течение 0,096 с. Упругость и когезивность предварительно обработанных образцов увеличиваются по сравнению с интактными образцами, и этот рост продолжается со временем обработки ИЭП.	Al-Sayed et al., 2018
	Питательные свойства	1,07 кВ/см, 0,5–5 кДж/кг	Яблоко	Образец, обработанный ИЭП, сохранил общее содержание фенолов, более высокое потребление энергии, более высокое содержание фенолов (47% по сравнению с необработанным), но более низкую антиоксидантную активность (DPPH 53% и ABTS 60%).	Lammerskiten, Mykhailyk, et al., 2019
Эффективность сушки		325 В, 65 импульсов, 650 В/см, 150 мкс	Яблоко	При использовании ИЭП в качестве предварительной обработки время сушки сократилось на 57% (с 12 до 9 часов).	Lammerskiten, Mykhailyk, et al., 2019
		1,07 кВ/см, 2 Гц	Яблоко	Образцы, обработанные ИЭП показали снижение остаточной влажности на 82%. Предварительная обработка ИЭП сократила время лиофилизации с 8 до 5 часов.	Lammerskiten, Mykhailyk, et al., 2019
		90 мкс, 1–2 кВ/см, 10–60 импульсов, 0,026 кДж/г	Яблоко	Предварительная обработка ИЭП сократила время сушки на 17,7% и потребление энергии на 24,7%, а также увеличила коэффициент регидратации на 65,22%. Меньшая напряженность электрического поля привела к более высокой эффективности.	Wu & Zhang, 2019

сократить время обработки за счет увеличения скорости сушки и сокращения времени сушки, как показано в Таблице 2. Электропорация ИЭП может улучшить проницаемость клеточных мембран растительных клеток, что приводит к увеличению перемещения содержимого из клеток. ИЭП также может увеличить удаление влаги из тканей растений, обезвоженных при более высокой скорости высыхания. Использование ИЭП в качестве предварительной обработки во время обезвоживания растительного сырья было изучено для различных продуктов.

## Физические свойства

### Растительная ткань

Обработка ИЭП может оказывать влияние на структуру пищевого продукта (Zhang et al., 2019). В результате умеренного воздействия импульсного электрического поля некоторые клетки теряют свою проницаемость, но, если действие прекращается в течение нескольких секунд, клеточные мембраны могут повторно восстанавливать нарушенную проницаемость. Обработка электрическим полем (1000 В/см) увеличила пористость

ткани яблока на 5 %, а образовавшиеся поры были меньше, чем поры в необработанных образцах яблок. Парняков и др. (2016) сообщили, что яблоки, предварительно обработанные ИЭП перед вакуумной сублимационной сушкой, помогают сохранить форму после сушки, предотвращают усадку и увеличивают поры в тканях по сравнению с яблоками, не обработанными ИЭП. Индекс дезинтеграции  $Z$  (значение  $Z$ ) используется для описания распада клеток и измерения влияния электрического поля на пищевые ингредиенты. Значение индекса дезинтеграции ( $Z$ ) оказывает значительное влияние на регидратационную способность. Высокая регидратационная способность установлена при  $Z = 0,96$ . Кроме того, электропорированные образцы имели крупные поры. Воздействие ИЭП на яблоки ( $W = 0,5-1$  кДж/кг,  $E = 1,07$  кВ/см) выявило большие поры и высокую пористость по сухому веществу (СВ). Это подтверждает сохранение макроформ после предварительной обработки ИЭП (Lammerskitten, Wiktor, et al., 2019; Arshad et al., 2020; Arshad et al., 2021). Результаты других исследований также показывают, что действие ИЭП увеличило размер пор на  $\approx 86$  и регидратационную способность на  $\approx 1,3$ .

Лиофилизированные образцы обработанные ИЭП в основном характеризуются сублимацией, тогда как образцы без сушки вымораживанием и обработкой ИЭП контролировались испарением. Таким образом, удержание жидкости способствует сохранению исходной структуры, и как следствие, к минимальной потере объема. Процесс сублимационной сушки с использованием низких температур увеличивает усадку сырья, так как требует длительного времени воздействия. Проведенный анализ результатов научных исследований позволяет сделать вывод, что предварительная обработка ИЭП сырья перед сушкой значительно снижает негативное воздействие и способствует сохранению качественных показателей сушеного продукта (Lammerskitten et al., 2019a; Neri et al., 2021; Jin et al., 2017; Kandušer et al., 2017; Kumar et al., 2021; Kwao et al., 2016; Lasekan et al., 2017; López-Gámez et al., 2020; Lung et al., 2022).

### **Распад клеток**

Индекс распада клеток (ИРК), степень повреждения ткани, является важным показателем в исследованиях сушки и используется для оценки степе-

ни разрушения клеток. Значения ИРК варьируется от 0 для неповрежденной ткани до 1 для сильно поврежденной ткани. Более высокая дезинтеграция клеток указывает на большее количество отверстий в клеточных стенках растительной ткани, что позволяет большему количеству молекул воды проходить через клеточную стенку. Действие ИЭП способствует дезинтеграции клеточного материала, ускоряет перенос массы и тепла из матрицы целевого соединения, обеспечивая эффективность, диффузию или экстракцию прессованием растворителем, наряду с замораживанием, сушкой вымораживанием, осмотической дегидратацией и сушкой.

Эффективность предварительной обработки ИЭП зависит от вида сырья и его характеристик. Сырая морковь имеет двумерную анизотропную анатомическую характеристику за счет удлинения клеток в направлении роста; прежде всего, в коре идентифицируется наружная область, тогда как внутренняя сосудистая ткань образована стелой. После сушки эта анизотропия в определенной степени сохраняется (Alam et al., 2018). Подобно клеткам моркови, клетки пастернака маленькие и круглые, диаметром около 100 мкм. Влияние предварительной обработки ИЭП на уровень разрушения клеток было проанализировано с помощью ИРК: образцы моркови показали значительный рост ИРК и установились на уровне около 0,8 примерно через 20 мс и 1000 импульсов, что указывает на высокую степень повреждения ткани. Между тем, ИРК для пастернака был выше, приближаясь к 1 за 200 мс и 10 000 импульсов. Разница в эффективности электропорации между морковью и пастернаком была связана со структурными различиями между двумя корнями, поскольку пастернак имеет более высокое содержание нерастворимой клетчатки, что затрудняет его разрушение.

На значение  $Z$  для каждого образца влияют различия в характеристиках импульса. Предварительная обработка ИЭП для сушки лука горячим воздухом была эффективна при напряженности электрического поля до 1,07 кВ/см. Увеличение ИРК привело к увеличению  $Z$  до 0,6, поэтому больше влаги могло быть перенесено изнутри наружу клетки (Ostermeier et al., 2018). Напротив, при удельной энергии 3 кДж/кг и напряженности электрического поля 1,0 кВ/см значения  $Z$  для моркови, лука и картофеля составляли  $0,65 \pm 0,1$ ,  $0,72 \pm 0,09$  и  $0,83 \pm 0,08$  соответственно.

При исследовании высушенных листьев базилика (*Ocimum basilicum* L.) обработка ИЭП могла поддерживать жизнеспособность клеток в тканях. Однако при увеличении ширины импульса и количества импульсов (400 мкм и 990 импульсов) жизнеспособность клеток терялась из-за необратимого повреждения клеток (необратимая пермеабилитация). Установлено, что необратимое открытие замыкающих клеток в результате обработки ИЭП может сократить время сушки базилика на 37% при температуре сушки 50 °С, в то время как Telfser и Galindo (2019) наблюдали сокращение времени на 57% при температуре сушки 40 °С в процессе сушки базилика на том же устройстве.

### Цвет

Цвет — это критерий оценки свойств сушеных пищевых продуктов, оказывающий значительное влияние на восприятие потребителя. Применение ИЭП при сушке моркови с использованием вакуумной сушилки привело к значительным различиям в цвете. Образец, высушенный при 90 °С, имел наиболее значительное изменение цвета ( $\Delta E$ ) по сравнению с сушкой при более низких температурах (25, 50 и 75 °С), а образцы обработанные ИЭП имели более низкую  $\Delta E$  по сравнению с образцами без применения ИЭП (Liu et al., 2020). Реакции потемнения (как ферментативные, так и неферментативные, реакция Майяра) при более высоких температурах сушки могли быть причиной различий в цвете. Каротиноиды окисляются при длительном воздействии воздуха и высоких температур. Значение \* показывает степень красного/зеленого цвета и зависит от ферментативной реакции потемнения (Lammerskitten et al., 2019b).

Кроме того, ИЭП может сократить время сушки, тем самым сводя к минимуму обесцвечивание. В цветовом диапазоне значения  $L$  сушеная морковь, обработанная ИЭП, имела более низкое снижение значения  $L$  по сравнению с необработанной сушеной морковью. Электропорация под действием ИЭП увеличивает секрецию внутриклеточного содержимого, такого как каротиноиды (Alam et al., 2018). При сушке листьев базилика на воздухе образцы с обработкой ИЭП и без нее не показали существенной разницы в цвете. Между тем, высушенные в вакууме и замороженные листья базилика, обработанные ИЭП, имели значительно большее изменение цвета. Такое изменение цвета может быть связано

с распадом хлорофилла. Обычная сушка на воздухе вызывает изменение цвета листьев на желтый; это происходит потому, что хлорофилл более чувствителен к теплу. На это указывает сдвиг значения оттенка ( $\Delta h$ ), что способствует более желтому цвету (Telfser & Galindo, 2019).

Лиофилизированные яблоки, подвергнутые предварительной обработке ИЭП, показали значительно разные значения светлоты ( $p < 0,05$ ) в образцах с большей удельной теплотой (1 кДж/кг). На большее значение легкости влияет большая пористость продукта. Кроме того, образцы с обработкой ИЭП имеют более быструю ферментативную реакцию потемнения, чем образцы без нее. Однако во время сушки вымораживанием реакцию потемнения можно подавить, поскольку в сушильной камере мало кислорода и низкая температура, связанная с перепадом давления (Lammerskitten et al., 2019a). Различие в цвете тканей сушеных яблок, особенно с предварительной обработкой ИЭП, связано с изменением общего содержания фенольных соединений. Обработка ИЭП и полифенолоксидаза вызывают окрашивание (потемнение), особенно при повреждении структуры ткани яблока. В другом исследовании осмо-дегидратированной клюквы, подвергнутой бланшированию с последующей обработкой ультразвуком и ИЭП, сочетание бланширования с ультразвуком и ИЭП привело к лучшему сохранению цвета и более высокой антиоксидантной активности, чем только бланшированные образцы (Nowacka et al., 2019). Когда свежие срезы обрабатывали ИЭП, на проницаемость клеток влияла электропорация, которая изменяла структуру ткани и процесс массопереноса. Кроме того, содержание сахара в образцах, обработанных ИЭП, значительно снизилось, что привело к ингибированию реакции Майяра и снижению образования акриламида (Li et al., 2020).

### Регидратационная способность

В результате научных исследований было установлено, что предварительная обработка ИЭП и сушка влияют на регидратационную способность листьев базилика, поскольку обработка ИЭП приводит к более быстрому поглощению воды. Однако существенной разницы в регидратационной способности между контрольными образцами и образцами, обработанными ИЭП после вакуумной сушки, не наблюдалось. Способность к регидратации связана

со степенью структурного коллапса, при котором вакуумная сушка вызывает сохранение структуры и высокую пористость тканей, что обеспечивает большую способность к регидратации, чем сушка на воздухе (Telfser & Galindo, 2019; Wiktor et al., 2013; Yamakage et al., 2021; Zderic & Zondervan, 2016; Zderic et al., 2013; Zhang et al., 2021; Zhang et al., 2021; Zhang et al., 2015; Zhao et al., 2012).

Применение предварительной обработки ИЭП на лиофилизированной яблочной ткани показало лучшие свойства регидратации, чем у образцов без предварительной обработки, где образец обработанный ИЭП более пористый, чем необработанный материал. Кроме того, низкая температура сушки позволяет избежать реакций карамелизации простых сахаров; вместо этого они хорошо растворяются в воде и не играют никакой роли при регидратации. Образцы сушеных яблок с предварительной обработкой ИЭП также имели более твердую текстуру, чем образцы без предварительной обработки после 1 месяца хранения (Lammerskitten et al., 2019a).

#### **Механические свойства**

Предварительная обработка ИЭП может повлиять на текстуру тканей сухих продуктов. Исследование образцов сушеной моркови показало более низкое значение деформации (30%) в образце, обработанном ИЭП при 100 импульсах при 5 кВ/см (410,6 Н), чем в образце без предварительной обработки (689,2 Н). Предварительная обработка ИЭП может сделать материал более чувствительным к сжатию из-за внутреннего разрушения конструкции, что облегчит уплотнение разрушенного материала при том же смещении. Это также может быть связано с повышенной экспрессией сока клеточных материалов после применения ИЭП, что может способствовать сжатию (Wiktor et al., 2018). Сушка моркови и пастернака с предварительной обработкой ИЭП не оказала заметного влияния на параметры напряжения сдвига. Яблоки, подвергнутые предварительной обработке ИЭП и сублимационной сушке, имели меньшее значение механического дескриптора (7,5–9,5 Н), чем яблоки без предварительной обработки ИЭП (20,6 Н). Твердость яблока была снижена на 53,8–63,1% за счет обработки ИЭП перед сушкой вымораживанием. Обработка ИЭП может изменить физические свойства, такие как упругость, вязкость и активность воды растительных продуктов.

## **Пищевая ценность**

### ***β-каротин***

В одном исследовании обработка ИЭП перед вакуумной сушкой моркови (207 мг/100 г сухого вещества) способствовала сохранению большего количества β-каротина, чем без обработки ИЭП (170 мг/100 г сухого вещества). Это различие было вызвано увеличением внутриклеточного высвобождения β-каротина под действием ИЭП. Кроме того, как с обработкой ИЭП, так и без нее, сушка приводила к значительному снижению содержания β-каротина по сравнению с тем, что было до сушки. При сушке с температурой 90 °С морковь, обработанная ИЭП содержала 155 мг/100 г сухого вещества β-каротина, а морковь без обработки — только 131 мг/100 г сухого вещества. Такая же тенденция наблюдалась при температурах сушки 25, 50 и 75 °С. Однако сушка при 90 °С привела к наибольшей деградации β-каротина, 25%, и только 17,8% деградации при температуре сушки 25 °С. Это было связано с ускоренным окислением пигмента при высоких температурах сушки. Образцам моркови, подвергнутым обработке ИЭП, требовалось на 33–55% меньше времени сушки с минимальным разложением β-каротина по сравнению с образцами без обработки ИЭП. Установлено, что предварительная обработка ИЭП способствует снижению разложения β-каротина, так как после обработки время сушки значительно меньше чем без предварительной обработки (Liu et al., 2020).

При исследовании сушеного манго, подвергнутого предварительной обработке ИЭП с последующей сушкой в вакууме или горячим воздухом, общее содержание каротиноидов в образце обработанным ИЭП было выше, чем в контрольном образце, а именно 50,8 мг/100 г сухого вещества для вакуумной сушки и 57,5 мг./100 г СВ при сушке горячим воздухом, в то время как в образцах без предварительной обработки сохранялось только 21 мг/100 г СВ при вакуумной сушке и 47,0 мг/100 г сухого вещества при сушке горячим воздухом (Lammerskitten et al., 2020). В другом исследовании влияния комбинации ИЭП и ультразвуковой обработки на сушку клюквы содержание антоцианов в образцах, обработанных ИЭП и ультразвуком, было меньше, чем в образцах, подвергнутых бланшированию; это было связано с большей дезинтеграцией материала и большим выщелачиванием полярных сое-

динений. Кроме того, образование радикалов ОН из-за ИЭП и предварительной обработки ультразвуком могло снизить содержание антоцианов в осмодегидратированной клюкве (Nowaska et al., 2019). Подобно исследованию высушенных распылением порошков, полученных из сока красного болгарского перца, обработанного ИЭП, использование ИЭП при 3 кДж/кг способствовало более высокому общему содержанию каротиноидов, чем ИЭП при 1 кДж/кг (620 и 605 мг β-каротина/100 мг, г ДМ соответственно). Высокое удержание при применении ИЭП в дозе 3 кДж/кг может быть связано с тем, что сок, полученный из материала, обработанного ИЭП, содержит более высокую долю этого соединения (Rybak et al., 2020).

#### **Общее количество фенольных соединений**

При исследовании сушеных яблок, предварительно обработанных ИЭП дозой 0,5–1 кДж/кг, общее содержание фенолов было на 47,3% выше, чем в яблоках без предварительной обработки ИЭП. Это происходит в результате индуцированной ИЭП образования новых соединений, которые можно обнаружить с помощью метода Фолина-Чиокальтеу. Кроме того, на основе анализа антиоксидантной активности сушеных яблок, предварительно обработанных ИЭП, было отмечено снижение DPPH на 52,7% и ABTS на 60,0% по сравнению с яблоками без предварительной обработки ИЭП, что связано с просачиванием биоактивных компонентов в среду во время обработки. Несмотря на эти результаты, не наблюдалось существенной связи между общим содержанием фенолов в анализах ABTS или DPPH (Lammerskitten et al., 2019b). Вероятно, это связано с тем, что реагент Фолина-Чиокальтеу не является селективным и может взаимодействовать с другими молекулами, содержащими гидроксильную группу, такими как аскорбиновая кислота, восстанавливающие сахара и продукты ферментативного потемнения (Wiktor et al., 2015). Исследование сушеного манго показало, что в образцах, предварительно обработанных ИЭП содержалось 184,2 мг эквивалента хлорогеновой кислоты (САЕ)/100 г сухого вещества, что было выше, чем у сушеного манго без обработки ИЭП, в диапазоне 120,7–165,2. мг САЕ/100 г ДМ, демонстрируя удержание 70% фенольных соединений после предварительной обработки ИЭП (Lammerskitten et al., 2020).

#### **Витамин С**

Согласно литературным данным, с увеличением температуры и времени сушки содержание витамина С в различных видах фруктов снижается (Bozkir, 2020). Результаты исследования авторов Mannozi et al. (2020), показывают, что содержание витамина С увеличивается с повышением температуры сушки, это может быть связано с более короткой продолжительностью обработки при максимальной температуре.

Этапы низкотемпературной обработки, такие как те, которые использовались в контрольном образце или те, которые использовали предварительную обработку, помогли сохранить концентрацию витамина С и некоторых других компонентов. ИЭП изменяет структуру витамина С, способствуя превращению изомера витамина С из его енольной формы в кето-форму. Кроме того, ИЭП не вызывало разрушения витамина С или медленной окислительной деградации, но улучшало антиоксидантную активность витамина С, образцов, обработанных ИЭП. Данные были получены Yu et al. (2017), где концентрация витамина С и других соединений, таких как антоцианы и общее количество фенолов, а также антиоксидантная активность черники, обработанной ИЭП, существенно не отличались ( $p > 0,05$ ) по сравнению с образцами, не обработанными ИЭП. После сушки черники с использованием 12 различных методов, включая сушку горячим воздухом и вакуумную сушку при 45, 60 и 75 °С, сохранение витамина С было выше в образцах, обработанных ИЭП, до вакуумной сушки (19–46%), чем в необработанных образцах. (16–43%). Точно так же удержание витамина С было выше в образцах, обработанных ИЭП перед сушкой горячим воздухом (18–21%), чем в необработанных образцах (16–19%).

Из-за необратимых окислительных процессов сушка горячим воздухом резко снижает концентрацию витамина С независимо от температуры сушки. Об аналогичном результате сообщили López et al. (2010), которые показали, что черника, высушенная горячим воздухом при температуре 80 °С, потеряла 92% содержания витамина С, что указывает на то, что недостаток кислорода в окружающей среде и короткая продолжительность вакуумной сушки могли привести к большему сохранению витамина С.

## Эффективность сушки

### Скорость сушки

Влияние ИЭП на кинетику сушки зависит от множества параметров, и трудно определить прямую корреляцию с распадом клеток. Поскольку материалы, обработанные ИЭП, имеют большую дисперсию воды и пара, процесс сушки короче. Снижение влажности с течением времени в материале, обработанном ИЭП, намного значительнее, чем в необработанном материале (Golberg et al., 2016). По сравнению с материалом, не обработанным ИЭП, время, необходимое для сушки, может быть сокращено в два-три раза. Продолжительность обезвоживания связана со скоростью разрушения клеток и количеством необходимой энергии. По мере увеличения поступления энергии распад клеток происходит за счет более высокой скорости проницаемости мембраны. Повышенная проницаемость мембраны приводит к более высокой скорости переноса воды, что ведет к более быстрому высыханию. Поскольку молекулы воды мобилизуются через пористость, время, необходимое для достижения поверхности ткани посредством капиллярности, сокращается, что приводит к более быстрому высыханию (Chauhan et al., 2018).

ИЭП удаляет воду из поврежденных клеток, усиливая механизмы массообмена. Это увеличивает движение воды из образцов во внешнюю среду, ускоряя испарение. Как следствие, скорость сушки увеличивается; чем больше степень повреждения ткани, обработанной ИЭП, тем быстрее происходит процесс сушки (Patel et al., 2015). Использование ИЭП для улучшения вакуумной сублимационной сушки тканей фруктов и овощей приводило к увеличению диаметра пор.

Мягкие температуры сушки (50 и 60 °C) повышают эффективность обработки ИЭП моркови; напротив, 70 °C не оказало существенного влияния (Alam et al., 2018). Это можно объяснить тем, что на скорость сушки влияет не только количество выделяемой воды, но и физико-химические свойства материала, его плотность и пористость (Tamer et al., 2016). Анализ текстуры картофеля, поврежденного ИЭП, и картофеля, подвергнутого замораживанию-оттаиванию, выявил значительно отличающиеся от ИЭП структуры и меньшие изменения (Liu et al., 2021).

### Потребление энергии

Энергоемкость и качество производимых пищевых продуктов являются важными критериями выбора технологии сушки. Меньшее время сушки может привести к снижению потребления энергии. Увеличение интенсивности ИЭП и удельного расхода энергии приводит к увеличению индекса дезинтеграции клеточных мембран, что улучшает как скорость высыхания, так и потерю влаги. При той же температуре увеличение интенсивности ИЭП улучшило коэффициент диффузии воды. Кроме того, более высокие коэффициенты диффузии приводят к большей передаче влаги. При одинаковых температурах самая высокая интенсивность ИЭП приводила к более высокой скорости сушки и сокращению времени сушки (Rahaman et al., 2019). Кроме того, по сравнению с сушкой удельные энергозатраты ИЭП ничтожно малы. Потребление энергии при использовании методов сушки с помощью ИЭП ниже, чем при обезвоживании неповрежденного продукта, из-за значительно более короткого времени сушки (Wiktor & Witrowa-Rajchert, 2016). Морковь, обработанная ИЭП 5 кВ/см с 10–100 импульсами, привела к удельному потреблению энергии 8–80 кДж/кг соответственно. Согласно этим выводам, изменение числа импульсов является одним из лучших способов ускорить сушку и снизить потребление энергии. Были случаи, когда проводимость обработанного материала не увеличивалась с увеличением продолжительности обработки ИЭП. Кроме того, большее потребление энергии при обработке ИЭП может не привести к сокращению времени сушки из-за перенасыщенной электропорации. Следовательно, с точки зрения сушки электропорационное перенасыщение следует определять как перфорацию клеточных мембран выше оптимальной. Растительная ткань разрушается после высыхания из-за повышенного разрушения клеточной мембраны. По сравнению с затратами энергии на обычную сушку (4,0–6,0 МДж/кг отделенной воды) увеличение затрат энергии на обработку ИЭП относительно невелико (0,2–20 кДж/кг) (Ostermeier et al., 2020). Удельный расход энергии, необходимый для достижения пермеабилитации ткани, составляет 1–10 кДж/кг (0,3–3 кВтч/т) обрабатываемого материала. Стоимость электроэнергии в размере 0,10 евро/кВтч соотносится со стоимостью электроэнергии в размере 0,03–0,30 евро/тонну переработанного продукта (Barba et al., 2015; Ostermeier

et al., 2020). Кроме того, стоимость электроэнергии в каждой стране разная. Следовательно, технология ИЭП может представлять значительный интерес, поскольку она более энергоэффективна и экономична, увеличивает пропускную способность, а также является устойчивой и экологически чистой.

### Преимущества и ограничения предварительной обработки ИЭП перед сушкой

Предварительная обработка ИЭП широко используется для облегчения процесса сушки продуктов растительного происхождения. Как показано в Таблице 2. ИЭП, как метод предварительной обработки перед процессом сушки имеет как преимущества, так и ограничения. Поскольку электропорация ИЭП «разрыхляет» клетки и улучшает количество воды, теряемой при сушке, требуется более короткий период сушки; кроме того, предварительная обработка ИЭП может эффективно снизить общее потребление энергии в процессе сушки. Сокращение времени сушки может привести к тому, что материалы сохраняют больше пи-

тательных веществ и биологически активных соединений. Обратимая пермеабиллизация в качестве предварительной обработки сушки имеет большой потенциал для промышленного применения благодаря очевидным преимуществам ИЭП. Большое количество растительных продуктов в промышленности может создать проблему для крупномасштабного производства, поскольку потребуются системы ИЭП непрерывного действия и с высокой производительностью. Несмотря на это, ученые во всем мире приложили немало усилий для масштабирования этой технологии. Следует также отметить, что эффективность электропорации зависит от нескольких параметров, таких как тип материалов и используемый метод сушки. Кроме того, его эффективность также зависит от различных параметров обработки. Стандартной технологии применения ИЭП не существует. Двумя наиболее часто корректируемыми переменными являются потребляемая энергия и напряженность электрического поля, которые можно использовать для сравнения результатов различных исследовательских групп (Barba et al., 2015). Преимущества и ограничения применения ИЭП в качестве вспомогательной технологии сушки представлены в Таблице 3.

**Таблица 3**  
Преимущества и недостатки ИЭП как способа предварительной обработки перед сушкой

Преимущества/ограничения	Эффективность	Примеры	Источник
Преимущества	Способствует максимально-му сохранению питательных веществ	Сохранение β-каротина в высушенных образцах улучшилось за счет сокращения времени сушки с предварительной обработкой ИЭП по сравнению с необработанным образцом. В яблоках, обработанных ИЭП перед сушкой общее содержание фенолов на 47,3 % выше, чем в яблоках без предварительной обработки ИЭП. Сушеные грибы шиитакэ ( <i>Lentinus edodes</i> ), предварительно обработанные ИЭП (1 кВ/см), имеют более высокое общее содержание фенолов (193,32 мкг/мкл), чем высушенные грибы без обработки ИЭП (161,76 мкг/мкл).	(Liu et al., 2020; Wiktor et al., 2015; Li et al., 2021)
	Лучшая регидратация	ИЭП может ингибировать усадку и обеспечивает сохранение макроформы и развитие крупных пор. Большая регидратационная способность и высокая скорость пропитки влагой и более быстрое водопоглощение по сравнению с образцом без предварительной обработки ИЭП Ткань, обработанная ИЭП имела более высокий уровень хрупкости и ломкости, но необработанная ткань имела более твердую и растрескивающуюся текстуру. Образцы, предварительно обработанные ИЭП, имели большее восстановление после регидратации.	(Parniakov et al., 2016; Lammerskitten, Wiktor, et al., 2019; Telfser & Galindo, 2019; Kwao et al., 2016)

Окончание Таблицы 2

Преимущества/ограничения	Эффективность	Примеры	Источник
Преимущества	Увеличение стабильности цвета	Цвет, близкий к свежему продукту/свежему сырью Обесцвечивание может быть сведено к минимуму.	(Telfser & Galindo, 2019; Liu et al., 2020)
	Повышение эффективности сушки	Улучшение кинетики сушки Снижение потребления энергии.	(Chauhan et al., 2018; Lamanauskas et al., 2015; Lammerskitten, Wiktor, et al., 2019; Liu et al., 2018; Shorstkii et al., 2022; Telfser & Galindo, 2019; Wu & Zhang, 2019)
Ограничения	Низкая производительность обработки	Обычно емкость ИЭП для лабораторного масштаба, потребность в установках для промышленного производства. Обычно еще нужен процесс нарезки или резки. Обычно используется камера периодического действия.	(Alam et al., 2018; Chauhan et al., 2018; Lammerskitten, Wiktor, et al., 2018; Rahaman et al., 2019; Shorstkii et al., 2022; Vorobiev & Lebovka, 2019; Wiktor et al., 2016; Yamakage et al., 2021)
	Различное корректирующее/модифицированное оборудование	Ограниченная эффективность электрического поля была обусловлена ярко выраженными защитными эффектами, которые не зависели от конструкции и установки камеры обработки. Отсутствие надежных и гораздо более практичных электрических систем было определено как главный камень преткновения на пути производственного использования ИЭП.	(Liu et al., 2020; Wiktor et al., 2015; Li et al., 2021) Chauhan et al., 2018
		Загрязнение и коррозия электродов, химические изменения, миграция материала электродов и электролиз воды в камере обработки могут вызвать проблемы с продуктом. Ограниченные определения результатов затрудняют сравнение результатов лабораторных исследований; неправильно выбранные параметры обработки ИЭП могут привести к ее неэффективности.	(Wiktor & Witrowa-Rajchert, 2016). (Golberg et al., 2016). (Nowacka et al., 2019). Yamakage et al., 2021; Zderic & Zondervan, 2016; Zderic et al., 2013; Zhang et al., 2021; Zhang et al., 2021; Zhang et al., 2015; Zhao et al., 2012).
	Расходы	Общая стоимость ИЭП была на 147% (2,2 цента/л) выше, чем стоимость обычной термической обработки (1,5 цента/л).	(Arshad et al. 2020, 2021; Schottroff et al., 2020; Timmermans et al., 2019)

## ВЫВОДЫ

Сушка сырья является наиболее распространенным способом обработки растительного сырья, который способствует получению продуктов с длительным сроком хранения. Вместе с тем проведение процесса сушки растительного сырья требует длительного времени, что оказывает негативное влияние на качество пищевых продуктов. Импульсное электрическое поле (ИЭП) представляет собой технологию нетермической обработки пищевых продуктов, которая вызывает электропорацию клеточной

мембраны, тем самым улучшая массоперенос через клеточную мембрану. Обработка импульсным электрическим полем является одной из эффективных технологий, которую целесообразно использовать в качестве предварительной обработки перед сушкой пищевого сырья с целью максимального сохранения органолептических, физико-химических показателей и пищевой ценности. Многие виды плодоовощного сырья, предварительно обработанные ИЭП, обладают улучшенными качественными показателями после сушки по сравнению с теми, которые не были предварительно обработа-

ны. Овощи, фрукты и растительное сырье, обработанные ИЭП имеют более яркий цвет, демонстрируют более высокое удержание  $\beta$ -каротина и более высокую антиоксидантную активность, а также время процесса сушки таких продуктов значительно короче.

Предварительная обработка импульсным электрическим полем перед сушкой способствует сокращению времени сушки, снижению энергоемкости и сохранению биологически активных соединений в готовом продукте.

В ходе проведения будущих научных исследований результаты данного обзора могут служить достоверной и основополагающей информацией для более точной оценки факторов, оказывающих влияние на эффективность ИЭП. Дальнейшие научные исследования должны быть направлены на установление оптимальных условий обработки растительной продукции ИЭП, конкретных параметров обработки для различных видов сырья, а также

материала и геометрии электродов, чтобы свести к минимуму все имеющиеся недостатки ИЭП. Материалы данной статьи могут быть использованы в научных целях в качестве источника достоверных обобщенных данных, а также для промышленного внедрения эффективной технологии обработки сырья ИЭП перед сушкой, установлении оптимальных параметров обработки для различных видов сырья.

## АВТОРСКИЙ ВКЛАД

**Бурак Леонид Чеславович:** руководство исследованием, концептуализация, методология, проведение исследования, верификация данных, формальный анализ, создание рукописи и её редактирование, визуализация.

**Сапач Александр Николаевич:** проведение исследования, верификация данных, формальный анализ, создание рукописи и её редактирование, визуализация.

## ЛИТЕРАТУРА

- Al-Sayed, L., Boy, V., Madieta, E., Mehinagic, E., & Lanoisellé, J.-L. (2018). Pulsed electric fields (ИЭП) as pre-treatment for freeze-drying of plant tissues. In *IDS'2018: 21st international drying symposium* (pp. 11–14). València. <https://doi.org/10.4995/ids2018.2018.7484>
- Alam, M. R., Lyng, J. G., Frontuto, D., Marra, F., & Cinquanta, L. (2018). Effect of pulsed electric field pretreatment on drying kinetics, color, and texture of parsnip and carrot. *Journal of Food Science*, 83(8), 2159–2166. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14216>
- Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Munir, A., Buntat, Z., Ahmad, M. H., Jusoh, Y. M. M., Bekhit, A. E. D., Roobab, U., Manzoor, M. F., & Aadil, R. M. (2020). Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: An engineering perspective. *Trends in Food Science and Technology*, 104, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.008>
- Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Roobab, U., Munir, M. A., Naderipour, A., Qureshi, M. I., El-Din Bekhit, A., Liu, Z. W., & Aadil, R. M. (2021). Pulsed electric field: A potential alternative towards a sustainable food processing. *Trends in Food Science and Technology*, 111, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.041>
- Barba, F. J., Parniakov, O., Pereira, S. A., Wiktor, A., Grimi, N., Boussetta, N., Saraiva, J. A., Raso, J., Martin-Belloso, O., Witrowa-Rajchert, D., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2015). Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food Research International*, 77(4), 773–798. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.015>
- Bobinaitė, R., Pataro, G., Lamanauskas, N., Šatkauskas, S., Viškelis, P., & Ferrari, G. (2015). Application of pulsed electric field in the production of juice and extraction of bioactive compounds from blueberry fruits and their by-products. *Journal of Food Science and Technology*, 52(9), 5898–5905. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1668-0>
- Bozkir, H. (2020). Effects of hot air, vacuum infrared, and vacuum microwave dryers on the drying kinetics and quality characteristics of orange slices. *Journal of Food Process Engineering*, 43(10), Article e13485. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13485>
- Buchmann, L., & Mathys, A. (2019). Perspective on pulsed electric field treatment in the bio-based industry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, Article 00265. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00265>
- Chauhan, O. P., Sayanfar, S., & Toepfl, S. (2018). Effect of pulsed electric field on texture and drying time of apple slices. *Journal of Food Science and Technology*, 55(6), 2251–2258. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3142-x>
- Chen, B., Chang, C., Cheng, K., Hou, C., Lin, J., Chen, M., Permatasari, S., Chen, C., & Hsieh, C. (2022). Using the response surface methodology to establish the optimal conditions for preserving bananas (*Musa acuminata*) in a pulsed electric field and to decrease browning induced by storage at a low temperature. *Food Packaging and Shelf Life*, 31, Article 100804. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100804>

- Chen, B. R., Wang, Z. M., Lin, J. W., Wen, Q. H., Xu, F. Y., Li, J., Wang, R., & Zeng, X. A. (2022). Improving emulsification performance of waxy maize starch by esterification combined with pulsed electric field. *Food Hydrocolloids*, *129*, Article 107655. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107655>
- Dalvi-Isfahan, M., Hamdami, N., Le-Bail, A., & Xanthakis, E. (2016). The principles of high voltage electric field and its application in food processing: A review. *Food Research International*, *89*(1), 48–62. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.09.002>
- Dellarosa, N., Tappi, S., Ragni, L., Laghi, L., Rocculi, P., & Dalla Rosa, M. (2016). Metabolic response of fresh-cut apples induced by pulsed electric fields. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *38*(B), 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.06.016>
- Demir, E., Dymek, K., & Galindo, F. G. (2018). Technology allowing baby spinach leaves to acquire freezing tolerance. *Food and Bioprocess Technology*, *11*(4), 809–817. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-2044-7>
- Devkota, L., He, L., Bittencourt, C., Midgley, J., & Haritos, V. S. (2022). Thermal and pulsed electric field assisted hydration of common beans. *LWT – Food Science and Technology*, *158*, Article 113163. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113163>
- Dhua, S., Kumar, K., Sharanagat, V. S., & Nema, P. K. (2022). Bioactive compounds and its optimization from food waste: Review on novel extraction techniques. *Nutrition and Food Science*, *52*(8), 1270–1288. <https://doi.org/10.1108/NFS-12-2021-0373>
- El Kantar, S., Boussetta, N., Lebovka, N., Foucart, F., Rajha, H. N., Maroun, R. G., Louka, N., & Vorobiev, E. (2018). Pulsed electric field treatment of citrus fruits: Improvement of juice and polyphenols extraction. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *46*, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.09.024>
- Fauster, T., Schlossnikl, D., Rath, F., Ostermeier, R., Teufel, F., Toepfl, S., & Jaeger, H. (2018). Impact of pulsed electric field pretreatment on process performance of industrial French fries production. *Journal of Food Engineering*, *235*, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.04.023>
- Ferreira-Holderbaum, D., Kon, T., Kudo, T., & Pedro Guerra, M. (2010). Enzymatic browning, polyphenol oxidase activity, and polyphenols in four apple cultivars: Dynamics during fruit development. *HortScience*, *45*(8), 1150–1154. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.8.1150>
- Gamboa-Santos, J., Megías-Pérez, R., Soria, A. C., Olano, A., Montilla, A., & Villamiel, M. (2014). Impact of processing conditions on the kinetic of vitamin C degradation and 2-furoylmethyl amino acid formation in dried strawberries. *Food Chemistry*, *153*, 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.12.004>
- Gavahian, M., Chu, Y. H., & Sastry, S. (2018). Extraction from food and natural products by moderate electric field: Mechanisms, benefits, and potential industrial applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *17*(4), 1040–1052. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12362>
- Gavahian, M., & Farahnaky, A. (2018). Ohmic-assisted hydrodistillation technology: A review. *Trends in Food Science and Technology*, *72*, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.12.014>
- Gavahian, M., Pallares, N., Al Khawli, F., Ferrer, E., & Barba, F. J. (2020). Recent advances in the application of innovative food processing technologies for mycotoxins and pesticide reduction in foods. *Trends in Food Science and Technology*, *106*, 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.018>
- Gavahian, M., & Tiwari, B. K. (2020). Moderate electric fields and ohmic heating as promising fermentation tools. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *64*, Article 102422. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102422>
- Ghasemi, J., Moradi, M., Karparvarfar, S. H., Golmakani, M. T., & Khaneghah, A. M. (2021). Thin layer drying kinetics of lemon verbena leaves: A quality assessment and mathematical modeling. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, *13*(1), 59–72. <https://doi.org/10.15586/qas.v13i1.835>
- Golberg, A., Sack, M., Teissie, J., Pataro, G., Pliquet, U., Saulis, G., Stefan, T., Miklavcic, D., Vorobiev, E., & Frey, W. (2016). Energy-efficient biomass processing with pulsed electric fields for bioeconomy and sustainable development. *Biotechnology for Biofuels*, *9*(1), Article 94. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0508-z>
- Gómez, B., Munekata, P. E. S., Gavahian, M., Barba, F. J., Martí-Quijal, F. J., Bolumar, T., Campagnol, P. C. B., Tomasevic, I., & Lorenzo, J. M. (2019). Application of pulsed electric fields in meat and fish processing industries: An overview. *Food Research International*, *123*, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.047>
- Guionet, A., Fujiwara, T., Sato, H., Takahashi, K., Takaki, K., Matsui, M., Tanino, T., & Ohshima, T. (2021). Pulsed electric fields act on tryptophan to inactivate  $\alpha$ -amylase. *Journal of Electrostatics*, *112*, Article 103597. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2021.103597>
- Guionet, A., David, F., Zaepffel, C., Coustets, M., Helmi, K., Cheype, C., Packan, D., Garnier, J. P., Blanckaert, V., & Teissie, J. (2015). *E. coli* electroirradiation on a closed loop circuit by using milli-, micro- and nanosecond pulsed electric fields: Comparison between energy costs. *Bioelectrochemistry*, *103*, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2014.08.021>
- Han, Z., Cai, M. J., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2018). Effects of electric fields and electromagnetic wave on food protein structure and functionality: A review. *Trends in Food Science and Technology*, *75*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.017>
- Heinz, V., & Toepfl, S. (2022). Pulsed electric fields industrial equipment design. In J. Raso, V. Heinz, I. Alvarez, & S. Toepfl (Eds.). *Pulsed electric fields technology for the food industry. Food engineering series* (pp. 489–504). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2_17)
- Hill, K., Ostermeier, R., Töpfl, S., & Heinz, V. (2022). Pulsed electric fields in the potato industry. In J. Raso, V. Heinz, I. Alvarez, & S. Toepfl (Eds.). *Pulsed electric fields technology for the food industry. Food engineering series* (pp. 325–335). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2_9)
- Huang, D., Men, K., Li, D., Wen, T., Gong, Z., Sunden, B., & Wu, Z. (2020). Application of ultrasound technology in the

- drying of food products. *Ultrasonics Sonochemistry*, 63, Article 104950. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104950>
- Iaccheri, E., Castagnini, J. M., Rosa, D. M., & Rocculi, P. (2021a). New insights into the glass transition of dried fruits and vegetables and the effect of pulsed electric field treatment. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67, Article 102566. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102566>
- Iaccheri, E., Castagnini, J. M., Tylewicz, U., & Rocculi, P. (2021b). Modelling the mechanical properties and sorption behaviour of pulsed electric fields treated carrots and potatoes after air drying for food chain management. *Biosystems Engineering*, 223(B), 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.09.011>
- Jacobo-Velázquez, D. A., Cuéllar-Villarreal, M. del R., Welti-Chanes, J., Cisneros-Zevallos, L., Ramos-Parra, P. A., & Hernández-Brenes, C. (2017). Nonthermal processing technologies as elicitors to induce the biosynthesis and accumulation of nutraceuticals in plant foods. *Trends in Food Science and Technology*, 60, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.10.021>
- Jacobo-Velázquez, D. A., Martínez-Hernández, G. B., Del C Rodríguez, S., Cao, C. M., & Cisneros-Zevallos, L. (2011). Plants as biofactories: Physiological role of reactive oxygen species on the accumulation of phenolic antioxidants in carrot tissue under wounding and hyperoxia stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(12), 6583–6593. <https://doi.org/10.1021/jf2006529>
- Jin, T. Z., Yu, Y., & Gurtler, J. B. (2017). Effects of pulsed electric field processing on microbial survival, quality change and nutritional characteristics of blueberries. *LWT – Food Science and Technology*, 77, 517–524. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.009>
- Kandušer, M., Belič, A., Čorović, S., & Škrjanc, I. (2017). Modular Serial Flow Through device for pulsed electric field treatment of the liquid samples. *Scientific Reports*, 7(1), Article 8115. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08620-8>
- Kempkes, M., & Munderville, M. (2018). Pulsed electric fields (ИЭП) processing of fruit and vegetables. In *21st International Conference on Pulsed Power* (Article 17580667). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PPC.2017.8291186>
- Kumar, Y., Bashir, A. A., & Indore, N., Vishwakarma, R. K., & Singh, R. K. (2021). Pulsed electric field. In C. M. Galanakis (Ed.), *Sustainable food processing and engineering challenges* (pp. 137–179). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822714-5.00005-X>
- Kwao, S., Al-Hamimi, S., Damas, M. E. V., Rasmusson, A. G., & Gómez Galindo, F. (2016). Effect of guard cells electroporation on drying kinetics and aroma compounds of Genovese basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 38(A), 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.09.011>
- Lamauskas, N., Šatkauskas, S., Bobinaite, R., & Viškelis, P. (2015). Pulsed electric field impact on *Actinidia kolomikta* drying efficiency. *Journal of Food Process Engineering*, 38(3), 243–249. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12161>
- Lammerskitten, A., Mykhailyk, V., Wiktor, A., Toepfl, S., Nowacka, M., Bialik, M., Czyżewski, J., Witrowa-Rajchert, D., & Parniakov, O. (2019a). Impact of pulsed electric fields on physical properties of freeze-dried apple tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 57, Article 102211. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102211>
- Lammerskitten, A., Shorstkii, I., Parniakov, O., Mykhailyk, V., Toepfl, S., Rybak, K., Dadan, M., Nowacka, M., & Wiktor, A. (2020). The effect of different methods of mango drying assisted by a pulsed electric field on chemical and physical properties. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(12), Article e14973. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14973>
- Lammerskitten, A., Wiktor, A., Siemer, C., Toepfl, S., Mykhailyk, V., Gondek, E., Rybak, K., Witrowa-Rajchert, D., & Parniakov, O. (2019b). The effects of pulsed electric fields on the quality parameters of freeze-dried apples. *Journal of Food Engineering*, 252, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.006>
- Lasekan, O., Ng, S., Azeez, S., Shittu, R., Teoh, L., & Gholivand, S. (2017). Effect of pulsed electric field processing on flavor and color of liquid foods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), 1–14. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12940>
- Li, J., Shi, J., Huang, X., Wang, T., Zou, X., Li, Z., Zhang, D., Zhang, W., & Xu, Y. (2020). Effects of pulsed electric field pretreatment on frying quality of fresh-cut lotus root slices. *LWT – Food Science and Technology*, 132, Article 109873. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109873>
- Li, X., Li, J., Wang, R., Rahaman, A., Zeng, X. A., & Brennan, C. S. (2021). Combined effects of pulsed electric field and ultrasound pretreatments on mass transfer and quality of mushrooms. *LWT – Food Science and Technology*, 150, Article 112008. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112008>
- Liu, C., Grimi, N., Bals, O., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2021). Effects of pulsed electric fields and preliminary vacuum drying on freezing assisted processes in potato tissue. *Food and Bioprocess Technology*, 125, 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.11.002>
- Liu, C., Grimi, N., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2018). Effects of pulsed electric fields treatment on vacuum drying of potato tissue. *LWT – Food Science and Technology*, 95, 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.090>
- Liu, C., Pirozzi, A., Ferrari, G., Vorobiev, E., & Grimi, N. (2020). Effects of pulsed electric fields on vacuum drying and quality characteristics of dried carrot. *Food and Bioprocess Technology*, 13(1), 45–52. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02364-1>
- Llavata, B., García-Pérez, J. V., Simal, S., & Cárcel, J. A. (2020). Innovative pre-treatments to enhance food drying: A current review. *Current Opinion in Food Science*, 35, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.12.001>
- López-Gámez, G., Elez-Martínez, P., Martín-Belloso, O., & Soliva-Fortuny, R. (2020). Pulsed electric fields affect endogenous enzyme activities, respiration and biosynthesis of phenolic compounds in carrots. *Postharvest Biology and Technology*, 168, Article 111284. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111284>
- López, J., Uribe, E., Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Gonzalez, E., & Di Scala, K. (2010). Effect of air temperature on drying kinetics, vitamin C, antioxidant activity, total phenolic content, non-enzymatic browning and firmness

- of blueberries variety O'Neil. *Food and Bioprocess Technology*, 3(5), 772–777. <https://doi.org/10.1007/s11947-009-0306-8>
- Lung, C. T., Chang, C. K., Cheng, F. C., Hou, C. Y., Chen, M. H., Santoso, S. P., Yudhistira, B., & Hsieh, C. W. (2022). Effects of pulsed electric field-assisted thawing on the characteristics and quality of Pekin duck meat. *Food Chemistry*, 390, Article 133137. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133137>
- Mahnič-Kalamiza, S., Vorobiev, E., & Miklavčič, D. (2014). Electroporation in food processing and biorefinery. *Journal of Membrane Biology*, 247(12), 1279–1304. <https://doi.org/10.1007/s00232-014-9737-x>
- Mannozi, C., Tylewicz, U., Tappi, S., Rosa, M. D., Rocculi, P., & Romani, S. (2020). The influence of different pre-treatments on the quality and nutritional characteristics in dried undersized yellow kiwifruit. *Applied Sciences*, 10(23), Article 8432. <https://doi.org/10.3390/app10238432>
- Masood, H., Diao, Y., Cullen, P. J., Lee, N. A., & Trujillo, F. J. (2018). A comparative study on the performance of three treatment chamber designs for radio frequency electric field processing. *Computers and Chemical Engineering*, 108, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.09.009>
- Meza-Jiménez, M., De, L., Pokhrel, P. R., Robles de la Torre, R. R., Barbosa-Canovas, G. V., & Hernández-Sánchez, H. (2019). Effect of pulsed electric fields on the activity of food-grade papain in a continuous system. *LWT – Food Science and Technology*, 109, 336–341. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.037>
- Mohamed, M., & Eissa, A. (2012). Pulsed electric fields for food processing technology. In A. Amer Eissa (Ed.). *Structure and function of food engineering* (pp. 275–306). InTech.
- Morales-de la Peña, M., Welte-Chanes, J., & Martín-Belloso, O. (2019). Novel technologies to improve food safety and quality. *Current Opinion in Food Science*, 30, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.10.009>
- Mousakhani-Ganjeh, A., Amiri, A., Nasrollahzadeh, F., Wiktor, A., Nilghaz, A., Pratap-Singh, A., & Mousavi Khaneghah, A. (2021). Electro-based technologies in food drying – A comprehensive review. *LWT – Food Science and Technology*, 145, Article 111315. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111315>
- Neri, L., Giancaterino, M., Rocchi, R., Tylewicz, U., Valbonetti, L., Faieta, M., & Pittia, P. (2021). Pulsed electric fields (ИЭП) as hot air drying pre-treatment: Effect on quality and functional properties of saffron (*Crocus sativus* L.). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67, Article 102592. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102592>
- Nguyen, T. M. C., Gavahian, M., & Tsai, P. J. (2021). Effects of ultrasound-assisted extraction (UAE), high voltage electric field (HVEF), high pressure processing (HPP), and combined methods (HVEF+UAE and HPP+UAE) on Gac leaves extraction. *LWT – Food Science and Technology*, 143, Article 111131. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111131>
- Nowacka, M., Wiktor, A., Anuszevska, A., Dadan, M., Rybak, K., & Witrowa-Rajchert, D. (2019). The application of unconventional technologies as pulsed electric field, ultrasound and microwave-vacuum drying in the production of dried cranberry snacks. *Ultrasonics Sonochemistry*, 56, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.023>
- Nowosad, K., Sujka, M., Pankiewicz, U., & Kowalski, R. (2021). The application of technology in food processing and human nutrition. *Journal of Food Science and Technology*, 58(2), 397–411. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04512-4>
- Ostermeier, R., Giersemehl, P., Siemer, C., Töpfl, S., & Jäger, H. (2018). Influence of pulsed electric field pre-treatment on the convective drying kinetics of onions. *Journal of Food Engineering*, 237, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.010>
- Ostermeier, R., Parniakov, O., Töpfl, S., & Jäger, H. (2020). Applicability of pulsed electric field (ИЭП) pre-treatment for a convective two-step drying process. *Foods*, 9(4), 9–12. <https://doi.org/10.3390/foods9040512>
- Pang, L., Lu, G., Cheng, J., Lu, X., Ma, D., Li, Q., Li, Z., Zheng, J., Zhang, C., & Pan, S. (2021). Physiological and biochemical characteristics of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) roots treated by a high voltage alternating electric field during cold storage. *Postharvest Biology and Technology*, 180, Article 111619. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111619>
- Parniakov, O., Lebovka, N. I., Bals, O., & Vorobiev, E. (2015). Effect of electric field and osmotic pre-treatments on quality of apples after freezing-thawing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 29, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.03.011>
- Parniakov, O., Lebovka, N. I., Van Hecke, E., & Vorobiev, E. (2014). Pulsed electric field assisted pressure extraction and solvent extraction from mushroom (*Agaricus bisporus*). *Food and Bioprocess Technology*, 7(1), 174–183. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1059-y>
- Parniakov, O., Bals, O., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2016). Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 35, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.04.002>
- Pataro, G., & Ferrari, G. (2020). Limitations of pulsed electric field utilization in food industry. In F. J. Barba, O. Parniakov, & A. Wiktor (Eds.). *Pulsed electric fields to obtain healthier and sustainable food for tomorrow* (pp. 283–310). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816402-0.00013-6>
- Patel, S. M., Jameel, F., Sane, S. U., & Kamat, M. (2015). Lyophilization process design and development using QbD principles. In F. Jameel, S. Hershenson, M. Khan, & S. Martin-Moe (Eds.). *Quality by design for biopharmaceutical drug product development* (vol. 18, pp. 303–329). Springer Science. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2316-8\\_14](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2316-8_14)
- Pereira, R. N., Galindo, F. G., Vicente, A. A., & Dejmek, P. (2009). Effects of pulsed electric field on the viscoelastic properties of potato tissue. *Food Biophysics*, 4(3), 229–239. <https://doi.org/10.1007/s11483-009-9120-0>
- Rahaman, A., Siddeeg, A., Manzoor, M. F., Zeng, X. A., Ali, S., Baloch, Z., Li, J., & Wen, Q. H. (2019). Impact of pulsed electric field treatment on drying kinetics, mass transfer, colour parameters and microstructure of plum. *Journal of*

- Food Science and Technology*, 56(5), 2670–2678. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03755-0>
- Raso, J., Frey, W., Ferrari, G., Pataro, G., Knorr, D., Teissie, J., & Miklavčič, D. (2016). Recommendations guidelines on the key information to be reported in studies of application of technology in food and biotechnological processes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 37, 312–321. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.08.003>
- Rybak, K., Samborska, K., Jedlinska, A., Parniak, O., Nowacka, M., Witrowa-Rajchert, D., & Wiktor, A. (2020). The impact of pulsed electric field pretreatment of bell pepper on the selected properties of spray dried juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 65, Article 102446. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102446>
- Sack, M., Eing, C., Berghöfer, T., Buth, L., Stängle, R., Frey, W., & Bluhm, H. (2008). Electroporation-assisted dewatering as an alternative method for drying plants. *Transactions on Plasma Science*, 36(3), 2577–2585. <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.2002440>
- Salehi, F. (2020). Physico-chemical properties of fruit and vegetable juices as affected by pulsed electric field: A review. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 1036–1050. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1775250>
- Saletnik, B., Zagula, G., Aneta, S., Marcin, B., Ewelina, S., & Czesław, P. (2022). Effect of magnetic and electrical fields on yield, shelf life and quality of fruits. *Applied Sciences*, 12(6), Article 3183. <https://doi.org/10.3390/app12063183>
- Sampedro, F., McAloon, A., Yee, W., Fan, X., Zhang, H. Q., & Geveke, D. J. (2013). Cost analysis of commercial pasteurization of orange juice by pulsed electric fields. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 17, 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.10.002>
- Sánchez-Vega, R., Elez-Martínez, P., & Martín-Belloso, O. (2014). Effects of high-intensity pulsed electric fields processing parameters on the chlorophyll content and its degradation compounds in broccoli juice. *Food and Bioprocess Technology*, 7(4), 1137–1148. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1152-2>
- Schottroff, F., Johnson, K., Johnson, N. B., Bédard, M. F., & Jaeger, H. (2020). Challenges and limitations for the decontamination of high solids protein solutions at neutral pH using pulsed electric fields. *Journal of Food Engineering*, 268, Article 109737. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109737>
- Shorstkii, I., Sosnin, M., Smetana, S., Toepfl, S., Parniak, O., & Wiktor, A. (2022). Correlation of the cell disintegration index with Luikov's heat and mass transfer parameters for drying of pulsed electric field (ИЭП) pretreated plant materials. *Journal of Food Engineering*, 316, Article 110822. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110822>
- Singh, M., Patra, S., & Rajesh, K. S. (2021). Common techniques and methods for screening of natural products for developing of anticancer drugs. In A. K. Srivastava, V. K. Kannaujia, R. K. Singh, & D. Singh (Eds.). *Evolutionary diversity as a source for anticancer molecules* (pp. 323–353). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821710-8.00015-1>
- Sulaimana, A. S., Chang, C.-K., Hou, C.-Y., Yudhistira, B., Punthi, F., Lung, C.-T., Cheng, K.-C., Santoso, S. P., & Hsieh, C.-W. (2021). Effect of oxidative stress on physicochemical quality of Taiwanese seagrape (*Caulerpa lentillifera*) with the application of alternating current electric field (ACEF) during post-harvest storage. *Processes*, 9(6), Article 1011. <https://doi.org/10.3390/pr9061011>
- Sun, J., Bai, W., Zhang, Y., Liao, X., & Hu, X. (2011). Effects of electrode materials on the degradation, spectral characteristics, visual colour, and antioxidant capacity of cyanidin-3-glucoside and cyanidin-3-sophoroside during pulsed electric field treatment. *Food Chemistry*, 128(3), 742–747. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.099>
- Sun, T., & Ling, F. (2021). Optimization method of microwave drying process parameters for rice. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 13(3), 10–20. <https://doi.org/10.15586/qas.v13i3.917>
- Tamer, C., Isci, A., Kutlu, N., Sakiyan, O., Sahin, S., & Sumnu, G. (2016). Effect of drying on porous characteristics of orange peel. *International Journal of Food Engineering*, 12(9), 921–928. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2016-0075>
- Tanino, T., Hirotsawa, M., Moteki, R., Matsui, M., & Ohshima, T. (2020). Engineering of pulsed electric field treatment using carbon materials as electrode and application to pasteurization of sake. *Journal of Electrostatics*, 104, Article 103424. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103424>
- Telfser, A., & Galindo, F. G. (2019). Effect of reversible permeabilization in combination with different drying methods on the structure and sensorial quality of dried basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves. *LWT – Food Science and Technology*, 99, 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.062>
- Terefe, N. S., Buckow, R., & Versteeg, C. (2015). Quality-related enzymes in plant-based products: Effects of novel food processing technologies part 2: Pulsed electric field processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(1), 1–5. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.701253>
- Timmermans, R. A. H., Mastwijk, H. C., Berendsen, L. B. J. M., Nederhoff, A. L., Matser, A. M., Van Boekel, M. A. J. S., & Nierop Groot, M. N. (2019). Moderate intensity Pulsed Electric Fields as alternative mild preservation technology for fruit juice. *International Journal of Food Microbiology*, 298, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2019.02.015>
- Toepfl, S., & Knorr, D. (2006). Pulsed electric fields as a pretreatment technique in drying processes. *Stewart Postharvest Review*, 4(3), 1–6. <https://doi.org/10.2212/spr.2006.4.3>
- Toepfl, S., Siemer, C., Saldaña-Navarro, G., & Heinz, V. (2014). Overview of pulsed electric fields processing for food. In D.-W. Sun (Ed.). *Emerging technologies for food processing* (2nd ed., pp. 93–114). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-411479-1.00006-1>
- Tomasi, J. D. C., De Lima, G. G., Wendling, I., Helm, C. V., Hansel, F. A., De Godoy, R. C. B., Grunennvaldt, R. L., De Melo, T. O., Tomazzoli, M. M., & Deschamps, C. (2021). Effects of different drying methods on the chemical, nutritional and colour of yerba mate (*Ilex paraguariensis*)

- leaves. *International Journal of Food Engineering*, 17(7), 551–560. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2020-0312>
- Tylewicz, U., Mannozi, C., Castagnini, J. M., Genovese, J., Romani, S., Rocculi, P., & Rosa, M. D. (2022). Application of ИЭП- and OD-assisted drying for kiwifruit waste valorisation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, Article 102952. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102952>
- Tylewicz, U., Tappi, S., Mannozi, C., Romani, S., Dellarosa, N., Laghi, L., Ragni, L., Rocculi, P., & Dalla Rosa, M. (2017). Effect of pulsed electric field (ИЭП) pre-treatment coupled with osmotic dehydration on physico-chemical characteristics of organic strawberries. *Journal of Food Engineering*, 213, 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.028>
- Vaessen, E. M. J., Timmermans, R. A. H., Tempelaars, M. H., Schutyser, M. A. I., & den Besten, H. M. W. (2019). Reversibility of membrane permeabilization upon pulsed electric field treatment in *Lactobacillus plantarum* WCFS1. *Scientific Reports*, 9(1), Article 19990. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56299-w>
- Van Wyk, S., Silva, F. V. M., & Farid, M. M. (2019). Pulsed electric field treatment of red wine: Inactivation of *Brettanomyces* and potential hazard caused by metal ion dissolution. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.11.001>
- Voda, A., Homan, N., Witek, M., Duijster, A., van Dalen, G., van der Sman, R., Nijssse, J., van Vliet, L., Van As, H., & van Duynhoven, J. (2012). The impact of freeze-drying on microstructure and rehydration properties of carrot. *Food Research International*, 49(2), 687–693. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.08.019>
- Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2019). Pulsed electric field in green processing and preservation of food products. In F. Chemat, E. Vorobiev (Eds.). *Green food processing techniques* (pp. 403–430). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815353-6.00015-x>
- Waghmare, R. (2021). Refractance window drying: A cohort review on quality characteristics. *Trends in Food Science and Technology*, 110(50), 652–662. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.030>
- Wang, Q., Li, Y., Sun, D. W., & Zhu, Z. (2018). Enhancing food processing by pulsed and high voltage electric fields: Principles and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(13), 2285–2298. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1434609>
- Wiktor, A., Dadan, M., Nowacka, M., Rybak, K., & Witrowa-Rajchert, D. (2019). The impact of combination of pulsed electric field and ultrasound treatment on air drying kinetics and quality of carrot tissue. *LWT – Food Science and Technology*, 110, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.060>
- Wiktor, A., Gondek, E., Jakubczyk, E., Dadan, M., Nowacka, M., Rybak, K., & Witrowa-Rajchert, D. (2018). Acoustic and mechanical properties of carrot tissue treated by pulsed electric field, ultrasound and combination of both. *Journal of Food Engineering*, 238, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.06.001>
- Wiktor, A., Iwaniuk, M., Śledź, M., Nowacka, M., Chudoba, T., & Witrowa-Rajchert, D. (2013). Drying kinetics of apple tissue treated by pulsed electric field. *Drying Technology*, 31(1), 112–119. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.724128>
- Wiktor, A., Lammerskitten, A., Barba, F. J., Michalski, M., Toepfl, S., & Parniakov, O. (2021). Drying processes assisted by ИЭП for plant-based materials. In K. Knoerzer, K. Muthukumarappan (Eds.). *Innovative food processing technologies: A comprehensive review* (pp. 272–275). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815781-7.00001-9>
- Wiktor, A., Nowacka, M., Dadan, M., Rybak, K., Lojkowski, W., Chudoba, T., & Witrowa-Rajchert, D. (2016). The effect of pulsed electric field on drying kinetics, color, and microstructure of carrot. *Drying Technology*, 34(11), 1286–1296. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1105813>
- Wiktor, A., Sledz, M., Nowacka, M., Rybak, K., Chudoba, T., Lojkowski, W., & Witrowa-Rajchert, D. (2015). The impact of pulsed electric field treatment on selected bioactive compound content and color of plant tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 30, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.04.004>
- Wiktor, A., & Witrowa-Rajchert, D. (2016). Pulsed electric fields as pretreatment for subsequent food process operations. In D. Miklavcic (Ed.). *Handbook of electroporation* (pp. 1–16). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-26779-1\\_178-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26779-1_178-1)
- Won, Y. C., Min, S. C., & Lee, D. U. (2015). Accelerated drying and improved color properties of red pepper by pretreatment of pulsed electric fields. *Drying Technology*, 33(8), 926–932. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.999371>
- Wu, Y., & Zhang, D. (2019). Pulsed electric field enhanced freeze-drying of apple tissue. *Czech Journal of Food Sciences*, 37(6), 432–438. <https://doi.org/10.17221/230/2018-CJFS>
- Yamakage, K., Yamada, T., Takahashi, K., Takaki, K., Komuro, M., Sasaki, K., Aoki, H., Kamagata, J., Koide, S., & Orikasa, T. (2021). Impact of pre-treatment with pulsed electric field on drying rate and changes in spinach quality during hot air drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 68, Article 102615. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102615>
- Yu, Y., Jin, T. Z., & Xiao, G. (2017). Effects of pulsed electric fields pretreatment and drying method on drying characteristics and nutritive quality of blueberries. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(6), Article e13303. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13303>
- Zderic, A., & Zondervan, E. (2016). Polyphenol extraction from fresh tea leaves by pulsed electric field: A study of mechanisms. *Chemical Engineering Research and Design*, 109, 586–592. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.03.010>
- Zderic, A., Zondervan, E., & Meuldijk, J. (2013). Breakage of cellular tissue by pulsed electric field: Extraction of polyphenols from fresh tea leaves. *Chemical Engineering Transactions*, 32, 1795–1800. <https://doi.org/10.3303/CET1332300>
- Zhang, C., Yang, Y. H., Zhao, X. D., Zhang, L., Li, Q., Wu, C., Ding, X., & Qian, J. Y. (2021). Assessment of impact of pulsed electric field on functional, rheological and structural

- properties of vital wheat gluten. *LWT – Food Science and Technology*, 147, Article 111536. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111536>
- Zhang, S., Sun, L., Ju, H., Bao, Z., Zeng, X., & Lin, S. (2021). Research advances and application of pulsed electric field on proteins and peptides in food. *Food Research International*, 139(1), Article 109914. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109914>
- Zhang, Z. H., Wang, L. H., Zeng, X. A., Han, Z., & Brennan, C. S. (2019). Non-thermal technologies and its current and future application in the food industry: A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(1), 1–13. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13903>
- Zhang, Z. H., Zeng, X. A., Brennan, C. S., Brennan, M., Han, Z., & Xiong, X. Y. (2015). Effects of pulsed electric fields (ИЭП) on vitamin C and its antioxidant properties. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(10), 24159–24173. <https://doi.org/10.3390/ijms161024159>
- Zhang, Z., Zhang, B., Yang, R., & Zhao, W. (2020). Recent developments in the preservation of raw fresh food by pulsed electric field. *Food Reviews International*, 38(1), 247–265. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1860083>
- Zhao, W., Yang, R., & Zhang, H. Q. (2012). Recent advances in the action of pulsed electric fields on enzymes and food component proteins. *Trends in Food Science and Technology*, 27(2), 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.05.007>

## REFERENCES

- Al-Sayed, L., Boy, V., Madieta, E., Mehinagic, E., & Lanoisellé, J.-L. (2018). Pulsed electric fields (ИЭП) as pre-treatment for freeze-drying of plant tissues. In *IDS'2018: 21st international drying symposium* (pp. 11–14). València, Spain. <https://doi.org/10.4995/ids2018.2018.7484>
- Alam, M. R., Lyng, J. G., Frontuto, D., Marra, F., & Cinquanta, L. (2018). Effect of pulsed electric field pretreatment on drying kinetics, color, and texture of parsnip and carrot. *Journal of Food Science*, 83(8), 2159–2166. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14216>
- Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Munir, A., Buntat, Z., Ahmad, M. H., Jusoh, Y. M. M., Bekhit, A. E. D., Roobab, U., Manzoor, M. F., & Aadil, R. M. (2020). Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: An engineering perspective. *Trends in Food Science and Technology*, 104, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.008>
- Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Roobab, U., Munir, M. A., Naderipour, A., Qureshi, M. I., El-Din Bekhit, A., Liu, Z. W., & Aadil, R. M. (2021). Pulsed electric field: A potential alternative towards a sustainable food processing. *Trends in Food Science and Technology*, 111, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.041>
- Barba, F. J., Parniakov, O., Pereira, S. A., Wiktor, A., Grimi, N., Boussetta, N., Saraiva, J. A., Raso, J., Martin-Belloso, O., Witrowa-Rajchert, D., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2015). Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food Research International*, 77(4), 773–798. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.015>
- Bobinaitė, R., Pataro, G., Lamanauskas, N., Šatkauskas, S., Viškelis, P., & Ferrari, G. (2015). Application of pulsed electric field in the production of juice and extraction of bioactive compounds from blueberry fruits and their by-products. *Journal of Food Science and Technology*, 52(9), 5898–5905. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1668-0>
- Bozkir, H. (2020). Effects of hot air, vacuum infrared, and vacuum microwave dryers on the drying kinetics and quality characteristics of orange slices. *Journal of Food Process Engineering*, 43(10), Article e13485. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13485>
- Buchmann, L., & Mathys, A. (2019). Perspective on pulsed electric field treatment in the bio-based industry. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, Article 00265. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00265>
- Chauhan, O. P., Sayanfar, S., & Toepfl, S. (2018). Effect of pulsed electric field on texture and drying time of apple slices. *Journal of Food Science and Technology*, 55(6), 2251–2258. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3142-x>
- Chen, B., Chang, C., Cheng, K., Hou, C., Lin, J., Chen, M., Permatasari, S., Chen, C., & Hsieh, C. (2022). Using the response surface methodology to establish the optimal conditions for preserving bananas (*Musa acuminata*) in a pulsed electric field and to decrease browning induced by storage at a low temperature. *Food Packaging and Shelf Life*, 31, Article 100804. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100804>
- Chen, B. R., Wang, Z. M., Lin, J. W., Wen, Q. H., Xu, F. Y., Li, J., Wang, R., & Zeng, X. A. (2022). Improving emulsification performance of waxy maize starch by esterification combined with pulsed electric field. *Food Hydrocolloids*, 129, Article 107655. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107655>
- Dalvi-Isfahan, M., Hamdami, N., Le-Bail, A., & Xanthakis, E. (2016). The principles of high voltage electric field and its application in food processing: A review. *Food Research International*, 89(1), 48–62. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.09.002>
- Dellarosa, N., Tappi, S., Ragni, L., Laghi, L., Rocculi, P., & Dalla Rosa, M. (2016). Metabolic response of fresh-cut apples induced by pulsed electric fields. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 38(B), 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.06.016>
- Demir, E., Dymek, K., & Galindo, F. G. (2018). Technology allowing baby spinach leaves to acquire freezing tolerance. *Food and Bioprocess Technology*, 11(4), 809–817. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-2044-7>
- Devkota, L., He, L., Bittencourt, C., Midgley, J., & Haritos, V. S. (2022). Thermal and pulsed electric field assisted hydration of common beans. *LWT – Food Science and Technology*, 158, Article 113163. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113163>

- Dhua, S., Kumar, K., Sharanagat, V. S., & Nema, P. K. (2022). Bioactive compounds and its optimization from food waste: Review on novel extraction techniques. *Nutrition and Food Science*, 52(8), 1270–1288. <https://doi.org/10.1108/NFS-12-2021-0373>
- El Kantar, S., Boussetta, N., Lebovka, N., Foucart, F., Rajha, H. N., Maroun, R. G., Louka, N., & Vorobiev, E. (2018). Pulsed electric field treatment of citrus fruits: Improvement of juice and polyphenols extraction. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 46, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.09.024>
- Fauster, T., Schlossnikl, D., Rath, F., Ostermeier, R., Teufel, F., Toepfl, S., & Jaeger, H. (2018). Impact of pulsed electric field pretreatment on process performance of industrial French fries production. *Journal of Food Engineering*, 235, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.04.023>
- Ferreira-Holderbaum, D., Kon, T., Kudo, T., & Pedro Guerra, M. (2010). Enzymatic browning, polyphenol oxidase activity, and polyphenols in four apple cultivars: Dynamics during fruit development. *HortScience*, 45(8), 1150–1154. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.8.1150>
- Gamboa-Santos, J., Megías-Pérez, R., Soria, A. C., Olano, A., Montilla, A., & Villamiel, M. (2014). Impact of processing conditions on the kinetic of vitamin C degradation and 2-furoylmethyl amino acid formation in dried strawberries. *Food Chemistry*, 153, 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.12.004>
- Gavahian, M., Chu, Y. H., & Sastry, S. (2018). Extraction from food and natural products by moderate electric field: Mechanisms, benefits, and potential industrial applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(4), 1040–1052. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12362>
- Gavahian, M., & Farahnaky, A. (2018). Ohmic-assisted hydrodistillation technology: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 72, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.12.014>
- Gavahian, M., Pallares, N., Al Khawli, F., Ferrer, E., & Barba, F. J. (2020). Recent advances in the application of innovative food processing technologies for mycotoxins and pesticide reduction in foods. *Trends in Food Science and Technology*, 106, 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.018>
- Gavahian, M., & Tiwari, B. K. (2020). Moderate electric fields and ohmic heating as promising fermentation tools. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 64, Article 102422. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102422>
- Ghasemi, J., Moradi, M., Karparvarfard, S. H., Golmakani, M. T., & Khaneghah, A. M. (2021). Thin layer drying kinetics of lemon verbena leaves: A quality assessment and mathematical modeling. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 13(1), 59–72. <https://doi.org/10.15586/qas.v13i1.835>
- Golberg, A., Sack, M., Teissie, J., Pataro, G., Pliquet, U., Saulis, G., Stefan, T., Miklavcic, D., Vorobiev, E., & Frey, W. (2016). Energy-efficient biomass processing with pulsed electric fields for bioeconomy and sustainable development. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1), Article 94. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0508-z>
- Gómez, B., Muneke, P. E. S., Gavahian, M., Barba, F. J., Martí-Quijal, F. J., Bolumar, T., Campagnol, P. C. B., Tomasevic, I., & Lorenzo, J. M. (2019). Application of pulsed electric fields in meat and fish processing industries: An overview. *Food Research International*, 123, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.047>
- Guionet, A., Fujiwara, T., Sato, H., Takahashi, K., Takaki, K., Matsui, M., Tanino, T., & Ohshima, T. (2021). Pulsed electric fields act on tryptophan to inactivate  $\alpha$ -amylase. *Journal of Electrostatics*, 112, Article 103597. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2021.103597>
- Guionet, A., David, F., Zaepffel, C., Coustets, M., Helmi, K., Cheyde, C., Packan, D., Garnier, J. P., Blanckaert, V., & Teissie, J. (2015). *E. coli* electroeradication on a closed loop circuit by using milli-, micro- and nanosecond pulsed electric fields: Comparison between energy costs. *Bioelectrochemistry*, 103, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2014.08.021>
- Han, Z., Cai, M. J., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2018). Effects of electric fields and electromagnetic wave on food protein structure and functionality: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 75, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.017>
- Heinz, V., & Toepfl, S. (2022). Pulsed electric fields industrial equipment design. In J. Raso, V. Heinz, I. Alvarez, & S. Toepfl (Eds.). *Pulsed electric fields technology for the food industry. Food engineering series* (pp. 489–504). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2_17)
- Hill, K., Ostermeier, R., Töpfl, S., & Heinz, V. (2022). Pulsed electric fields in the potato industry. In J. Raso, V. Heinz, I. Alvarez, & S. Toepfl (Eds.). *Pulsed electric fields technology for the food industry. Food engineering series* (pp. 325–335). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2_9)
- Huang, D., Men, K., Li, D., Wen, T., Gong, Z., Sunden, B., & Wu, Z. (2020). Application of ultrasound technology in the drying of food products. *Ultrasonics Sonochemistry*, 63, Article 104950. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104950>
- Iaccheri, E., Castagnini, J. M., Rosa, D. M., & Rocculi, P. (2021a). New insights into the glass transition of dried fruits and vegetables and the effect of pulsed electric field treatment. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67, Article 102566. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102566>
- Iaccheri, E., Castagnini, J. M., Tylewicz, U., & Rocculi, P. (2021b). Modelling the mechanical properties and sorption behaviour of pulsed electric fields treated carrots and potatoes after air drying for food chain management. *Biosystems Engineering*, 223(B), 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.09.011>
- Jacobo-Velázquez, D. A., Cuéllar-Villarreal, M. del R., Welti-Chanes, J., Cisneros-Zevallos, L., Ramos-Parra, P. A., & Hernández-Brenes, C. (2017). Nonthermal processing technologies as elicitors to induce the biosynthesis and accumulation of nutraceuticals in plant foods. *Trends in Food Science and Technology*, 60, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.10.021>
- Jacobo-Velázquez, D. A., Martínez-Hernández, G. B., Del C Rodríguez, S., Cao, C. M., & Cisneros-Zevallos, L. (2011). Plants as biofactories: Physiological role of reactive oxygen species on the accumulation of phenolic antioxidants in carrot tissue under wounding and hyperoxia stress. *Journal*

- of *Agricultural and Food Chemistry*, 59(12), 6583–6593. <https://doi.org/10.1021/jf2006529>
- Jin, T. Z., Yu, Y., & Gurtler, J. B. (2017). Effects of pulsed electric field processing on microbial survival, quality change and nutritional characteristics of blueberries. *LWT – Food Science and Technology*, 77, 517–524. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.009>
- Kandušer, M., Belič, A., Čorović, S., & Škrjanc, I. (2017). Modular Serial Flow Through device for pulsed electric field treatment of the liquid samples. *Scientific Reports*, 7(1), Article 8115. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08620-8>
- Kempkes, M., & Munderville, M. (2018). Pulsed electric fields (ИЭП) processing of fruit and vegetables. In *21st International Conference on Pulsed Power* (Article 17580667). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PPC.2017.8291186>
- Kumar, Y., Bashir, A. A., & Indore, N., Vishwakarma, R. K., & Singh, R. K. (2021). Pulsed electric field. In C. M. Galanakis (Ed.), *Sustainable food processing and engineering challenges* (pp. 137–179). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822714-5.00005-X>
- Kwao, S., Al-Hamimi, S., Damas, M. E. V., Rasmusson, A. G., & Gómez Galindo, F. (2016). Effect of guard cells electroporation on drying kinetics and aroma compounds of Genovese basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 38(A), 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.09.011>
- Lamanauskas, N., Šatkauskas, S., Bobinaite, R., & Viškelis, P. (2015). Pulsed electric field impact on *Actinidia kolomikta* drying efficiency. *Journal of Food Process Engineering*, 38(3), 243–249. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12161>
- Lammerskitten, A., Mykhailyk, V., Wiktor, A., Toepfl, S., Nowacka, M., Bialik, M., Czyżewski, J., Witrowa-Rajchert, D., & Parniakov, O. (2019a). Impact of pulsed electric fields on physical properties of freeze-dried apple tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 57, Article 102211. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102211>
- Lammerskitten, A., Shorstkii, I., Parniakov, O., Mykhailyk, V., Toepfl, S., Rybak, K., Dadan, M., Nowacka, M., & Wiktor, A. (2020). The effect of different methods of mango drying assisted by a pulsed electric field on chemical and physical properties. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(12), Article e14973. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14973>
- Lammerskitten, A., Wiktor, A., Siemer, C., Toepfl, S., Mykhailyk, V., Gondek, E., Rybak, K., Witrowa-Rajchert, D., & Parniakov, O. (2019b). The effects of pulsed electric fields on the quality parameters of freeze-dried apples. *Journal of Food Engineering*, 252, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.006>
- Lasekan, O., Ng, S., Azeez, S., Shittu, R., Teoh, L., & Gholivand, S. (2017). Effect of pulsed electric field processing on flavor and color of liquid foods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), 1–14. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12940>
- Li, J., Shi, J., Huang, X., Wang, T., Zou, X., Li, Z., Zhang, D., Zhang, W., & Xu, Y. (2020). Effects of pulsed electric field pretreatment on frying quality of fresh-cut lotus root slices. *LWT – Food Science and Technology*, 132, Article 109873. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109873>
- Li, X., Li, J., Wang, R., Rahaman, A., Zeng, X. A., & Brennan, C. S. (2021). Combined effects of pulsed electric field and ultrasound pretreatments on mass transfer and quality of mushrooms. *LWT – Food Science and Technology*, 150, Article 112008. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112008>
- Liu, C., Grimi, N., Bals, O., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2021). Effects of pulsed electric fields and preliminary vacuum drying on freezing assisted processes in potato tissue. *Food and Bioprocess Processing*, 125, 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.11.002>
- Liu, C., Grimi, N., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2018). Effects of pulsed electric fields treatment on vacuum drying of potato tissue. *LWT – Food Science and Technology*, 95, 289–294. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.090>
- Liu, C., Pirozzi, A., Ferrari, G., Vorobiev, E., & Grimi, N. (2020). Effects of pulsed electric fields on vacuum drying and quality characteristics of dried carrot. *Food and Bioprocess Technology*, 13(1), 45–52. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02364-1>
- Llavata, B., García-Pérez, J. V., Simal, S., & Cárcel, J. A. (2020). Innovative pre-treatments to enhance food drying: A current review. *Current Opinion in Food Science*, 35, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.12.001>
- López-Gámez, G., Elez-Martínez, P., Martín-Belloso, O., & Soliva-Fortuny, R. (2020). Pulsed electric fields affect endogenous enzyme activities, respiration and biosynthesis of phenolic compounds in carrots. *Postharvest Biology and Technology*, 168, Article 111284. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111284>
- López, J., Uribe, E., Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Gonzalez, E., & Di Scala, K. (2010). Effect of air temperature on drying kinetics, vitamin C, antioxidant activity, total phenolic content, non-enzymatic browning and firmness of blueberries variety O’Neil. *Food and Bioprocess Technology*, 3(5), 772–777. <https://doi.org/10.1007/s11947-009-0306-8>
- Lung, C. T., Chang, C. K., Cheng, F. C., Hou, C. Y., Chen, M. H., Santoso, S. P., Yudhistira, B., & Hsieh, C. W. (2022). Effects of pulsed electric field-assisted thawing on the characteristics and quality of Pekin duck meat. *Food Chemistry*, 390, Article 133137. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133137>
- Mahnič-Kalamiza, S., Vorobiev, E., & Miklavčič, D. (2014). Electroporation in food processing and biorefinery. *Journal of Membrane Biology*, 247(12), 1279–1304. <https://doi.org/10.1007/s00232-014-9737-x>
- Mannozi, C., Tylewicz, U., Tappi, S., Rosa, M. D., Rocculi, P., & Romani, S. (2020). The influence of different pre-treatments on the quality and nutritional characteristics in dried undersized yellow kiwifruit. *Applied Sciences*, 10(23), Article 8432. <https://doi.org/10.3390/app10238432>
- Masood, H., Diao, Y., Cullen, P. J., Lee, N. A., & Trujillo, F. J. (2018). A comparative study on the performance of three treatment chamber designs for radio frequency electric field processing. *Computers and Chemical Engineering*, 108, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.09.009>
- Meza-Jiménez, M., De, L., Pokhrel, P. R., Robles de la Torre, R. R., Barbosa-Canovas, G. V., & Hernández-Sánchez, H. (2019).

- Effect of pulsed electric fields on the activity of food-grade papain in a continuous system. *LWT – Food Science and Technology*, 109, 336–341. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.037>
- Mohamed, M., & Eissa, A. (2012). Pulsed electric fields for food processing technology. In A. Amer Eissa (Ed.). *Structure and function of food engineering* (pp. 275–306). InTech.
- Morales-de la Peña, M., Welte-Chanes, J., & Martín-Belloso, O. (2019). Novel technologies to improve food safety and quality. *Current Opinion in Food Science*, 30, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.10.009>
- Mousakhani-Ganjeh, A., Amiri, A., Nasrollahzadeh, F., Wiktor, A., Nilghaz, A., Pratap-Singh, A., & Mousavi Khaneghah, A. (2021). Electro-based technologies in food drying – A comprehensive review. *LWT – Food Science and Technology*, 145, Article 111315. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111315>
- Neri, L., Giancaterino, M., Rocchi, R., Tylewicz, U., Valbonetti, L., Faieta, M., & Pittia, P. (2021). Pulsed electric fields (ИЭП) as hot air drying pre-treatment: Effect on quality and functional properties of saffron (*Crocus sativus* L.). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67, Article 102592. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102592>
- Nguyen, T. M. C., Gavahian, M., & Tsai, P. J. (2021). Effects of ultrasound-assisted extraction (UAE), high voltage electric field (HVEF), high pressure processing (HPP), and combined methods (HVEF+UAE and HPP+UAE) on Gac leaves extraction. *LWT – Food Science and Technology*, 143, Article 111131. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111131>
- Nowacka, M., Wiktor, A., Anuszevska, A., Dadan, M., Rybak, K., & Witrowa-Rajchert, D. (2019). The application of unconventional technologies as pulsed electric field, ultrasound and microwave-vacuum drying in the production of dried cranberry snacks. *Ultrasonics Sonochemistry*, 56, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.023>
- Nowosad, K., Sujka, M., Pankiewicz, U., & Kowalski, R. (2021). The application of technology in food processing and human nutrition. *Journal of Food Science and Technology*, 58(2), 397–411. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04512-4>
- Ostermeier, R., Giersemehl, P., Siemer, C., Töpfl, S., & Jäger, H. (2018). Influence of pulsed electric field pre-treatment on the convective drying kinetics of onions. *Journal of Food Engineering*, 237, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.010>
- Ostermeier, R., Parniakov, O., Töpfl, S., & Jäger, H. (2020). Applicability of pulsed electric field (ИЭП) pre-treatment for a convective two-step drying process. *Foods*, 9(4), 9–12. <https://doi.org/10.3390/foods9040512>
- Pang, L., Lu, G., Cheng, J., Lu, X., Ma, D., Li, Q., Li, Z., Zheng, J., Zhang, C., & Pan, S. (2021). Physiological and biochemical characteristics of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) roots treated by a high voltage alternating electric field during cold storage. *Postharvest Biology and Technology*, 180, Article 111619. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111619>
- Parniakov, O., Lebovka, N. I., Bals, O., & Vorobiev, E. (2015). Effect of electric field and osmotic pre-treatments on quality of apples after freezing-thawing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 29, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.03.011>
- Parniakov, O., Lebovka, N. I., Van Hecke, E., & Vorobiev, E. (2014). Pulsed electric field assisted pressure extraction and solvent extraction from mushroom (*Agaricus bisporus*). *Food and Bioprocess Technology*, 7(1), 174–183. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1059-y>
- Parniakov, O., Bals, O., Lebovka, N., & Vorobiev, E. (2016). Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 35, 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.04.002>
- Pataro, G., & Ferrari, G. (2020). Limitations of pulsed electric field utilization in food industry. In F. J. Barba, O. Parniakov, & A. Wiktor (Eds.). *Pulsed electric fields to obtain healthier and sustainable food for tomorrow* (pp. 283–310). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816402-0.00013-6>
- Patel, S. M., Jameel, F., Sane, S. U., & Kamat, M. (2015). Lyophilization process design and development using QbD principles. In F. Jameel, S. Hershenson, M. Khan, & S. Martin-Moe (Eds.). *Quality by design for biopharmaceutical drug product development* (vol. 18, pp. 303–329). Springer Science. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2316-8\\_14](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2316-8_14)
- Pereira, R. N., Galindo, F. G., Vicente, A. A., & Dejmek, P. (2009). Effects of pulsed electric field on the viscoelastic properties of potato tissue. *Food Biophysics*, 4(3), 229–239. <https://doi.org/10.1007/s11483-009-9120-0>
- Rahaman, A., Siddeeg, A., Manzoor, M. F., Zeng, X. A., Ali, S., Baloch, Z., Li, J., & Wen, Q. H. (2019). Impact of pulsed electric field treatment on drying kinetics, mass transfer, colour parameters and microstructure of plum. *Journal of Food Science and Technology*, 56(5), 2670–2678. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03755-0>
- Raso, J., Frey, W., Ferrari, G., Pataro, G., Knorr, D., Teissie, J., & Miklavčič, D. (2016). Recommendations guidelines on the key information to be reported in studies of application of technology in food and biotechnological processes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 37, 312–321. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.08.003>
- Rybak, K., Samborska, K., Jedlinska, A., Parniakov, O., Nowacka, M., Witrowa-Rajchert, D., & Wiktor, A. (2020). The impact of pulsed electric field pretreatment of bell pepper on the selected properties of spray dried juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 65, Article 102446. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102446>
- Sack, M., Eing, C., Berghöfer, T., Buth, L., Stängle, R., Frey, W., & Bluhm, H. (2008). Electroporation-assisted dewatering as an alternative method for drying plants. *Transactions on Plasma Science*, 36(3), 2577–2585. <https://doi.org/10.1109/TPS.2008.2002440>
- Salehi, F. (2020). Physico-chemical properties of fruit and vegetable juices as affected by pulsed electric field: A review. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 1036–1050. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1775250>
- Saletnik, B., Zagula, G., Aneta, S., Marcin, B., Ewelina, S., & Czesław, P. (2022). Effect of magnetic and electrical fields

- on yield, shelf life and quality of fruits. *Applied Sciences*, 12(6), Article 3183. <https://doi.org/10.3390/app12063183>
- Sampedro, F., McAloon, A., Yee, W., Fan, X., Zhang, H. Q., & Geveke, D. J. (2013). Cost analysis of commercial pasteurization of orange juice by pulsed electric fields. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 17, 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.10.002>
- Sánchez-Vega, R., Elez-Martínez, P., & Martín-Belloso, O. (2014). Effects of high-intensity pulsed electric fields processing parameters on the chlorophyll content and its degradation compounds in broccoli juice. *Food and Bioprocess Technology*, 7(4), 1137–1148. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1152-2>
- Schottroff, F., Johnson, K., Johnson, N. B., Bédard, M. F., & Jaeger, H. (2020). Challenges and limitations for the decontamination of high solids protein solutions at neutral pH using pulsed electric fields. *Journal of Food Engineering*, 268, Article 109737. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109737>
- Shorstkii, I., Sosnin, M., Smetana, S., Toepfl, S., Parniakov, O., & Wiktor, A. (2022). Correlation of the cell disintegration index with Luikov's heat and mass transfer parameters for drying of pulsed electric field (ИЭП) pretreated plant materials. *Journal of Food Engineering*, 316, Article 110822. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110822>
- Singh, M., Patra, S., & Rajesh, K. S. (2021). Common techniques and methods for screening of natural products for developing of anticancer drugs. In A. K. Srivastava, V. K. Kannaujiya, R. K. Singh, & D. Singh (Eds.). *Evolutionary diversity as a source for anticancer molecules* (pp. 323–353). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821710-8.00015-1>
- Sulaimana, A. S., Chang, C.-K., Hou, C.-Y., Yudhistira, B., Punthi, F., Lung, C.-T., Cheng, K.-C., Santoso, S. P., & Hsieh, C.-W. (2021). Effect of oxidative stress on physicochemical quality of Taiwanese seagrape (*Caulerpa lentillifera*) with the application of alternating current electric field (ACEF) during post-harvest storage. *Processes*, 9(6), Article 1011. <https://doi.org/10.3390/pr9061011>
- Sun, J., Bai, W., Zhang, Y., Liao, X., & Hu, X. (2011). Effects of electrode materials on the degradation, spectral characteristics, visual colour, and antioxidant capacity of cyanidin-3-glucoside and cyanidin-3-sophoroside during pulsed electric field treatment. *Food Chemistry*, 128(3), 742–747. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.099>
- Sun, T., & Ling, F. (2021). Optimization method of microwave drying process parameters for rice. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 13(3), 10–20. <https://doi.org/10.15586/qas.v13i3.917>
- Tamer, C., Isci, A., Kutlu, N., Sakiyan, O., Sahin, S., & Sumnu, G. (2016). Effect of drying on porous characteristics of orange peel. *International Journal of Food Engineering*, 12(9), 921–928. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2016-0075>
- Tanino, T., Hirose, M., Moteki, R., Matsui, M., & Ohshima, T. (2020). Engineering of pulsed electric field treatment using carbon materials as electrode and application to pasteurization of sake. *Journal of Electrostatics*, 104, Article 103424. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103424>
- Telfser, A., & Galindo, F. G. (2019). Effect of reversible permeabilization in combination with different drying methods on the structure and sensorial quality of dried basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves. *LWT – Food Science and Technology*, 99, 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.062>
- Terefe, N. S., Buckow, R., & Versteeg, C. (2015). Quality-related enzymes in plant-based products: Effects of novel food processing technologies part 2: Pulsed electric field processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(1), 1–5. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.701253>
- Timmermans, R. A. H., Mastwijk, H. C., Berendsen, L. B. J. M., Nederhoff, A. L., Matser, A. M., Van Boekel, M. A. J. S., & Nierop Groot, M. N. (2019). Moderate intensity Pulsed Electric Fields as alternative mild preservation technology for fruit juice. *International Journal of Food Microbiology*, 298, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2019.02.015>
- Toepfl, S., & Knorr, D. (2006). Pulsed electric fields as a pretreatment technique in drying processes. *Stewart Postharvest Review*, 4(3), 1–6. <https://doi.org/10.2212/spr.2006.4.3>
- Toepfl, S., Siemer, C., Saldaña-Navarro, G., & Heinz, V. (2014). Overview of pulsed electric fields processing for food. In D.-W. Sun (Ed.). *Emerging technologies for food processing* (2nd ed., pp. 93–114). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-411479-1.00006-1>
- Tomasi, J. D. C., De Lima, G. G., Wendling, I., Helm, C. V., Hansel, F. A., De Godoy, R. C. B., Grunennvaldt, R. L., De Melo, T. O., Tomazzoli, M. M., & Deschamps, C. (2021). Effects of different drying methods on the chemical, nutritional and colour of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) leaves. *International Journal of Food Engineering*, 17(7), 551–560. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2020-0312>
- Tylewicz, U., Mannozi, C., Castagnini, J. M., Genovese, J., Romani, S., Rocculi, P., & Rosa, M. D. (2022). Application of ИЭП- and OD-assisted drying for kiwifruit waste valorisation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, Article 102952. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102952>
- Tylewicz, U., Tappi, S., Mannozi, C., Romani, S., Dellarosa, N., Laghi, L., Ragni, L., Rocculi, P., & Dalla Rosa, M. (2017). Effect of pulsed electric field (ИЭП) pre-treatment coupled with osmotic dehydration on physico-chemical characteristics of organic strawberries. *Journal of Food Engineering*, 213, 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.028>
- Vaessen, E. M. J., Timmermans, R. A. H., Tempelaars, M. H., Schutyser, M. A. I., & den Besten, H. M. W. (2019). Reversibility of membrane permeabilization upon pulsed electric field treatment in *Lactobacillus plantarum* WCFS1. *Scientific Reports*, 9(1), Article 19990. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56299-w>
- Van Wyk, S., Silva, F. V. M., & Farid, M. M. (2019). Pulsed electric field treatment of red wine: Inactivation of *Brettanomyces* and potential hazard caused by metal ion dissolution. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.11.001>

- Voda, A., Homan, N., Witek, M., Duijster, A., van Dalen, G., van der Sman, R., Nijssse, J., van Vliet, L., Van As, H., & van Duynhoven, J. (2012). The impact of freeze-drying on microstructure and rehydration properties of carrot. *Food Research International*, 49(2), 687–693. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.08.019>
- Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2019). Pulsed electric field in green processing and preservation of food products. In F. Chemat, E. Vorobiev (Eds.). *Green food processing techniques* (pp. 403–430). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815353-6.00015-x>
- Waghmare, R. (2021). Refractance window drying: A cohort review on quality characteristics. *Trends in Food Science and Technology*, 110(50), 652–662. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.030>
- Wang, Q., Li, Y., Sun, D. W., & Zhu, Z. (2018). Enhancing food processing by pulsed and high voltage electric fields: Principles and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(13), 2285–2298. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1434609>
- Wiktor, A., Dadan, M., Nowacka, M., Rybak, K., & Witrowa-Rajchert, D. (2019). The impact of combination of pulsed electric field and ultrasound treatment on air drying kinetics and quality of carrot tissue. *LWT – Food Science and Technology*, 110, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.060>
- Wiktor, A., Gondek, E., Jakubczyk, E., Dadan, M., Nowacka, M., Rybak, K., & Witrowa-Rajchert, D. (2018). Acoustic and mechanical properties of carrot tissue treated by pulsed electric field, ultrasound and combination of both. *Journal of Food Engineering*, 238, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.06.001>
- Wiktor, A., Iwaniuk, M., Śledź, M., Nowacka, M., Chudoba, T., & Witrowa-Rajchert, D. (2013). Drying kinetics of apple tissue treated by pulsed electric field. *Drying Technology*, 31(1), 112–119. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.724128>
- Wiktor, A., Lammerskitten, A., Barba, F. J., Michalski, M., Toepfl, S., & Parniakov, O. (2021). Drying processes assisted by ИЭП for plant-based materials. In K. Knoerzer, K. Muthukumarappan (Eds.). *Innovative food processing technologies: A comprehensive review* (pp. 272–275). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815781-7.00001-9>
- Wiktor, A., Nowacka, M., Dadan, M., Rybak, K., Lojkowski, W., Chudoba, T., & Witrowa-Rajchert, D. (2016). The effect of pulsed electric field on drying kinetics, color, and microstructure of carrot. *Drying Technology*, 34(11), 1286–1296. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1105813>
- Wiktor, A., Sledz, M., Nowacka, M., Rybak, K., Chudoba, T., Lojkowski, W., & Witrowa-Rajchert, D. (2015). The impact of pulsed electric field treatment on selected bioactive compound content and color of plant tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 30, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.04.004>
- Wiktor, A., & Witrowa-Rajchert, D. (2016). Pulsed electric fields as pretreatment for subsequent food process operations. In D. Miklavcic (Ed.). *Handbook of electroporation* (pp. 1–16). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-26779-1\\_178-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26779-1_178-1)
- Won, Y. C., Min, S. C., & Lee, D. U. (2015). Accelerated drying and improved color properties of red pepper by pretreatment of pulsed electric fields. *Drying Technology*, 33(8), 926–932. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.999371>
- Wu, Y., & Zhang, D. (2019). Pulsed electric field enhanced freeze-drying of apple tissue. *Czech Journal of Food Sciences*, 37(6), 432–438. <https://doi.org/10.17221/230/2018-CJFS>
- Yamakage, K., Yamada, T., Takahashi, K., Takaki, K., Komuro, M., Sasaki, K., Aoki, H., Kamagata, J., Koide, S., & Orikasa, T. (2021). Impact of pre-treatment with pulsed electric field on drying rate and changes in spinach quality during hot air drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 68, Article 102615. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102615>
- Yu, Y., Jin, T. Z., & Xiao, G. (2017). Effects of pulsed electric fields pretreatment and drying method on drying characteristics and nutritive quality of blueberries. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(6), Article e13303. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13303>
- Zderic, A., & Zondervan, E. (2016). Polyphenol extraction from fresh tea leaves by pulsed electric field: A study of mechanisms. *Chemical Engineering Research and Design*, 109, 586–592. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.03.010>
- Zderic, A., Zondervan, E., & Meuldijk, J. (2013). Breakage of cellular tissue by pulsed electric field: Extraction of polyphenols from fresh tea leaves. *Chemical Engineering Transactions*, 32, 1795–1800. <https://doi.org/10.3303/CET1332300>
- Zhang, C., Yang, Y. H., Zhao, X. D., Zhang, L., Li, Q., Wu, C., Ding, X., & Qian, J. Y. (2021). Assessment of impact of pulsed electric field on functional, rheological and structural properties of vital wheat gluten. *LWT – Food Science and Technology*, 147, Article 111536. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111536>
- Zhang, S., Sun, L., Ju, H., Bao, Z., Zeng, X., & Lin, S. (2021). Research advances and application of pulsed electric field on proteins and peptides in food. *Food Research International*, 139(1), Article 109914. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109914>
- Zhang, Z. H., Wang, L. H., Zeng, X. A., Han, Z., & Brennan, C. S. (2019). Non-thermal technologies and its current and future application in the food industry: A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(1), 1–13. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13903>
- Zhang, Z. H., Zeng, X. A., Brennan, C. S., Brennan, M., Han, Z., & Xiong, X. Y. (2015). Effects of pulsed electric fields (ИЭП) on vitamin C and its antioxidant properties. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(10), 24159–24173. <https://doi.org/10.3390/ijms161024159>
- Zhang, Z., Zhang, B., Yang, R., & Zhao, W. (2020). Recent developments in the preservation of raw fresh food by pulsed electric field. *Food Reviews International*, 38(1), 247–265. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1860083>
- Zhao, W., Yang, R., & Zhang, H. Q. (2012). Recent advances in the action of pulsed electric fields on enzymes and food component proteins. *Trends in Food Science and Technology*, 27(2), 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.05.007>