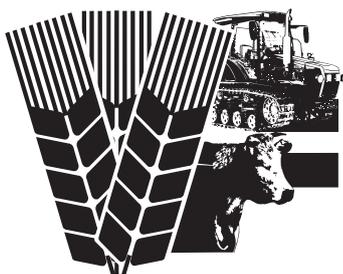


# ПРОБЛЕМЫ ОТРАСЛЕЙ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА



Виктор КОРКО

*доцент кафедры электротехнологии,  
кандидат технических наук*

Марина ЧЕЛОМБИТЬКО

*доцент кафедры технологии  
и технического обеспечения процессов  
переработки сельскохозяйственной продукции,  
кандидат сельскохозяйственных наук  
(Белорусский государственный  
аграрный технический университет)*

УДК 664

## **Применение импульсного электрического поля – перспективное направление нетепловой обработки пищевых продуктов**

### **Введение**

**В** пищевой промышленности для переработки и консервирования традиционно используются термические методы, которые обеспечивают безопасность продуктов и увеличивают сроки годности большинства из них. Однако тепловая обработка изменяет структуру и химический состав пищи, влияет на ее функциональные свойства. Потребительский спрос на свежие, питательные и безопасные продовольственные товары обуславливает повышенный интерес к новым технологиям производства продуктов питания со стороны промышленников и, соответственно, научных кругов.

К перспективным методам воздействия на сельскохозяйственное сырье относятся НРР (High pressure processing – обработка высоким давлением), РЕФ (Pulsed electric field processing – импульсная обработка электрическим полем), а также технология, предусматривающая использование ультразвуковых колебаний. Из-за нетеплового характера этих процессов обеспечиваются снижение энергопотребления, а также максимально возможное сохранение свойств как сырья, так и конечной продукции.

Одним из наиболее перспективных средств нетеплового воздействия является импульсное электрическое поле. Оно может применяться для:

- антимицробной обработки различных пищевых продуктов с целью увеличения сроков хранения или повышения безопасности;
- извлечения некоторых высокоценных составляющих;
- стабилизации пищевых изделий путем инактивации некоторых ферментов [2].

Использование PEF-технологии подразумевает кратковременное (в диапазоне от микро- до миллисекунд) воздействие электрического поля напряженностью 20–80 кВ/см. Подобный режим предотвращает нагрев пищевых продуктов и обеспечивает получение оптимальных результатов.

Наиболее важными для переработчиков сельскохозяйственного сырья являются следующие составляющие PEF-процесса:

- генерация электрического поля высокой интенсивности;
- применение камер, обеспечивающих равномерную обработку продуктов при минимальном повышении температуры;
- использование электродов из материалов, сводящих к минимуму эффект электролиза.

Высокая напряженность поля достигается за счет накопления в батарее конденсаторов большого количества энергии, высвобождающейся в межэлектродном промежутке в форме импульсов.

### ***Описание импульсных сигналов***

Для PEF-обработки могут использоваться экспоненциально затухающие, прямоугольные, биполярные или колебательные импульсы.

Первые представляют собой однонаправленные волны напряжения, которые быстро достигают максимального значения и медленно убывают до нуля. Создающий их блок питания постоянного тока заряжает батарею конденсаторов, последовательно соединенную с нагрузочным резистором. Когда подается сигнал запуска, хранящийся в конденсаторах заряд протекает через размещенный в камере обработки продукт.

Импульсы прямоугольной формы более инактивационно- и энергоэффективны, чем описанные ранее. Их можно получить, используя сеть, состоящую из массива конденсаторов, индукторов и полупроводниковых переключающих устройств.

Реверсивные импульсы мгновенного заряда характеризуются различной шириной и пиковой напряженностью поля. Импульсы мгновенного заряда могут существенно (до 1,3 Дж/мл) снизить затраты энергии.

Импульсы осцилляционного распада являются наименее эффективными, так как при их генерировании продукты не могут постоянно подвергаться воздействию электрического поля высокой напряженности в течение длительного времени. Это препятствует необратимому разрушению клеточных мембран на больших площадях.

### ***Камеры и оборудование, применяемые для обработки пищевых продуктов импульсным электрическим полем***

В настоящее время они представляют собой преимущественно экспериментальные образцы. В промышленных масштабах используются только две системы, производимые PurePulse Technologies, Inc. и Thales Group.

Предназначенные для коммерческого применения камеры подразделяются на обеспечивающие статический или непрерывный режим обработки. Последние реализуют коаксиальные камеры, а также имеющие ионопроводящую мембрану и снабженные отражателями.

Технологическая линия, осуществляющая непрерывную обработку продуктов питания импульсным электрическим полем, представлена на рисунке 1.

Данная линия состоит из 8-ми основных элементов: управляющего операциями компьютера, системы подвода тока, накопительного конденсатора, высоковольтного источника питания, одной или нескольких камер для обработки, насоса для транспортировки продукта через данные камеры, охлаждающего устройства, емкости для готовой продукции [4].

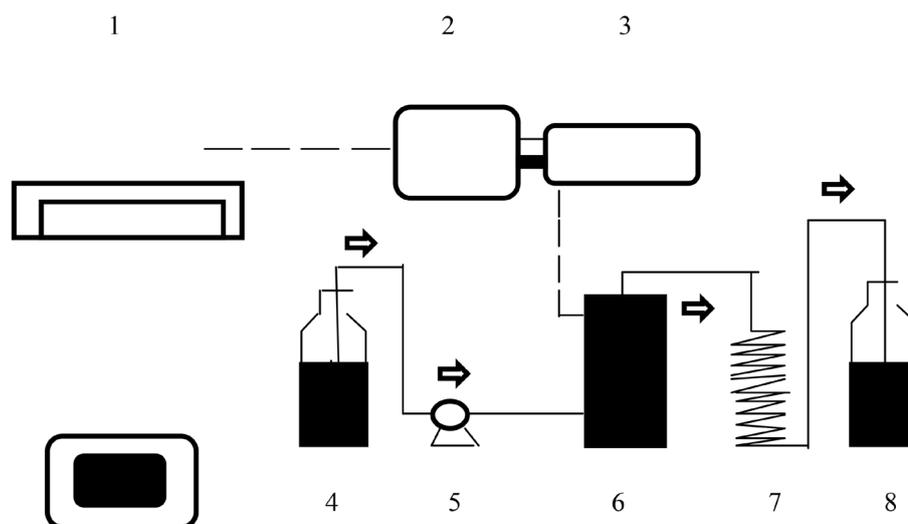


Рис. 1. Схема линии непрерывной PEF-обработки пищевых продуктов (1 – компьютер, 2 – источник высокого напряжения, 3 – генератор импульсов, 4 – емкость с исходным продуктом, 5 – насос, 6 – камера, 7 – охладитель, 8 – емкость для готового продукта)

### Механизм микробной инактивации

Воздействие электрических полей на биологические ткани вызывает накопление электрических зарядов на клеточных мембранах. Когда индуцированный потенциал превышает 1 В, в большинстве клеточных систем происходит разрушение мембран. В частности, для инактивации бактерии *E. coli* критическая напряженность внешнего электрического поля должна составлять около 10 кВ/см.

Существует несколько теорий, объясняющих данный механизм. Наиболее обоснованными среди них представляются электрический пробой и электропорация (разрушение клеточных мембран). Разработка математических моделей, описывающих кинетику процесса инактивации электрическим полем, продолжается.

В ходе экспериментов были идентифицированы 3 фактора, которые влияют на результаты PEF-обработки:

процесс и его параметры (напряженность электрического поля, длительность и форма импульсов, время и температура воздействия);

микробная сущность (тип микроорганизма, его концентрация и стадия роста);

свойства среды для обработки (рН, проводимость, концентрация ионов в растворе, наличие в нем антимикробных препаратов и иных составляющих) [3].

Рассмотрим 2 механизма воздействия импульсного электрического поля на микроорганизмы – электрический пробой и электропорацию. Первый из них представлен на рисунке 2.

Мембрану можно рассматривать как конденсатор, заполненный диэлектриком (см. рис. 2 а). Нормальная разность потенциалов на мембране  $U_m$  составляет 10 мВ и приводит к накоплению напряжения на мембране  $U$ . Увеличение потенциала приводит к уменьшению толщины клеточной мембраны. Пробой последней происходит, если в результате дальнейшего увеличения напряженности внешнего поля достигается критическое напряжение пробоя  $U_c$ , составляющее порядка 1 В (см. рис. 2 в). Предполагается, что пробой вызывает образование заполненных проводящим раствором трансмембранных пор, наличие которых приводит к немедленному разряду на мембране, сопровождающемуся разрушением последней. Пробой обратим, если поры малы по отношению к общей поверхности мембраны. При превышении критического значения напряженности поля и увеличении времени экспозиции разрушению подвергаются большие участки мембраны (см. рис. 2 г). Если площадь пор сопоставима с общей величиной поверхности мемб-

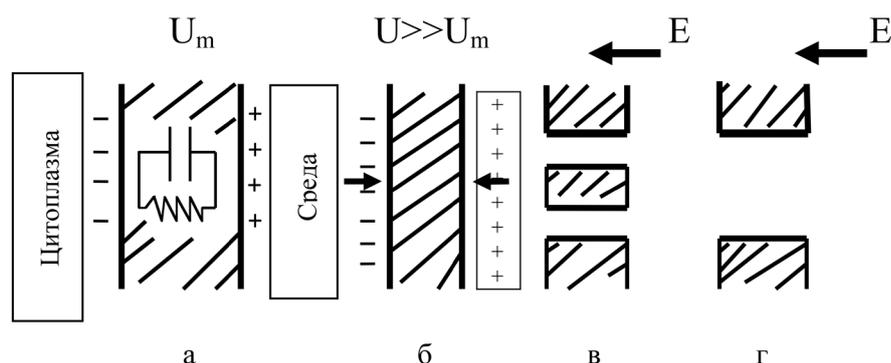


Рис. 2. Принципиальная схема обратимого и необратимого пробоя (а – клеточная мембрана с потенциалом  $U_m$ , б – мембранное сжатие, в – образование пор с обратимым пробоем, г – площадь мембраны, подвергнутая необратимому разрушению;  $U$  – разность потенциалов,  $E$  – напряженность поля)

раны, обратимый пробой становится необратимым, что влечет за собой ее механическое разрушение [1, 5].

Электропорация представляет собой временную дестабилизацию белков клеточных мембран под воздействием импульсов электрического поля высокой напряженности. В результате мембраны становятся проницаемыми для малых молекул, присутствие которых обуславливает их набухание и возникновение пор. Исследователями предложена двухступенчатая модель формирования последних, согласно которой возникновение начальной перфорации является ответом на наличие электрического сверхпорогового потенциала, время и уровень воздействия которого определяют степень увеличения размеров пор (см. рис. 3). Большие возникают при росте интенсивности электрического поля, повышении длительности импульса, уменьшении ионной силы среды [6].

Исследования также показали высокую эффективность PEF-обработки при инактивации ферментов (полифенолоксидазы, пектиновой метилэстеразы, липоксигеназы и т.д.). При этом у сырья, среды обработки и конечного продукта большинство физических параметров (рН,  $V_x$ , титруемая кислотность, цвет, а также содержание фенольных соединений, антоцианов, органических кислот) существенно не изменяются.

Применение PEF-технологии способствует повышению качества пищевых изделий (увеличению сроков годности хлебных и молочных продуктов, соков, яиц, сохранению ферментативных свойств пивных дрожжей).

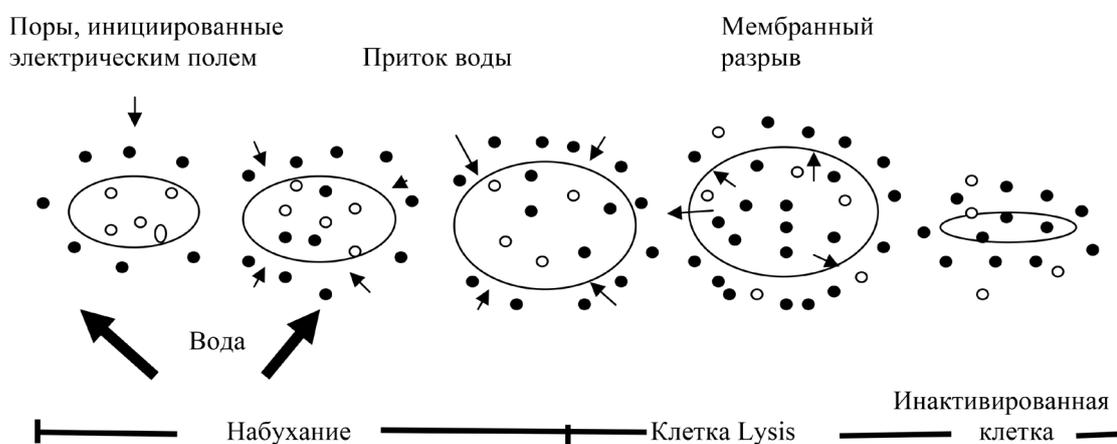


Рис. 3. Схема электропорации клеточной мембраны

Широкое использование импульсного электрического поля для обработки продовольственных товаров ограничивают:

малая доступность коммерческого технологического оборудования, которое выпускается только двумя компаниями – PurePulse Technologies, Inc. и Thales Group;

непригодность для воздействия на большинство твердых пищевых продуктов, содержащих газовые пузырьки. Наличие последних не способствует равномерной обработке и может создать проблемы при эксплуатации оборудования;

неспособность ряда продуктов питания выдержать воздействие сильного электрического поля. Диэлектрическая проницаемость пищи тесно связана с ее физической структурой и химическим составом. Однородные жидкости с низкой электропроводностью идеально подходят для непрерывной обработки с помощью PEF. Так как продукты с высокой электропроводностью уменьшают сопротивление камеры, внесение в них соли следует производить после окончания процесса;

максимальный размер содержащихся в жидкости частиц. Он должен быть меньше имеющегося в камере зазора для обработки;

отсутствие единого метода точного измерения степени воздействия электрического поля на клеточные мембраны микроорганизмов.

Перечислим критические факторы процесса PEF.

Технологические:

напряженность электрического поля;

время обработки;

форма импульса;

энергия последнего;

температура.

Свойства обрабатываемой среды:

проводимость;

pH;

ионная сила.

Микробные:

тип микроорганизмов;

концентрация последних;

стадия их роста.

Важнейшими параметрами PEF-процесса являются:

форма воздействующего на продукт импульса. Средняя напряженность электрического поля рассчитывается путем деления пикового напряжения на расстояние между электродами. Измерение проводится с помощью зонда и осциллографа;

сила импульсного тока, который должен иметь вид, аналогичный форме напряжения волны. Для измерения формы сигнала могут быть использованы шунтирующий резистор или монитор тока (подобный катушке Пирсона) вместе с осциллографом;

длительность импульса, которая определяется по форме напряжения;

частота повторения импульсов. Форма волны напряжения, форма тока, длительность и частота повторения могут регистрироваться компьютерной системой осциллографа;

температура на входе и выходе каждой из камер для обработки. Для ее измерения может быть применен резистивный температурный датчик. Получаемые с него данные должны использоваться для оценки количества энергии, подаваемой в упомянутую камеру;

давление. Для его измерения в некоторых системах непрерывной PEF-обработки можно использовать поточный передатчик давления.

Под воздействием электрического поля, как и в ходе применения иных методов инактивации, бактерии могут уничтожаться не полностью. С учетом этого эксперты должны применять соответствующие методы подбора тестовых микроорганизмов. Выбор последних должен зависеть

от свойств конкретного пищевого продукта, особенностей микрофлоры и условий процесса обработки (напряженности электрического поля, количества импульсов, времени их воздействия, характеристик пульсовых волн) и осуществляться с учетом специфики применяемой технологии.

Микроорганизмами, в значительной степени обуславливающими порчу пищевых продуктов, являются *S. cerevisiae* и *Candida spp*, инактивацию которых обеспечивают различные процессы обработки продуктов питания и пищевого сырья. Однако их восприимчивость к PEF может препятствовать использованию в качестве суррогатов.

Для оценки возникающих в ходе обработки продукции отклонений должны применяться описанные далее средства и методы.

### **Температурные датчики**

Термопары или иные аналогичные устройства соединяются с насосно-компрессорными трубами на входе и выходе камеры для PEF-обработки. Непрерывный контроль температуры позволяет избежать нежелательного нагрева обрабатываемого продукта в приэлектродной зоне.

### **Система сбора данных**

Компьютерный контроль за ходом технологического процесса, а также непрерывная регистрация мощности и частоты импульсов дают возможность корректировать отклонения, вызванные неисправностью источника питания высокого напряжения, которые могут привести к недостаточной обработке продукта.

### **Автоматическое выключение**

Осуществляемое компьютером защитное отключение пульсатора позволяет избежать повреждения камеры и электрода в случае возникновения дугового разряда. Если утечка продукта при этом отсутствует, оборудование может быть перезапущено для продолжения обработки продукта. В противном случае последний необходимо отбраковать.

### **Контроль за отклонениями с использованием образца**

Обработке импульсным электрическим полем может подвергаться молоко. Данная жидкость содержит белки и минералы (соединения кальция, железа и магния). С большой долей вероятности эти компоненты могут загрязнять поверхность электрода во время PEF-обработки. Кроме того, молоко с высоким уровнем содержания микроорганизмов может служить хорошим субстратом для их размножения, результатом которого может стать образование в камере обработки биопленки. При наличии последней эффективность пульсатора будет ниже, а продукт подвергнется ограниченному воздействию из-за свертывания его составляющих на электроде. Для предотвращения подобной ситуации и обеспечения требуемых условий обработки необходимо выполнить оптимизацию технологического процесса [7].

### **Заключение**

Воздействие импульсным электрическим полем представляет собой нетермический метод консервирования продовольственных товаров. Его преимуществами являются возможность использования для микробной инактивации, а также минимальное отрицательное влияние на характеристики конечных продуктов. Технология PEF позволяет переработчикам сельскохозяйственного сырья предлагать потребителям высококачественные пищевые изделия.

Несмотря на произошедшее за последние годы значительное расширение сферы использования упомянутой технологии, она нуждается в дальнейшем совершенствовании, позволяющем применять ее на коммерческой основе.

К наиболее перспективным направлениям соответствующих исследований относятся:

- изучение механизмов микробной и ферментативной инактивации;
- разработка и оценка кинетических моделей, учитывающих влияющие на инактивацию критические факторы;
- выявление патогенных микроорганизмов, наиболее устойчивых к импульсному электрическому полю;
- подбор идентичных суррогатных микроорганизмов;
- разработка методов валидации для обеспечения микробиологической эффективности;
- оптимизация и контроль критических факторов РЕФ-процесса.
- разработка и стандартизация эффективных методов его мониторинга;
- обеспечение однородного воздействия на продукты;
- увеличение производительности камер обработки;
- разработка и применение для выпуска электродов материалов, обеспечивающих длительное время работы и низкий уровень миграции металлов;
- проектирование и выпуск технических средств для РЕФ-обработки, позволяющих минимизировать производственные затраты.

В Республике Беларусь рассматриваемая технология практически не используется из-за отсутствия у местных производителей пищевых товаров специального оборудования собственного или зарубежного производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ersus, S. Determination of membrane integrity in onion tissues treated by pulsed electric fields: use of microscopic images and ion leakage measurements / S. Ersus, D. M. Barrett // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. – 2010. – Vol. 11, № 4. – P. 598–603.
2. Pulsed electric fields / G. V. Barbosa-Canovas [et al.] // *Food Sci.* – 2000. – Vol. 65, № 8. – P. 65–79.
3. Castro, A. J. Microbial inactivation of foods by pulsed electric fields. / A. J. Castro, G. V. Barbosa-Canovas, B. G. Swanson // *J. Food Process Presrv.* – 1993. – Vol. 19. – P. 47–73.
4. Min, S. Pulsed Electric Fields: Processing System, Microbial and Enzyme Inhibition and Shelf Life Extension of Foods / S. Min, G. Evrendilek, H. Zhang // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2007. – Vol. 35, № 1. – P. 59–73.
5. The effect of pulsed electric fields on biological cells: Experiments and applications/ K. H. Schoenbach [et al.] // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 1997. – № 25. – P. 284–292.
6. Tsong, T. Y. Electroporation of cell membranes / T. Y. Tsong // *Biophys J.* – 1991. – № 60. – P. 297–306.
7. Rastogi, N. K. Application of High Intensity Pulsed Electrical Fields in Food Processing / N. K. Rastogi // *Food Reviews International*. – 2003. – Vol. 19, № 3. – P. 229–251.

#### РЕЗЮМЕ

Использование импульсных электрических полей является одним из наиболее перспективных нетепловых методов обработки пищевых продуктов. Инактивация микроорганизмов связана с электромеханической неустойчивостью клеточных мембран. Наиболее важными факторами технологии являются сила электрического поля и время его воздействия.

Высокие первоначальные затраты на установку использующих РЕФ систем препятствуют их широкому промышленному применению. Инновационные разработки в области высоковольтной импульсной технологии позволят снизить затраты на генерацию и сделать РЕФ-технологии способной конкурировать с методами термической обработки продовольствия.

#### SUMMARY

The use of pulsed electric fields is one of the most promising non-thermal methods of processing food products. Inactivation of microorganisms exposed to high-voltage PEFs is related to the electromechanical instability of the cell membrane. Electric field strength and treatment time are the two most important factors involved in PEF processing.

The high initial cost of setting up the PEF processing system is the major obstacle confronting those who would encourage the system's industrial application. Innovative developments in high-voltage pulse technology will reduce the cost of pulse generation and will make PEF processing competitive with thermal-processing methods.