

## Повышение эффективности снятия покровной ткани с плодов томата импульсным электрическим полем



Д. А. Худяков<sup>1</sup>, М. Д. Соснин<sup>1</sup>, Е. Х. А. Маунассар<sup>1</sup>,  
Ч. Течаканон<sup>2</sup>, К. Симер<sup>3</sup>, С. Топфль<sup>3</sup>, И. А. Шорсткий<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Кубанский государственный технологический университет<sup>ROR</sup>, Краснодар, Россия

<sup>2</sup> Prince of Songkla University<sup>ROR</sup>, Surat Thani, Thailand

<sup>3</sup> Elea Vertriebs- und Vermarktungsgesellschaft mbH, Quakenbrück, Germany

Поступила в редакцию: 17.01.2022

Поступила после рецензирования: 09.03.2022

Принята к публикации: 11.03.2022

\*e-mail: [i-shorstky@mail.ru](mailto:i-shorstky@mail.ru)

© Д. А. Худяков, М. Д. Соснин, Е. Х. А. Маунассар,  
Ч. Течаканон, К. Симер, С. Топфль, И. А. Шорсткий,  
2022



### Аннотация.

Разработка и практическое использование электрофизических технологий в пищевых производственных процессах является глобальным трендом устойчивого развития агропромышленного сектора. Одним из энергоемких процессов переработки плодоовощной продукции является удаление покровной ткани (кожицы). Цель работы – изучить влияние импульсного электрического поля на эффективность снятия покровной ткани плодов томата с оценкой величины удельного усилия снятия оболочки, энергетических затрат и потерь продукции в сопоставлении с термическими и электрофизическими методами подготовки.

В качестве объектов исследования использовали плоды томата сорта Аврора. Применяли обработку импульсным электрическим полем при напряженности электрического поля 1 кВ/см и затрачиваемой удельной энергией на уровне 1, 5 и 10 кДж/кг. Визуальную оценку плодов томата до и после обработки проводили с использованием средств оптической микроскопии. Оценка эффективности удаления покровной ткани с плодов томата после воздействия импульсного электрического поля осуществляли на базе анализатора текстур, а потери массы с помощью цифровых весов.

В результате обработки импульсным электрическим полем было установлено снижение требуемой величины удельного усилия механического удаления оболочки на 10 % ( $P < 0,05$ ). Величина потерь массы плода для обработки импульсным электрическим полем при удельной затрачиваемой энергии 1 кДж/кг снизилась на 4 % ( $P < 0,05$ ) по сравнению с контрольным образцом. За счет обработки импульсным электрическим полем удалось осуществить электропорацию клеток, в результате которой был активирован внутренний массоперенос влаги из области эндокарпия в область между мезокарпием и покровной тканью. Образовавшаяся прослойка жидкости за счет гидростатического давления способствовала облегченному удалению покровной ткани с плодов томата.

В сопоставлении с технологиями термической (бланширование), омической и ультразвуковой обработок технология импульсного электрического поля позволяет достигать наименьших потерь продукции при наименьших энергетических затратах. Полученные данные позволяют обосновать перспективы использования обработки импульсным электрическим полем для удаления покровной ткани с плодов томата в процессе переработки.

**Ключевые слова.** Удаление оболочки, импульсное электрическое поле, томат, текстура, электропорация

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ)<sup>ROR</sup>, № 21-79-00112, а также с использованием оборудования ЦКП «Исследовательский центр пищевых и химических технологий» Кубанского государственного технологического университета (КубГТУ)<sup>ROR</sup> (ЦКП 3111), поддерживаемого Министерством науки и высшего образования РФ (Минобрнауки России)<sup>ROR</sup> (соглашение № 075-15-2021-679).

**Для цитирования:** Повышение эффективности снятия покровной ткани с плодов томата импульсным электрическим полем / Д. А. Худяков [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 1. С. 189–198. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-189-198>

## Pulsed Electric Field Processing as an Effective Tomato Peeling Method

Dmitry A. Khudyakov<sup>1</sup>, Maxim D. Sosnin<sup>1</sup>,  
Emad M. A. Munassar<sup>1</sup>, Chukwan Techakanon<sup>2</sup>,  
Claudia Siemer<sup>3</sup>, Stefan Toepfl<sup>3</sup>, Ivan A. Shorstkii<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Kuban State Technological University<sup>ROR</sup>, Krasnodar, Russia

<sup>2</sup> Prince of Songkla University<sup>ROR</sup>, Surat Thani, Thailand

<sup>3</sup> Elea Vertriebs- und Vermarktungsgesellschaft mbH, Quakenbrück, Germany

Received: 17.01.2022

Revised: 09.03.2022

Accepted: 11.03.2022

\*e-mail: [i-shorstky@mail.ru](mailto:i-shorstky@mail.ru)

© D.A. Khudyakov, M.D. Sosnin, E.M.A. Munassar,  
C. Techakanon, C. Siemer, S. Toepfl, I.A. Shorstkii, 2022



### Abstract.

Electrophysical technologies are a global trend of sustainable agriculture and food industry. Peeling is an energy-intensive procedure of fruit and vegetable processing. The research featured the effect of pulsed electric field (PEF) treatment on tomato peeling effectiveness. The assessment included such factors as specific effort, energy costs, and product losses in comparison with thermal and electrophysical methods.

Tomatoes of Aurora variety underwent a PEF treatment at 1 kV/cm. The expended specific energy was 1, 5, and 10 kJ/kg. The tomatoes were visually evaluated with optical microscopy before and after processing. The peeling effectiveness and mass loss were measured with a texture analyzer and digital scales.

The PEF treatment decreased the specific force of mechanical peel removal by 10% ( $P < 0.05$ ). The mass loss decreased by 4% ( $P < 0.05$ ) at 1 kJ/kg. The PEF method resulted in cell electroporation, which activated the internal mass transfer of moisture from the endocarp region between the mesocarp and the integumentary tissue. The hydrostatic pressure produced a layer of liquid, which facilitated the peeling.

In comparison with thermal treatment (blanching), ohmic heating, and ultrasonic processing, the PEF technology had the lowest production losses and energy costs. The research proves the prospects of the PEF treatment in commercial tomato processing.

**Keywords.** Peeling, pulsed electric field, tomato, texture, electroporation

**Funding.** The research was supported by the Russian Science Foundation (RSF)<sup>ROR</sup>, project No. 21-79-00112. The research facilities were provided by the Research Center for Food and Chemical Technologies of the Kuban State Technological University (KubSTU)<sup>ROR</sup> financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Minobrnauka)<sup>ROR</sup>, agreement No. 075-15-2021-679.

**For citation:** Khudyakov DA, Sosnin MD, Munassar EMA, Techakanon C, Siemer C, Toepfl S, et al. Pulsed Electric Field Processing as an Effective Tomato Peeling Method. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(1):189–198. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-189-198>

### Введение

Применение передовых электрофизических технологий в пищевой промышленности является глобальным трендом устойчивого развития агропромышленного сектора экономики [1]. Возможность снижения затрат на реализацию пищевых процессов с получением безопасных продуктов позволяет активно развивать такие технологии. При этом эффективность применения электрофизических технологий необходимо рассматривать для каждой конкретной задачи.

Удаление покровной ткани (кожицы) с растительных материалов является важной стадией технологической подготовки сырья к процессам дальнейшей переработки. Это особенно актуально для технологий получения томатной пасты, джемов и плодо-овощных пюре [2, 3]. От эффективности и степени очистки покровной ткани плодов томата зависит степень извлечения полезных веществ из сырья и вторичных продуктов, а также энергетические затраты дальнейших стадий переработки [4, 5]. Клеточная мембрана является барьером

для осуществления переноса внутриклеточных компонентов (влага, сок и др. растворенные вещества) из растительной структуры при промышленной переработке. По данным исследования Х. Wu и др. затраты энергии на процесс удаления кожицы с плодов томата могут достигать 15 % от общих энергетических затрат переработки [4]. Прогрессирующее изменение климата, а также усиленный контроль со стороны контролирующих органов по вопросам уровня выброса углерода способствуют активному поиску альтернативных методов обработки для минимизации энергетических затрат. В связи с этим использование современных эффективных методов подготовки плодов томатов к удалению оболочки и их анализ представляет как теоретический, так и практический интерес.

Дополнительной задачей удаления покровной оболочки является использование последней в качестве альтернативных источников пектинового сырья [6, 7]. В работе А. N. Grassino и др. отмечено, что свежие томатные выжимки содержат около 32 % белка, 30 % углеводов, что является ценным вторичным продуктом [7]. Другими авторами отмечено, что содержание пектиновых веществ в покровной ткани томата может достигать 25 % [8].

Эффективному процессу снятия покровной оболочки с томатов препятствует прочная связь мезокарпия с покровной оболочкой [5]. Для ослабления данной связи в промышленности применяют различные способы подготовки плодов томата: физический (термический), пароводотермический, механический, химический, комбинированный и обжиг воздухом [9–13]. Перечисленные методы обладают как преимуществами, так и недостатками. Например, при обработке термическим способом возникает явление локального перегрева структуры плодов томата, что ухудшает качественные характеристики. Механический способ подготовки плодов томата в виде надреза покровной ткани улучшает эффективность снятия оболочки, но применяется лишь в комбинации с термическим или пароводотермическим методами.

Впервые импульсные электрические поля (англ. pulsed electric field) в качестве нетепловой технологии были использованы в 60-х годах прошлого века [14, 15]. Механизм технологии импульсного электрического поля основан на использовании коротких электрических импульсов высокого напряжения, которые вызывают эффект электропорации клеточных мембран без изменения ферментного или компонентного состава [16]. В зависимости от применяемой интенсивности технология импульсного электрического поля способствует усилению массопереноса внутриклеточных соединений, приводит к распаду биологического материала или осуществляет инактивацию микробной флоры [17, 18]. С точки

зрения процесса термодинамики возникающий интенсивный массоперенос в растительных материалах, подверженных электропорации, вызван формированием большого количества микропор, расположенных спонтанно и случайным образом на поверхности материала вдоль силовых линий напряженности электрического поля [1]. Предварительная обработка импульсным электрическим полем может влиять на динамику массообмена в растительных материалах за счет изменения объемной пористости, присутствия высвободившейся жидкой фазы на поверхности материала в начальный момент времени, увеличения суммарной диффузии и изменения некоторых термодинамических параметров самого объекта обработки (теплоемкости, теплопроводности и др.).

По сравнению с другими методами электропорации применение импульсного электрического поля как предварительной обработки снижает потери энергии [1]. Импульсный подвод энергии делает процесс дальнейшей переработки экономным и эффективным. В доразрядном электрическом поле во влажное тело вводится незначительное количество энергии. Поэтому его интенсифицирующее воздействие слабое. Следовательно, необходимо вводить высокоамплитудные сверхкороткие по длительности потоки энергии в подвергающиеся обработке пищевые продукты и сырье с помощью импульсных электрических полей. Для их создания требуется простое аппаратное оформление: источник высокого напряжения, скоростной переключатель и электроды, между которыми размещается объект обработки. В итоге на объект обработки воздействует кратковременный высоковольтный импульс.

Технология импульсного электрического поля – это технология, которая используется в различных областях пищевой промышленности для улучшения технологических процессов. Например, в производстве соков, сушке и экстрагировании растительных материалов [19–21]. При этом процесс обработки импульсным электрическим полем осуществляется в непрерывном режиме транспортировки на скребковом конвейере или в режиме перекачки жидких продуктов [21].

Целью данной работы является изучение влияния импульсного электрического поля на эффективность снятия покровной ткани плодов томата с оценкой величины удельного усилия снятия оболочки, удельных энергетических затрат и потерь продукции в сопоставлении с существующими термическими и электрофизическими методами подготовки.

#### **Объекты и методы исследования**

В качестве объектов исследования использовали томат сорта Аврора. Все материалы приобретали на местном рынке города Квакенбрюк (Германия). Отбирали по 5 образцов томата без внешних

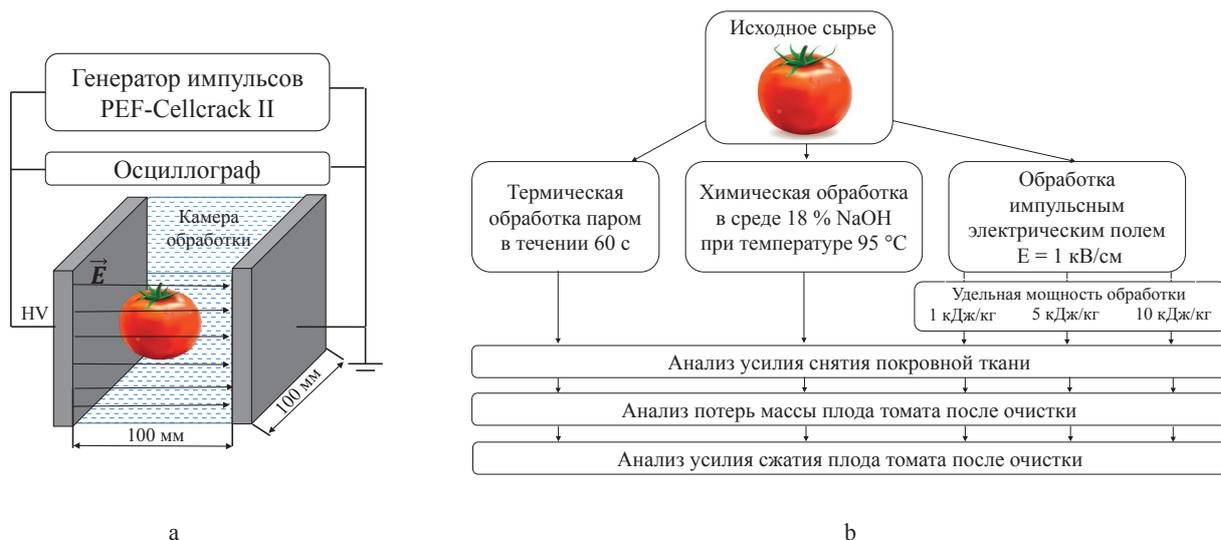


Рисунок 1. Схема системы обработки импульсным электрическим полем (а) и план эксперимента по анализу эффективности обработки импульсным электрическим полем в сравнении с термическим и химическим методом обработки для снятия покровной оболочки (b)

Figure 1. Pulsed electric field treatment system (a) and experimental plan for analyzing its effectiveness in comparison with thermal and chemical treatment methods (b)

повреждений и хранили при температуре 4 °С. Все плоды с точки зрения цвета и плотности были спелыми. Средний размер плодов томата был 64,3 мм, вес – 129 г.

**Обработка импульсным электрическим полем.** Обработку импульсным электрическим полем проводили на установке PEF-Cellcrack II (Elea Vertriebs-und Vermarktungsgesellschaft mbH, Германия). Схематично система обработки импульсным электрическим полем представлена на рисунке 1а. Система обеспечивает подачу высоковольтных монополярных импульсов и экспоненциальной формы с интервалом движения 0,5 с (2 Гц). Длительность каждого импульса составляет 40 мс. Импульсы подавались в электродный узел, состоящий из двух плоскопараллельных электродов из нержавеющей стали. Расстояние между электродами составляло 100 мм, а общий объем камеры – 1 л. В каждом эксперименте в камеру помещали один вид материала и добавляли водопроводную воду с параметрами (проводимость  $\sigma = 222$  мкСм/см, температура  $t = 22 \pm 1$  °С) в качестве проводящей среды. Удельный расход энергии, выраженный в кДж/кг, подаваемой в камеру обработки, регулировался изменением числа импульсов с учетом общей массы камеры. Величина напряженности электрического поля равнялась 1 кВ/см. Удельная энергия варьировалась в диапазоне от 0,5 до 2 кДж/кг, что соответствует количеству импульсов от 5 до 20 ед. В соответствии с частотой следования импульсов длительность нахождения томата в камере обработки составляла от 3 до 10 с.

Удельный расход энергии  $W$  (кДж/кг) и напряженность электрического поля  $E$  (кВ/см) рассчитывались по следующим формулам [1]:

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

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

где  $n$  – число импульсов (–);  $m$  – масса обрабатываемых образцов, кг;  $U$  – напряжение, кВ;  $d$  – расстояние между электродами, см;  $C$  – емкость конденсаторов, 1 мкФ. Общая схема плана исследований представлена на рисунке 1.

**Оценка усилия снятия оболочки.** Оценку усилия механического снятия кожицы с плодов томата осуществляли с помощью анализатора текстур TA.HDplus (Stable Micro Systems, Великобритания) с закрепленной насадкой для работы с плодовой продукцией (P/6, Stable Micro Systems, Великобритания). Для этого на поверхности томата предварительно нарезали контур размером 10×30 мм вдоль направления волокон. Закрепляли одну часть выделенного контура на специальной насадке, закрепленной на анализаторе текстур (рис. 2а). На анализаторе текстур выбирали программу расчета усилия растяжения и проводили процесс механического удаления кожицы с построением графической зависимости усилия снятия оболочки от

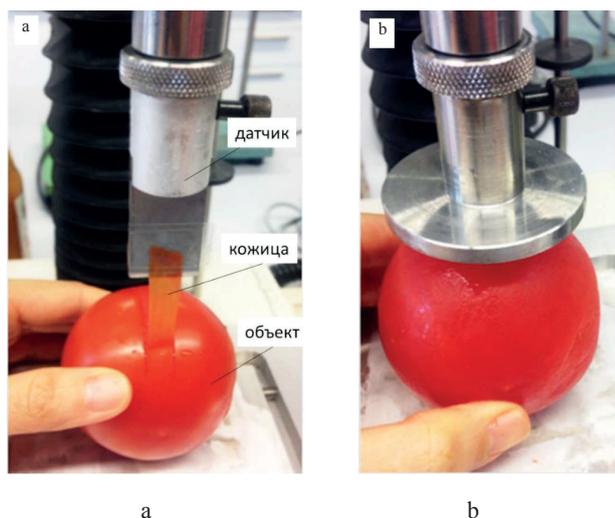


Рисунок 2. Визуализация оценки усилия удаления кожицы с поверхности томата (а) и усилия на сжатие плода томата (б)

Figure 2. Assessing the peeling (a) and compressing effort (b)

перемещения. Аналогичные методы оценки степени отделения покровной кожицы используются в других исследованиях [22]. Для плодов перца и персиков использовали подход, в котором целый плод делили на две части, одну из которых обрабатывали с помощью технологии импульсного электрического поля.

Удаленную с поверхности томата кожицу взвешивали на аналитических весах HR-250 AZG (A&D, Корея) с точностью до 4 знака после запятой. Размер снятой кожицы определяли путем цифровой съемки на белом фоне и последующего анализа с помощью программы для обработки изображений ImageJ (v 1.52e). Установленный квадрат изображения был обработан для определения масштаба (1 см  $\approx$  123 пикселя).

После очистки плодов томата проводили оценку усилия на сжатие очищенных плодов. Для этого использовали анализатор текстур TA.HDplus с плоской насадкой (рис. 2б).

**Микроскопический анализ.** Визуальную оценку эффективности воздействия обработки импульсным электрическим полем на снятие оболочки с плодов томата проводили с использованием средств оптической микроскопии. Для этого после обработки импульсным электрическим полем образец размещали на предметном стекле и с помощью микроскопа Nikon Digital Eclipse C1 производили анализ структуры материала в зоне оболочка – мякоть.

**Статистический анализ.** Все эксперименты проводились в трехкратной повторности. Значения измерений представлены как средняя величина  $\pm$  стандартное отклонение. Статистическую значимость определяли с помощью t-критерия при  $P < 0,05$ .

### Результаты и их обсуждение

Результаты визуальной оценки плодов томата после химической, термической и обработки импульсным электрическим полем (ИЭП) представлены на рисунке 3. Для очищенных плодов томата, обработанных импульсным электрическим полем, по сравнению с термическим и химическим методами, характерна более гладкая поверхность. Это говорит об однородности отделения покровной ткани (рис. 3а). Без дополнительной подготовки необработанный плод томата было невозможно очистить от покровной ткани. При анализе среза плодов томата для термической обработки и для обработки импульсным электрическим полем, особенно при высоких удельных энергетических затратах ( $W = 5$  и  $10$  кДж/кг), характерно изменение цветового окраса мезокарпия (белой прожилки) между покровной оболочкой и эндокарпием. Это говорит об изменении внутренних процессов массообмена.

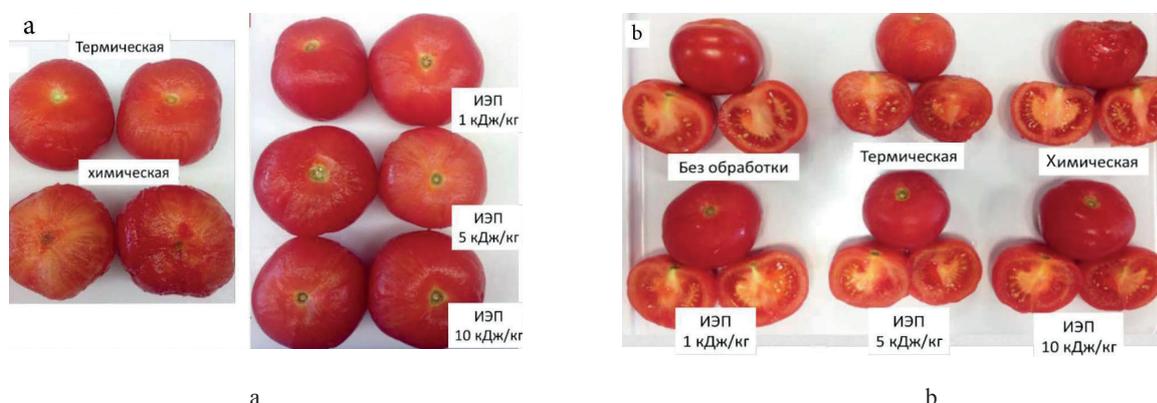


Рисунок 3. Внешний вид образцов томата после различных методов обработки: поверхность (а) и разрез (б)

Figure 3. Appearance of tomato samples after various processing methods: surface (a) and section (b)

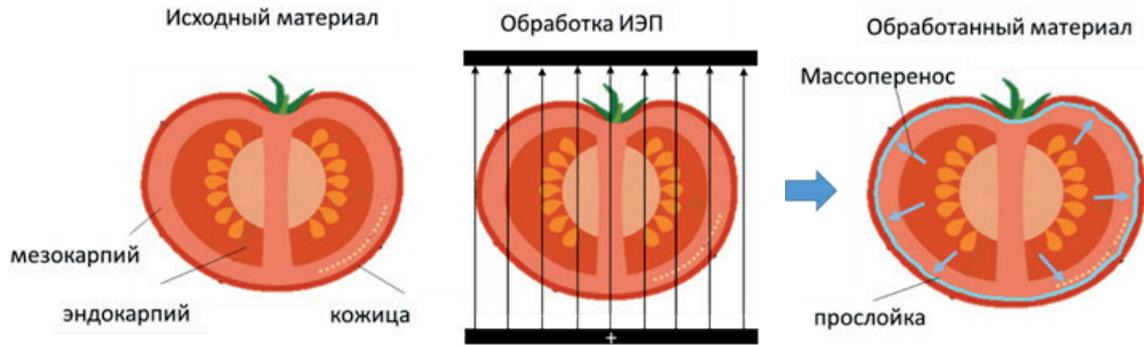


Рисунок 4. Механизм воздействия обработки импульсным электрическим полем на внутреннюю структуру плодов томата

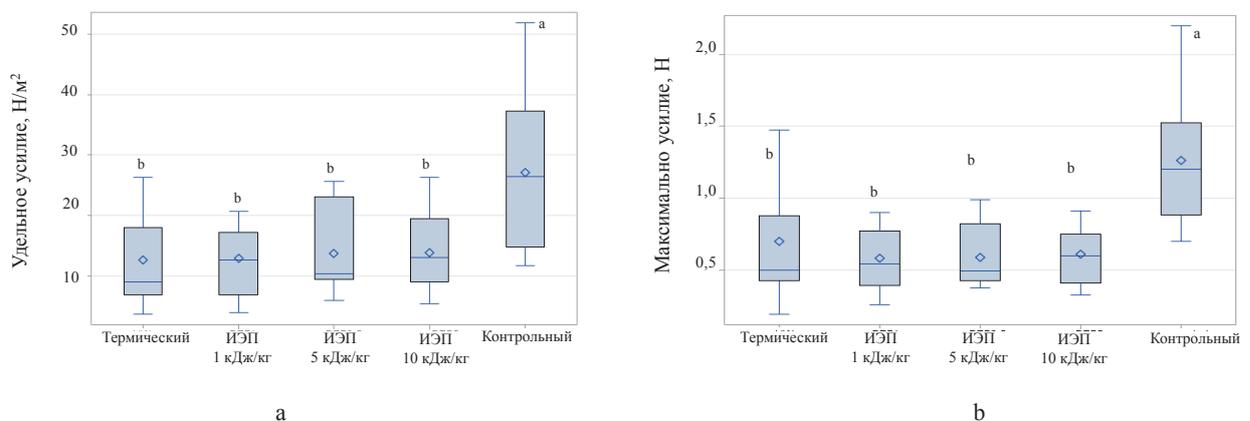
Figure 4. Pulsed electric field impact on the internal structure of tomatoes

Из литературных данных известно, что при достижении величины напряженности электрического поля 1 кВ/см для большинства растительных материалов наблюдается процесс электропорации, который сопровождается образованием пор на поверхности мембран растительных клеток. При повышении величины напряженности электрического поля или величины затрачиваемой энергии диаметр образующихся пор увеличивается в размере [19]. Сформированные поры влияют на внутренний массоперенос. Результаты визуальной оценки плодов томата подтверждают наличие эффекта от обработки импульсным электрическим полем на процесс удаления покровной ткани.

Авторы объясняют данный феномен отделения оболочки следующим образом. При достаточном уровне энергии обработки импульсным электрическим полем через дополнительно образовавшиеся поры во внутренней структуре плода томата влага начинает

мигрировать из области эндокарпия в зону между мезокарпием и покровной тканью (рис. 4). Процесс внутреннего массопереноса осуществляется за счет возникающего тургорного внутриклеточного давления. Образовавшаяся прослойка жидкости за счет своей гидродинамической силы способствует эффективному удалению покровной ткани. Схожий эффект был замечен в работе по применению импульсного электрического поля при сушке плодов манго [20].

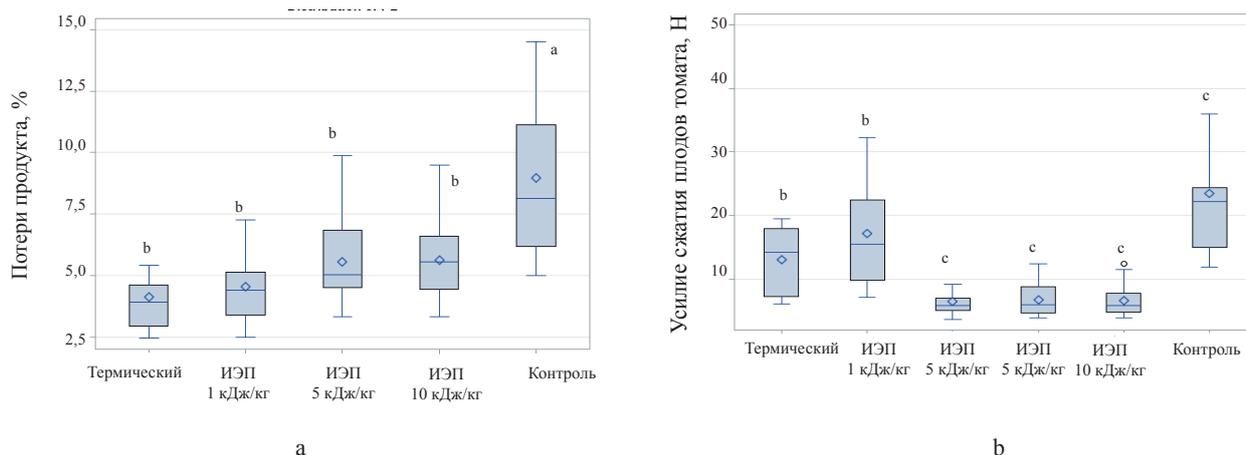
Эффективность воздействия различных методов подготовки на величину удельного усилия механического снятия кожицы с плодов томата показана на рисунке 5. Из данных зависимостей видно снижение величины удельного усилия, требуемого для удаления кожицы с плодов томата после обработки импульсным электрическим полем на различных энергетических уровнях, более чем в два раза. Усилие, требуемое для обработки импульсным электрическим полем, сопоставимо с термической обработкой в кипящей



\*Данные показаны как среднее значение с отклонениями, индексы а и б показывают статистическое взаимодействие

Рисунок 5. Зависимость удельного усилия снятия кожицы с поверхности плода томата от вида обработки (а) и зависимость максимального усилия снятия кожицы от вида обработки (б)

Figure 5. Effect of treatment type on specific peeling force (a) and maximal peeling force (b)



\*Данные показаны как среднее значение с отклонениями, индексы a, b и c показывают статистическое взаимодействие между данными

Рисунок 6. Зависимость величины потери массы продукта после различных видов обработки (a) и зависимость усилия сжатия плодов томата (b)

Figure 6. Effect of various types of processing on weight loss (a) and compression effort (b)

воде в течение 60 с. Аналогичные данные получены при анализе максимального усилия, возникающего при снятии кожицы с обработанных и контрольного образцов томата. Увеличение удельной энергии обработки импульсным электрическим полем с 1 до 10 кДж/кг не оказывает влияния на величину удельного и максимального усилия снятия кожицы (рис. 5). В отличие от процесса снятия кожицы с плодов персика или перца, у которых толщина покровного слоя значительно меньше, чем у томата, невозможно механически удалить всю покровную часть [10]. Адгезия кожицы уменьшалась, что приводило к меньшему количеству прикрепленной мякоти материала на кусочках кожицы и общему улучшению способности к отслаиванию. Другим объяснением может являться различие в величинах тургорного давления в клетках различных растительных материалов, которое влияет на величину массопереноса влаги внутри плода.

Влияние различных методов обработки на изменение массы очищенного плода (разность массы с кожицей и без) представлено на рисунке 6. Результаты показывают, что максимальная потеря массы плода на уровне 10 % ( $P < 0,05$ ) после механической очистки наблюдается для контрольного образца. Минимальные потери массы плода зафиксированы для термической обработки, а также для обработки импульсным электрическим полем с удельной энергией 1 кДж/кг. По данным результатам можно сделать вывод о том, что предварительная обработка импульсным электрическим полем позволяет снизить потери продукции на 4 % ( $P < 0,05$ ) по сравнению с контрольным образцом. При интенсивности обработки 1 кДж/кг величина потерь составляла меньше, чем при 5 и 10 кДж/кг.

В соответствии с традиционной технологией промышленной переработки плоды томата после мойки и инспекции дробят при помощи дробилок. Полученную дробленую массу томатов пропускают через машину «семяотделитель», где томатные свежие семена отделяются от массы мякоти, сока и кожицы томатов. Важную роль играют текстурные характеристики плодов томата. Анализ данных по усилию сжатия плодов томата после различных методов обработки показывает, что структура обработанных импульсным электрическим полем томатов стала более мягкой по сравнению с остальными видами обработки. Данный эффект связан с возникновением однородного распределения влаги из-за электропорации мембран растительных клеток. Аналогичный эффект смягчения ткани растительных материалов был замечен рядом авторов для картофеля, манго и киви [20–22]. В работе А. М. Гаджиевой и др. отмечено положительное влияние термической обработки плодов томата на качественные характеристики получаемого томатного сока [23]. В представленной работе установлено, что активность оксидазных ферментов в дробленых томатах, нагретых до 60 °С, достаточно высокая, но резко уменьшается при нагреве до 80 °С. Сохраняемость витамина С ниже при подогреве массы до 80 °С, чем до 60 °С. Технологические операции воздействия на пищевой продукт должны минимизировать тепловой воздействие, которое приводит к ухудшению качественных характеристик. Следовательно, существует возможность комбинирования указанной технологии импульсного электрического поля и теплового метода воздействия. Данный аспект требует детального исследования и будет осуществлен в последующих работах.

Полученные экспериментальные результаты коррелируют с исследованиями из литературных источников. По сравнению с воздействием инфракрасного нагрева от керамического излучателя в течение 10 с до установления температуры поверхности кожицы  $115 \pm 2$  °C S. K. Vidyarthi и др. удалось снизить потери продукта до 6,43 % [24]. Авторы [25] достигли высокой степени отслаивания, используя омический нагрев при напряженности электрического поля  $E = 1,2$  кВ/см в комбинации с раствором NaOH при концентрации 0,3 % с общими энергетическими затратами 2,2–4,5 кДж/кг. В указанной работе потери продукции не были проанализированы. В исследовании P. Wongsangasri и S. K. Sastry омическое нагревание сочеталось с оптимальным соотношением раствора щелочной соли (0,5 % KOH/0,01 NaCl) при напряженности электрического поля 2 кВ/см [26]. Был достигнут наивысший балл отделения оболочки с величиной потери массы плода на уровне 7,46 %. Y. Koch и др. достигли высокой эффективности отделения оболочки с использованием инфракрасного излучения на экспериментальной установке с нагревательной поверхностью размером 30×60 см, зазором между излучателями 90 мм и вращением плодов томата на 90° каждые 15 с [10]. Авторам удалось достигнуть потерь продукта при отделении оболочки на уровне 8,83 и 8,62 %. Использование ультразвуковых колебаний зондовой системы Sonics & Materials Inc. (1500 Вт, 20 кГц, плотность акустической энергии  $\approx 0,375$  Вт/г) в течение 45 с при температуре воды  $97 \pm 3$  °C позволило снизить потери продукции при отслаивании до 4,2 % [27]. Данный результат сопоставим с величиной потерь, полученной в данном исследовании, – 4,0 %. Однако ультразвуковая обработка проводилась для единичного плода и имеет характерный недостаток – малую область обработки. Сфокусированная ультразвуковая обработка при масштабировании требует наличия большого количества ультразвуковых излучателей и длительного времени воздействия. По данным работы S. Rock и др. энергетические затраты на ультразвуковую обработку для единичного плода томата составляют 8,3 Дж/кг, а на термическую обработку – 1,9 кДж/кг [27]. По данным A. S. Sengar и др. энергетические затраты на отделение кожицы с одного плода томата массой 100 г путем бланширования в течение 1 мин при температуре 70 °C составляют 1,55 кДж/кг [8].

Исходя из сравнительной оценки с существующими электрофизическими методами, можно предположить, что технология обработки импульсным электрическим полем эффективна при подготовке к операциям снятия покровной кожицы с плодов томата с целью снижения общих энергетических затрат и потерь продукции. Сравнение проводилось с процессами бланширования, ультразвуковой и омической технологиями. Для более детального сравнения

в последующих работах будет расширен спектр рассматриваемых технологий с анализом обработки паром. Полученные данные могут быть использованы в качестве основы для модернизации существующих технологических линии переработки плодов томата или вновь проектируемых.

### Выводы

В работе проведена оценка эффективности влияния обработки импульсным электрическим полем на процесс снятия оболочки с плодов томата. Полученные экспериментальные данные демонстрируют наличие эффекта возникновения внутреннего массопереноса с образованием водяной прослойки между мезокарпием и покровной кожицей. Благодаря изменению внутреннего массопереноса процесс снятия кожицы с плодов томата проходит при усилиях в два раза меньших по сравнению с контрольным и термически обработанным образцом. Обработка импульсным электрическим полем позволила снизить величину потери массы плода до 4 % ( $P < 0,05$ ) после процесса снятия кожицы. Это говорит о дополнительной экономической эффективности процесса. В сопоставлении с методами термической (бланшировка), ультразвуковой и омической обработки энергетические затраты предлагаемой технологии импульсного электрического поля составляют 1 кДж/кг, что на 50–80 % меньше, чем у указанных методов.

При сопоставлении технологии импульсного электрического поля с методами ультразвукового, инфракрасного и омического нагрева, характеризующихся высокими температурами воздействия и термической деградацией гемиллюлозной сетки, которая облегчает отделение перикарпия от эндокарпия, интересным представляется комбинация указанных методов. Перспективным направлением является комбинация технологии импульсного электрического поля с обработкой паром. Хотя плоды томатов демонстрируют улучшение способности к отделению оболочки при обработке импульсным электрическим полем, вызванная нагревом деградация упомянутой сети не является основным фактором, поскольку импульсное электрическое поле не требует нагрева. Механизм воздействия импульсного электрического поля, отвечающий за улучшение отделения оболочки с плодов томата, объясняется предположением о том, что накопление воды между кожицей и мягкой мякотью томатов, которое инициировано эффектом электропроводности импульсного электрического поля за счет своей гидродинамической силы, способствует эффективному удалению покровной ткани. Кроме того, следует учитывать индивидуальность и качество, а также различные

состояния зрелости плода. Это усложняет исследование, даже когда плоды демонстрируют схожие оптические и текстурные характеристики.

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для обоснования использования предлагаемого метода обработки импульсным электрическим полем в технологической линии переработки плодов томата.

#### Критерии авторства

Д. А. Худяков – экспериментальная часть и написание статьи. М. Д. Соснин – анализ результатов и построение рисунков. Е. Х. А. Мунассар – статистическая обработка результатов. Ч. Течаканон – экспериментальная часть. К. Симер – анализ результатов и построение рисунков. С. Топфль – анализ результатов и руководство работой. И. А. Шорсткий – руководство работой и написание статьи.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что материалы статьи не были опубликованы ранее и не отправлены в другие журналы. В работе не проводились испытания над животными.

#### Contribution

D.A. Khudyakov performed the experimental part and wrote the article. M.D. Sosnin analyzed the results and prepared the visual material. E.H.A. Munassar performed the statistical processing. C. Techakanon performed the experimental part. C. Siemer analyzed the results and prepared the visual material. S. Toepfl analyzed the results and supervised the research. I.A. Shorstkii supervised the project and wrote the article.

#### Conflict of interest

The authors declare that the materials have not been published previously and are not under consideration for publication in any other journal. The research involved no animal tests.

#### References/Список литературы

1. Shorstkii IA. Application of pulsed electric field treatment in drying of biomaterials. Krasnodar: Izdatel'skiy Dom-Yug; 2020. 172 p. (In Russ.).
- Шорсткий И. А. Применение обработки импульсным электрическим полем биоматериалов при подготовке к сушке // Краснодар: Издательский Дом-Юг, 2020. 172 с.
2. Kravtsova EV, Pelenko VV. Increase the efficiency of cutting on the part of fruit and vegetable raw materials close to the spherical form. *Processes and Food Production Equipment*. 2018;(1):35–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/2310-1164-2016-11-1-35-42>
3. Nawaz A, Ali SW, Irshad S, Irshad F, Ahmed A, Sharmeen Z, *et al.* Effect of peeling and unpeeling on yield, chemical structure, morphology and pasting properties of starch extracted from three diverse potato cultivars of Pakistan. *International Journal of Food Science and Technology*. 2020;55(6):2344–2351. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14412>
4. Wu X, Yu L, Pehrsson PR. Are processed tomato products as nutritious as fresh tomatoes? Scoping review on the effects of industrial processing on nutrients and bioactive compounds in tomatoes. *Advances in Nutrition*. 2022;13(1):138–151. <https://doi.org/10.1093/advances/nmab109>
5. Lu Z, Wang J, Gao R, Ye F, Zhao G. Sustainable valorisation of tomato pomace: A comprehensive review. *Trends in Food Science and Technology*. 2019;86:172–187. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.020>
6. Gharibzahedi SMT, Smith B, Guo Y. Pectin extraction from common fig skin by different methods: The physicochemical, rheological, functional, and structural evaluations. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019;136:275–283. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.040>
7. Grassino AN, Brnčić M, Vikić-Topić D, Roca S, Dent M, Brnčić SR. Ultrasound assisted extraction and characterization of pectin from tomato waste. *Food Chemistry*. 2016;198:93–100. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.095>
8. Sengar AS, Rawson A, Muthiah M, Kalakandan SK. Comparison of different ultrasound assisted extraction techniques for pectin from tomato processing waste. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020;61. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2019.104812>
9. Vidyarthi SK, El Mashad HM, Khir R, Zhang R, Tiwari R, Pan Z. Quasi-static mechanical properties of tomato peels produced from catalytic infrared and lye peeling. *Journal of Food Engineering*. 2019;254:10–16. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.001>
10. Koch Y, Witt J, Lammerskitten A, Siemer C, Toepfl S. The influence of Pulsed Electric Fields (PEF) on the peeling ability of different fruits and vegetables. *Journal of Food Engineering*. 2022;322. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110938>
11. Gavahian M, Sastry SK. Ohmic-assisted peeling of fruits: Understanding the mechanisms involved, effective parameters, and prospective applications in the food industry. *Trends in Food Science and Technology*. 2020;106:345–354. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.027>

12. GCrassino AN, Pedisić S, Dragović-Uzelac V, Karlović S, Ježek D, Bosiljkov T. Insight into high-hydrostatic pressure extraction of polyphenols from tomato peel waste. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2020;75(3):427–433. <https://doi.org/10.1007/s11130-020-00831-1>
13. Sudheesh C, Sunooj KV. Cold plasma processing of fresh-cut fruits and vegetables. In: Siddiqui MW, editor. *Fresh-cut fruits and vegetables*. Academic Press; 2020. pp. 339–356. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816184-5.00014-8>
14. Tylewicz U. How does pulsed electric field work? In: Barba FJ, Parniakov O, Wiktor A, editors. *Pulsed electric fields to obtain healthier and sustainable food for tomorrow*. Academic Press; 2020. pp. 3–21. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816402-0.00001-X>
15. Chacha JS, Zhang L, Ofoedu CE, Suleiman RA, Dotto JM, Roobab U, *et al.* Revisiting non-thermal food processing and preservation methods – action mechanisms, pros and cons: a technological update (2016–2021). *Foods*. 2021;10(6). <https://doi.org/10.3390/foods10061430>
16. Nowosad K, Sujka M, Pankiewicz U, Kowalski R. The application of PEF technology in food processing and human nutrition. *Journal of Food Science and Technology*. 2021;58(2):397–411. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04512-4>
17. Arnal Á, Royo P, Pataro G, Ferrari G, Ferreira V, López-Sabirón AM, *et al.* Implementation of PEF treatment at real-scale tomatoes processing considering LCA methodology as an innovation strategy in the agri-food sector. *Sustainability*. 2018;10(4). <https://doi.org/10.3390/su10040979>
18. Martínez JM, Delso C, Álvarez I, Raso J. Pulsed electric field-assisted extraction of valuable compounds from microorganisms. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2020;19(2):530–552. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12512>
19. Suchanek M, Olejniczak Z. Low field MRI study of the potato cell membrane electroporation by pulsed electric field. *Journal of Food Engineering*. 2018;231:54–60. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.002>
20. Lammerskitten A, Shorstkii I, Parniakov O, Mykhailyk V, Toepfl S, Rybak K, *et al.* 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*. 2020;44(12). <https://doi.org/10.1111/jfpp.14973>
21. Shorstkii I. Application of cold filamentary microplasma pretreatment assisted by thermionic emission for potato drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2020;66. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102540>
22. Shen Y, Khir R, Wood D, McHugh TH, Pan Z. Pear peeling using infrared radiation heating technology. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2020;65. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102474>
23. Gadzhieva AM, Muradov MS, Kasyanov GI. Development and scientific validation of the innovative technology of complex processing of raw tomato. *Scientific Works of the Kuban State Technological University*. 2014;(5):1–20. (In Russ.).  
Гаджиева А. М., Мурадов М. С., Касьянов Г. И. Разработка и научное обоснование инновационных технологий комплексной переработки томатного сырья // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2014. № 5. С. 1–20.
24. Vidyarthi SK, El Mashad HM, Khir R, Zhang R, Tiwari R, Pan Z. Evaluation of selected electric infrared emitters for tomato peeling. *Biosystems Engineering*. 2019;184:90–100. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.06.006>
25. Sawant SR, Pandey JP, Singh A, Prakash O. Performance and evaluation of ohmic heating assisted lye and salt concentration on peeling quality of tomato. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2018;7(9):3515–3524. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.709.436>
26. Wongsan-Ngasri P, Sastry SK. Tomato peeling by ohmic heating: Effects of lye-salt combinations and post-treatments on weight loss, peeling quality and firmness. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2016;34:148–153. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.013>
27. Rock C, Yang W, Nooji J, Teixeira A, Feng H. Evaluation of Roma tomatoes (*Solanum lycopersicum*) peeling methods: conventional vs. power ultrasound. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*. 2010;123:241–245.