
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Ю.А. Бошняга*, Л.А. Бантыш

К ВОПРОСУ О СТЕРИЛИЗУЮЩЕМ ДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА МИКРОФЛОРУ ПЛОДОВО-ЯГОДНЫХ СОКОВ

*Институт пищевых технологий,
ул. М.Когэлничану, 63, г. Кишинев, MD-2009, Республика Молдова, iubosneaga@gmail.com*

**Институт прикладной физики АНМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

Совершенные технологии переработки и консервирования пищевых продуктов предполагают обязательное сохранение наиболее ценных термолабильных биологически активных компонентов, включая витамины. Внедрение щадящих методов обеспечения микробиологического благополучия представляет особый интерес для технологий вакуумной и сублимационной сушки пищевых продуктов, являющихся по своей сути низкотемпературными.

Однако для этапа стерилизации или пастеризации до сих пор не существует реальной альтернативы тепловым методам, несмотря на кажущееся многообразие способов «холодной» стерилизации: мелкопористые бактериальные фильтры сложны в эксплуатации и имеют ограниченную сферу применения; методы лучевой стерилизации ионизирующим излучением, ультразвуком, химическими веществами, ультрафиолетовым излучением – все они не обладают избирательностью воздействия на микроорганизмы и параллельно разрушают полезные вещества.

Ввиду того что электрические процессы лежат в основе живой материи и являются определяющими для любых микроорганизмов, исследователи обращают особое внимание на электрические методы воздействия на жидкие среды – наиболее перспективные в плане достижения «холодной» пастеризации и стерилизации.

Следует отметить, что вопросы контроля развития микроорганизмов в жидких средах представляют интерес не только для пищевой промышленности, но и для фармакологии, парфюмерно-косметической промышленности, виноделия, медицины и ветеринарии, коммунального хозяйства. Например, в медицине можно выделить задачу реализации потенциала электрических воздействий для уничтожения патогенных (канцерогенных) клеток в крови; в виноделии актуальны пастеризация сухих вин и исключение сернистого ангидрида как консерванта; в улучшении качества водоподготовки заинтересована любая отрасль и т.д. Во всех случаях электрообработки ставка делается на то, что живые клетки (в отличие от неклеточных структур) имеют уязвимое, жизненно важное место – клеточную мембрану.

Обобщение опыта электрических воздействий различной частоты на жидкие среды с целью достижения стерилизующего эффекта

Электрические воздействия на клетки находятся в центре внимания исследователей на протяжении многих лет [1–4].

Наиболее простой способ электрического воздействия на микроорганизмы плодово-ягодных соков – помещение продукта в электростатическое поле (например, плоского конденсатора). Однако электростатические поля, в том числе высоких напряжений, оказывают на жидкие среды слишком слабое воздействие. Наличие большого числа свободных зарядов (положительных и отрицательных ионов) в плодово-ягодных соках и высокая поляризованность воды (основного компонента соков) приводят к практически полной нейтрализации в объеме продукта внешнего электростатического поля любой реально достижимой напряженности. Смещение зарядов в электростатическом поле (с возникновением в поверхностном слое избытка заряда одного знака) не блокирует обменные процессы в микроорганизмах, находящихся в объеме жидкости. На фоне интенсивного теплового движения молекул и частиц коллоидного размера некоторое суммарное смещение зарядов остается «незамеченным». Впрочем, отсутствие заметной реакции на электростатические поля хорошо известно даже у

таких чувствительных и сложных организмов, каковым является организм человека и животных (например, у птиц, сидящих на высоковольтных проводах). В связи с этим не следует ожидать заметных эффектов и в случае приложения электростатических полей (пусть даже предельной напряженности) к микроорганизмам в жидких средах.

Иная ситуация возникает при пропускании электрического тока различной частоты через продукт-электролит, контактирующий с электродами.

Специальная литература содержит ссылки на использование переменного тока промышленной частоты (омического нагрева) для стерилизации жидких сред [5].

Для выявления специфического «нетеплового» воздействия тока промышленной частоты 50 Hz проделан цикл экспериментов по обработке плодово-ягодных соков синусоидальными токами. На рис. 1 показана ячейка-аппликатор, которая использовалась для электрической обработки цилиндрических образцов. (Аналогичная ячейка применялась в дальнейшем и для подачи на образцы высоковольтных импульсов.)

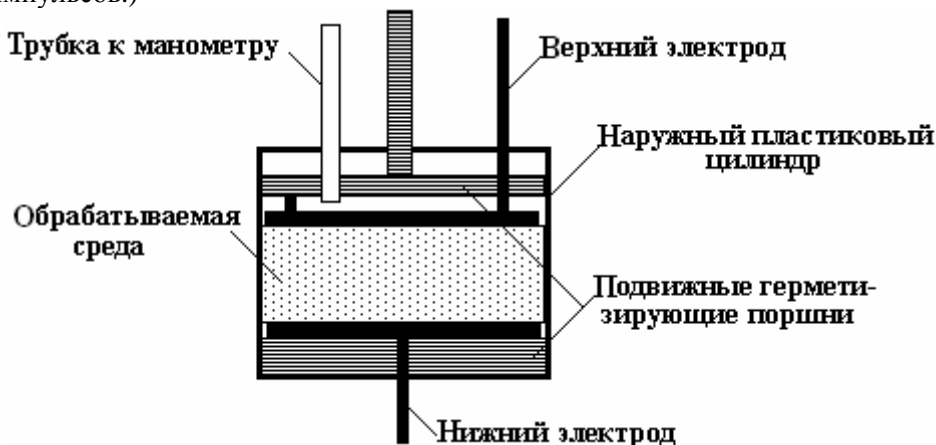


Рис. 1. Ячейка-аппликатор для электрической обработки цилиндрических образцов

Во всех опытах обработке подвергался одинаковый объем продукта, равный 1 ml. Толщина слоя (межэлектродное расстояние) составляла 1 см, и значения подаваемого на ячейку напряжения (V) численно совпадали с напряженностью внешнего (стороннего) электрического поля, подаваемого на образец (V/cm).

При прохождении постоянного электрического тока и тока промышленной частоты через плодово-ягодные соки наблюдается их омический нагрев, причём на электродах выделяются продукты электролиза (электролиз наиболее интенсивен при постоянном токе и ослабляется с ростом частоты).

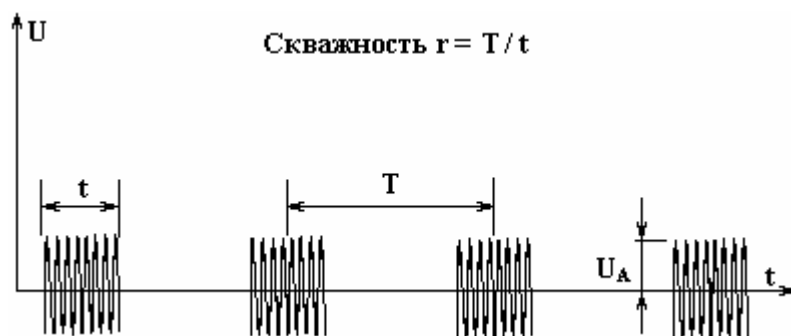


Рис. 2. Параметры, регулируемые при омическом нагреве токами промышленной частоты, амплитуда напряжения (U_A), длительность импульса (t), период следования импульсов (T), общее время обработки

Вариации амплитуды напряжения осуществлялись в пределах от 50 до 500 вольт. Период и сквжность подачи серий синусоидальных импульсов частотой 50 Hz (с огибающей в виде меандра) также регулировались (рис. 2).

Синхронно с амплитудой напряжения соответственно варьировались длительность включения синусоидальных колебаний и сквжность (посредством изменения периода следования импульсов), причём таким образом, чтобы сохранялась суммарная длительность процесса обработки и достига-

лась та же конечная температура продукта. После обработки образцы продукта быстро охлаждались до комнатной температуры.

В результате многочисленных опытов не выявлены какие-либо заметные отличия (изменения) за счёт вариации параметров воздействий: бактерицидный эффект оставался примерно одинаковым для данной конечной температуры - независимо от режима, по которому она достигалась.

Таким образом, просматривается достаточно строгая зависимость выжившей популяции микроорганизмов от количества выделившегося в образце тепла за счет омического нагрева. Это количество тепла (в условиях пренебрежимо малого теплообмена с окружающей средой) однозначно определяется конечной температурой образца, причем чем выше эта конечная температура, тем малочисленней (вплоть до полного необнаружения) популяция дрожжей или иных микроорганизмов. Косвенно такой результат свидетельствует в пользу отсутствия какого-либо заметного нетеплового (специфического) действия электрического тока частотой 50 Hz.

Для уточнения (дополнительной проверки) этого вывода (о слабости или полном отсутствии нетеплового действия электрического тока промышленной частоты в исследованных пределах напряжённостей электрического поля) была проведена серия опытов по нагреву образцов до заданных температур традиционным (кондуктивно-конвективным) нагревом. Конечные температурные параметры, а также длительность процесса оставались прежними, как в случае омического нагрева. В результате не выявлены какие-либо существенные преимущества (отличия) в конечных результатах, что свидетельствует о правильности вышеприведенного вывода.

Следует отметить, что даже и в отсутствие выраженного нетеплового эффекта при стерилизации жидких сред омический нагрев электрическим током обладает рядом важных достоинств по сравнению с традиционным кондуктивным нагревом. Электротехнология позволяет организовать безынерционную, равномерную по объему и без перепадов температур обработку продукта большой толщины, что недоступно для традиционного нагрева. Приэлектродные процессы, имеющие место при омическом нагреве, могут быть минимизированы или, при определённых условиях, обращены во благо (за счёт надлежащего выбора материалов электродов и других мер). Кроме того, массогабаритные, санитарно-гигиенические и другие характеристики электротехнологии предпочтительнее. Правда, технология «омической» стерилизации электрическим током предполагает потребление высокопотенциальной (а это значит - сравнительно дорогостоящей) электрической энергии. Однако данный недостаток может быть в значительной степени нейтрализован за счёт применения рекуперации тепла.

Можно полностью избежать влияния электродов (а заодно – и электролиза на них), применив для обработки жидких диэлектриков электромагнитные колебания сверхвысокой частоты, или микроволны. При сверхвысокой частоте (порядка $\sim 10^9$ Hz = 1 GHz) физическая картина аналогична вышеописанной для случая электростатических полей, но с существенной разницей – полярность (ориентация диполей и свободных зарядов) меняется с огромной частотой, что является причиной объемного диэлектрического нагрева среды, помещённой в СВЧ-поле. Поэтому логично использовать СВЧ-воздействие для стерилизации. Однако многочисленные эксперименты с СВЧ-полем [1] (к которым смело можно отнести и многолетний эксперимент планетарного масштаба с мобильной телефонной связью) показывают, что излучение диапазона СВЧ (помимо эффектов, связанных с диэлектрическим нагревом мощным излучением) вряд ли способно воздействовать на организмы даже на информационном уровне. (Кстати, земная атмосфера практически прозрачна для микроволн, и организм животных «знаком» с ними с самого рождения; не удивительно, что живые организмы обладают «иммунитетом» к слабым случайным СВЧ-сигналам, доходящим до нас из космоса. Несколько иная ситуация наблюдается в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, сильно поглощаемых атмосферой: для них доказана определенная информативность в сложных биологических средах - главным образом, как предполагается, за счет резонансного воздействия слабых электромагнитных излучений на воду.) Эксперименты по воздействию сверхвысоких частот на микрофлору (в том числе жидких сред) показали, что не существует какого-либо выраженного специфического (нетеплового, резонансного или иного типа) воздействия микроволн на микроорганизмы. Отсутствие на СВЧ заметных специфических (нетепловых) эффектов можно объяснить и малостью кванта СВЧ-излучения, если применить квантовый подход (например, при частоте $f = 3$ GHz энергия кванта микроволн равна всего лишь $E \sim 10^{-5}$ eV). “Мягкость” и однородность микроволновой термообработки даже способствует выживаемости микроорганизмов [1]. (Следует отметить, что СВЧ-газовая плазма определённого состава обладает уникальной стерилизующей способностью, но к поставленной задаче она отношения не имеет.)

Достоинством микроволнового нагрева, ощутимого в достаточно сильном СВЧ-поле, является его объемный характер, что можно с успехом использовать для обычной тепловой стерилизации любых диэлектриков (твердых или жидких). Electroды при СВЧ-нагреве никак не влияют на продукт – контакт нагреваемой среды с ними не требуется.

Таким образом, «традиционные» способы электрических воздействий не позволяют рассчитывать на осязаемый нетепловой, специфический эффект стерилизации.

Обоснование целесообразности применения для пастеризации высоковольтных электрических импульсов

Ниже приводится обоснование режимов, при которых с большей вероятностью возможно получение нетеплового эффекта при электрических воздействиях на жидкие среды с целью пастеризации (инактивации имеющихся в них вегетативных клеток микроорганизмов). Суть предложений состоит в минимизации эффекта омического разогрева, неизбежно присутствующего при пропускании тока через плодово-ягодные соки.

Плодово-ягодные соки – в данной работе предмет исследования электрических воздействий с целью пастеризации - представляют собой водные электролиты с различными включениями, обычно коллоидального размера. Из большого числа включений наибольший интерес, в контексте решаемой задачи, представляет поведение в электрическом поле дрожжевых клеток и плесеней, вызывающих порчу плодово-ягодных соков. Результат электрического воздействия определяется его параметрами, а также удельной электропроводностью и другими свойствами обрабатываемой среды (включая микроорганизмы). Электропроводность электролитной среды зависит главным образом от концентрации подвижных ионов противоположных знаков. Представление о порядке величины удельного сопротивления плодово-ягодных соков можно составить на основе анализа справочных данных из табл.1. Удельное сопротивление плодово-ягодных соков сильно зависит от концентрации ионообразующих компонентов и приближается по данному показателю к морской воде.

Таблица 1. Удельные сопротивления модельных жидких сред при комнатной температуре (20 °С)

Электропроводящая среда	Удельное сопротивление, $\Omega \times m$
Вода дистиллированная	$10^3 - 10^4$
Вода речная (водопроводная)	$10^1 - 10^2$
Плодово-ягодные соки	2–8
Вода морская	0,3

С ростом температуры удельные сопротивления плодово-ягодных соков уменьшаются примерно по линейному закону (что обусловлено главным образом увеличением степени диссоциации, а также разрушением сольватных оболочек). Способствует снижению удельного сопротивления плодово-ягодных соков и нарушение структуры вегетативных клеток микроорганизмов (что и является целью рассматриваемого воздействия), однако выделение (идентификация) данной составляющей роста проводимости среды представляет собой самостоятельную задачу.

Обработку продуктов целесообразно вести в плоском конденсаторе, проводящие обкладки которого (металлические, графитовые) контактируют с жидкостью. Однородность поля плоского конденсатора позволяет рассчитывать на соответствующую однородность (равномерность по объёму) обработки жидкого продукта.

На низких частотах и постоянном токе (в отличие от сверхвысоких частот) определяющее значение имеют процессы на контактирующих с жидкой средой электродах (образование двойного электрического слоя и электролиз).

Суммарное напряжение на ячейке (плоском конденсаторе) может быть представлено следующим образом:

$$U = \varphi_e^a + \varphi_e^c + \eta_a(i) + \eta_c(i) + I \times R, \quad (1)$$

где φ_e^a и φ_e^c – равновесные потенциалы соответственно анода и катода (определяются электрохимическими свойствами пары электрод-раствор, устанавливаются при наличии контакта электрода с раствором); $\eta_a(i)$ и $\eta_c(i)$ – потенциалы перенапряжения соответственно на аноде и катоде; $I \times R$ – падение напряжения в объёме обрабатываемой среды.

Компоненты правой части уравнения (1), исключая равновесные потенциалы, взаимозависимы. При подаче напряжения на ячейку по цепи течет емкостной ток формирования двойного электрического слоя (ДЭС) на электродах (рис. 3). Данный емкостной ток, имеющий наибольшее значение в момент включения напряжения, убывает по мере зарядки (формирования) двойного электрического слоя с постоянной времени $\tau \sim RC$, где R – удельное электрическое сопротивление току зарядки

двойного электрического слоя, C – удельная электрическая ёмкость ДЭС. Оценку значения удельной (в расчете на 1 cm^2 площади электрода) электрической емкости C двойного электрического слоя можно произвести по известной формуле для емкости плоского конденсатора:

$$C = \varepsilon_0 S / d = 0.885 \times 10^{-11} \text{ F/m} \times 10^{-4} \text{ m}^2 / 10^{-9} \text{ m} = 10^{-6} \text{ F} = 1 \text{ } \mu\text{F} \quad (2)$$

Таким образом, оценка приводит к весьма значительной величине удельной электрической емкости ДЭС – несколько микрофарад: $C \sim n \times 1 \text{ } \mu\text{F/cm}^2$, что близко к реальности. (Измерение емкости двойного электрического слоя возможно, например, с помощью моста переменного тока, но выходит за пределы задач данного материала.) В специальных условиях емкость двойного электрического слоя может иметь и значительно большее значение, что сегодня активно используется при создании современных высокоёмких конденсаторов («суперконденсаторов») [6].

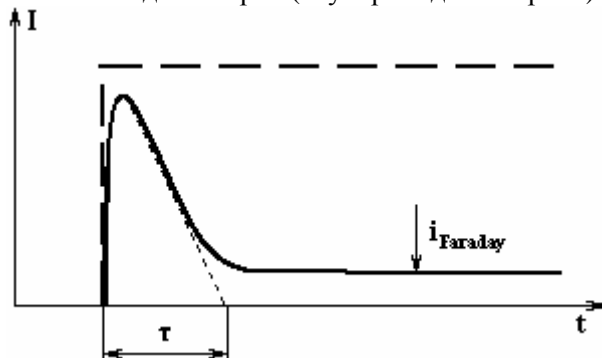


Рис. 3. Форма тока через ячейку при подаче на нее ступенчатого напряжения

Обычно постоянная времени формирования ДЭС τ составляет доли миллисекунды [7]. Это означает, что при подаче на ячейку монополярного импульса длительностью менее 1 миллисекунды (или импульсов переменной полярности с частотой выше 1 kHz) преобладающим будет ток формирования двойного электрического слоя, при минимальном фарадеевском токе электролиза.

С задержкой по фазе по отношению к реактивному току зарядки двойного электрического слоя происходит рост активного фарадеевского тока электролиза, образующего замкнутую цепь. При этом на катоде происходит восстановление ионов или молекул из раствора за счет поглощения ими электронов с катода (например, катионами: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$), а на аноде – окисление ионов или молекул за счёт передачи электронов аноду (например, анионами: $4\text{OH}^- = 4\text{e}^- + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$). Упомянутый электролиз воды (основной компоненты плодово-ягодных соков) – это наиболее безвредный для продукта процесс, наблюдаемый на электродах. Однако нельзя не учитывать идущие на катоде процессы восстановления ионов (например, железа, остающегося в результате в растворе: $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$, или меди, осаждающейся на катоде из раствора: $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cu}$), а также идущие на аноде процессы окисления ионов и молекул, находящихся в электролите либо составляющих материал анода (например, растворение медного анода: $\text{Cu} = \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$). Если вышеупомянутый процесс растворения анода относительно легко блокируется применением инертных материалов при изготовлении анода (графита, окислов некоторых металлов, платины), то остальные процессы, влияющие на состав обрабатываемой среды и органически присущие процессу электролиза, сложно нейтрализовать.

Как следует из предыдущего изложения, уменьшить влияние электролиза можно за счёт роста частоты подаваемого на ячейку переменного напряжения (или укорочения длительности импульса – при использовании монополярного импульса). Для стерилизации жидкой среды (при этом целью является воздействие на микроорганизмы в объёме жидкости, а приэлектродные процессы электролиза являются вредными побочными процессами, лишь преобразующими часть электрической энергии в тепло и изменяющими состав соков) целесообразно применить достаточно короткие, с крутыми фронтами и максимально возможной амплитудой импульсы с изменяющейся полярностью. Между пакетами таких импульсов могут быть сознательно задаваемые перерывы – см. пример на рис. 4 (пары разнополярных импульсов, следующие друг за другом с определенной скважностью). Импульсы переменной полярности предпочтительны, так как они способствуют прохождению электролиза в обратном направлении (а значит, ликвидации ненужных образовавшихся продуктов электролиза), при одновременном росте перепада напряжения $I \times R$ и соответственно емкостного тока, протекающего через объем жидкого продукта.

Следует отметить, что вышеописанный рецепт избегания электролиза *de facto* апробирован при радиочастотной электрохирургии: диатермические установки (радиотомы) работают на частоте свыше 100 kHz (на практике это 300 kHz – 5 MHz) именно ввиду того, что меньшая частота воздей-

ствия вызывает заметный электролиз в клетках мышц и нервных окончаний, что проявляется в стимуляции и непроизвольных сокращениях. Естественно, что во избежание этих нежелательных и крайне опасных при электрохирургических вмешательствах эффектов выбираются соответствующие высокие частоты.

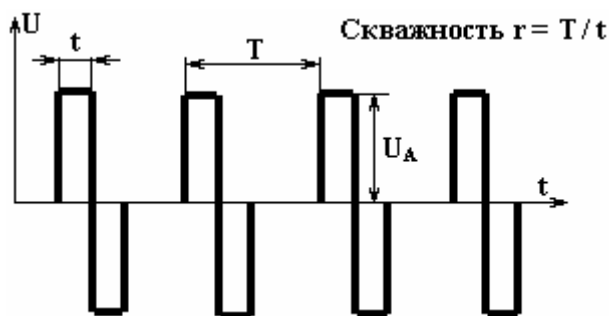


Рис. 4. Регулируемые параметры высоковольтных импульсов (амплитуда напряжения импульса, длительность импульса, период следования импульсов, общее время обработки)

Амплитуда напряжения импульса U_A должна выбираться максимально достижимой, на грани лавинообразных пробоев (во внешней цепи или в жидкости), что позволяет надеяться на порацию (пробой, повреждение) мембран клеток микроорганизмов: большое значение падения напряжения $I \times R$ в целом на ячейке означает одновременно и увеличение падения напряжения на любом микрообъекте в объеме жидкости, включая мембраны вегетативных клеток микроорганизмов.

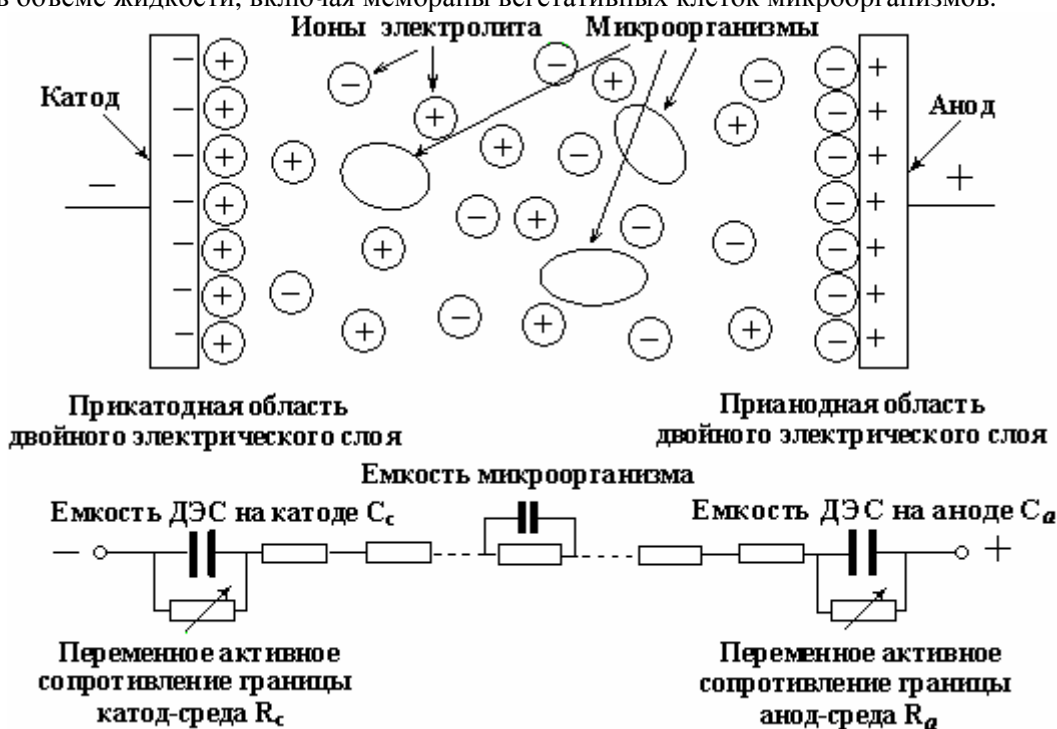


Рис. 5. Распределение зарядов на ячейке (соответствует сформированному ДЭС) и эквивалентная электрическая схема ячейки

Вышеприведенные рекомендации иллюстрируются рис. 5, где совместно представлены процессы в ячейке и эквивалентная электрическая схема ячейки. Применимость закона Ома к рассматриваемой цепи не вызывает сомнения, несмотря на наличие разрывов (токов смещения) на конденсаторах, ибо токи в цепи остаются квазистационарными – благодаря тому, что токи смещения концентрируются лишь между “обкладками” конденсаторов. Активное сопротивление объема продукта показано распределенным, причем в местах расположения микроорганизмов данное сопротивление шунтируется электрической емкостью клетки. Клетки дрожжей, использованные при экспериментах, представляют собой овальные (яйцевидные) структуры длиной 8–10 μm , шириной 2–7 μm , ограниченные плазматической мембраной с избирательной проницаемостью. При достаточно большой амплитуде и крутизне электрического импульса возможен пробой (порация) мембраны одноклеточного организма. Активное сопротивление границы электрод-среда (R_c и R_a соответственно на катоде и аноде) возрас-

тает от практически нулевого значения в момент подачи импульса до относительно большого постоянного установившегося значения после окончания зарядки конденсаторов двойного слоя (соответственно при этом практически все приложенное к ячейке напряжение падает вблизи электродов). Максимальная крутизна переднего и заднего фронтов импульсов – обязательное условие минимизации теплового эффекта (омического нагрева) в обрабатываемой среде. Уместно сравнить потенциальный эффект таких крутых импульсов с действием гармонических (синусоидальных) токов промышленной частоты: «мягкий» режим постепенного изменения напряжения с частотой колебаний 50 Hz гораздо более приемлем для выживания живых клеток, чем подача «шоковых» импульсов большой амплитуды.

Оптимальную длительность импульса t (см. рис. 4) можно обосновать, проанализировав форму тока через ячейку при подаче на неё ступенчатого напряжения (рис. 3). Как было отмечено выше, постоянная времени зарядки двойного электрического слоя $\tau \sim 10^{-4}$ секунды, или $\sim 100 \mu\text{s}$. Именно во время протекания емкостного тока зарядки «потери» на приэлектродный электролиз минимальны, при максимальном токе и падении напряжения в объеме образца. Однако значение $t_{\text{opt}} \sim 100 \mu\text{s}$ – ориентир, оценочное значение, которое следует уточнить (установить) экспериментально.

Оптимальный период следования импульсов T , а также общее время обработки, по-видимому, целесообразно определить экспериментально, так как они зависят от физиологических особенностей конкретных микроорганизмов.

Экспериментальный поиск режимов пастеризации плодово-ягодных соков высоковольтными электрическими импульсами

Следует отметить возросшее в последнее время число публикаций, посвященных применению высоковольтных импульсов для воздействий на биологические клетки [8–16].

При этом, на фоне многообразия форм клеток и обилия регулируемых параметров, механизм воздействий до конца не выяснен, чем и объясняется неоднозначность результатов, сообщаемых различными авторами, а также необходимость продолжения исследований.

Электрическая схема, примененная в экспериментах по обработке продукта (яблочного сока) высоковольтными монополярными импульсами, приведена на рис. 6 (конструкция ячейки-аппликатора для электрической обработки цилиндрических образцов показана на рис. 1). Она позволяет регулировать напряжение, подаваемое на аппликатор, в пределах от 0 до 6500 вольт. Как было аргументировано выше, рост амплитуды импульса при крутых переднем и заднем фронтах повышает вероятность повреждения вегетативных клеток микроорганизмов. Большее напряжение на ячейке (и соответственно напряженность электрического поля в обрабатываемой среде) технически достижимо, но с определенным усложнением установки (перспектива увеличения напряженности электрического поля, равно как и совершенствование формы импульса, в будущих экспериментах сохраняется). Однако уже при напряженности электрического поля в среде $E = 5 \text{ kV/cm}$, в режиме емкостного тока падение напряжения на микроорганизмах (их средний оценочный размер – около $10 \mu\text{m}$) составляет 5 вольт, что существенно больше естественной разности потенциалов на мембране клетки (она не превышает 100 mV , при этом внутренняя сторона мембраны в состоянии покоя заряжена отрицательно, внешняя – положительно). Такое превышение уже может привести к повреждению мембраны.

Ячейка гальванически развязана от сети с помощью повышающего высоковольтного трансформатора. Ограничительное сопротивление $R_{\text{огр}}$ подбирается из условий допустимого тока через высоковольтный выпрямительный диод D и приемлемой постоянной времени τ зарядки накопительного конденсатора $C_{\text{накоп}}$, при этом $\tau = R_{\text{огр}} \times C_{\text{накоп}}$. Амплитудное значение тока при прохождении импульса через ячейку (ее среднее сопротивление для выбранного объекта составляет около 200Ω) можно оценить в 25 ампер. Также несложно подсчитать количество энергии, выделяющейся в обрабатываемом образце за один импульс. При $C_{\text{накоп}} = 1 \mu\text{F}$, $U = 6,5 \text{ kV}$ получаем

$$E = C_{\text{накоп}} \times U^2 / 2 = 21 \text{ J}. \quad (3)$$

Такое тепловыделение (для $C_{\text{накоп}} = 1 \mu\text{F}$) соответствует темпу нагрева около 3 градусов за импульс, что и подтвердили экспериментальные данные. Мощность разряда в импульсе достигает больших величин ($P_{\text{max}} = U_{\text{max}} \times I_{\text{max}} = 6,5 \text{ kV} \times 25 \text{ A} = 162,5 \text{ kW}$), соответственно максимальная удельная мощность в опытах составляла $p_{\text{max}} = 162,5 \text{ kW/cm}^3$. Причем эта величина максимальной удельной мощности разряда – далеко не предел возможностей: с учетом того, что $p_{\text{max}} \sim U^2$, а значение напряжения на ячейке может быть увеличено по крайней мере в 10 раз (даже без создания специальной атмосферы), технически вполне достижимо значение $p_{\text{max}} \sim 10 \text{ MW/cm}^3$. Однако при чрезмерно больших p_{max} наблюдается явление «взрыва» ячейки (в тех случаях, когда из-за неравномерности распределения тока по площади электродов происходят локальный перегрев и газовыделение) с последую-

щим развитием лавинообразного пробоя. Такое одновременное адиабатическое выделение всей накопленной энергии в очень малом объеме приводит к резкому росту давления в ячейке.

(К счастью, механизм формирования двойного электрического слоя включает в себе и механизм выравнивания неоднородностей, что позволяет, при условии соблюдения достаточной параллельности электродов и подавлении газоотделения, создавать на ячейке большие напряженности - порядка 50 kV/cm.)

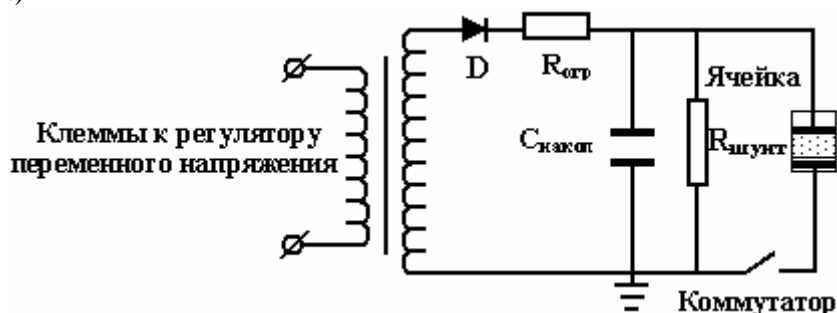


Рис. 6. Электрическая схема подключения ячейки-аппликатора к генератору униполярных импульсов

В момент замыкания коммутатора на ячейку подается напряжение, близкое к амплитудному значению переменного напряжения на вторичной обмотке повышающего трансформатора ($U_m \sim 6,5 \text{ кВ}$). Теоретическая форма импульса тока на образце показана на рис. 7. Она соответствует условно неизменному (среднему) значению $R_{\text{ячейки}} = 200 \text{ }\Omega$. Легко убедиться, что при этом кривая убывания тока

$$I = \frac{U}{R_{\text{ячейки}}} \exp[-t/(R_{\text{ячейки}} \times C_{\text{накоп}})] \quad (4)$$

подчиняется экспоненциальному закону. На практике установлено, что удельное сопротивление среды в ячейке по мере прохождения тока (и соответственно разогрева) уменьшается. Этот факт отражен на реальной кривой тока через ячейку (на рис.7 показана тонкой линией). Постоянная времени разряда конденсатора $C_{\text{накоп}}$ через ячейку подсчитывается по формуле $\tau = R_{\text{ячейки}} \times C_{\text{накоп}}$, и при $R_{\text{ячейки}} = 200 \text{ }\Omega$, $C_{\text{накоп}} = 1 \text{ }\mu\text{F}$ получаем $\tau = 200 \text{ }\mu\text{s}$. (Как следует из предшествующего анализа, при такой τ фарадеевский ток электролиза пренебрежимо мал.) Из приведенной формулы видно, что с ростом накопительного конденсатора $C_{\text{накоп}}$ время действия (длительность) импульса увеличивается, также возрастает и энергия импульса. Поэтому на практике возникает ограничение на величину накопительного конденсатора: при слишком большой ёмкости, ввиду развития неустойчивостей (неравномерностей) протекания тока в объеме образца, происходит лавинообразный пробой жидкой среды. (Наибольшее значение емкости накопительного конденсатора, которое удалось использовать в экспериментах, $C_{\text{накоп}} = 4 \text{ }\mu\text{F}$.)

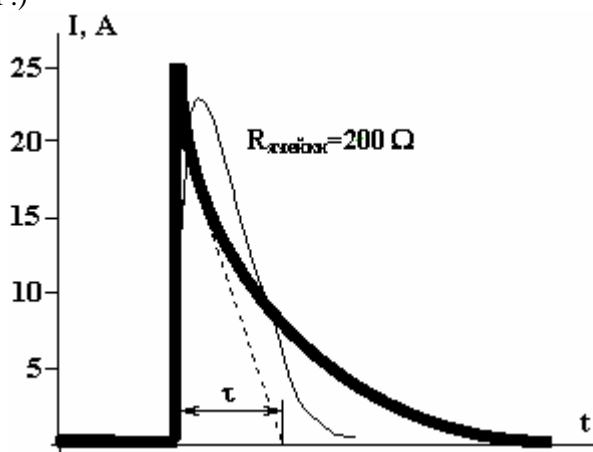


Рис. 7. Идеальная (теоретическая) кривая изменения тока через ячейку при $R_{\text{ячейки}} = 200 \text{ }\Omega$ (экспонента, показана жирной линией) и полученная из экспериментов форма кривой тока

Непосредственно перед опытами стерильный яблочный сок инфицировался дрожжевыми клетками (*Saccharomyces vini*) до известной обсемененности. После проведения обработки, при разных степенях разведения, подсчитывалось число проросших колоний – по стандартной методике микробиологических исследований.

Результаты проведенных экспериментов по воздействию на яблочный сок электрическими импульсами высокого напряжения с большой крутизной переднего фронта сводятся к нижеследующему (см. типичный пример обработки – табл. 2).

Уже при температурах ниже 40⁰С заметно определённое угнетение микрофлоры. С ростом числа приложенных импульсов популяция микроорганизмов уменьшается, вплоть до полного отсутствия роста.

Заметим, что при традиционном нагреве на водяной бане при таких же температурах, напротив, наблюдается стимуляция роста дрожжей. При конечной температуре продукта ниже 50⁰С воздействием электрических импульсов удается получить стерильный продукт. (При традиционном нагреве такой эффект для дрожжей *Saccharomyces vini* наблюдается вблизи температуры 60⁰С и при значительно большей выдержке.)

Таблица 2. Результаты обработки осветлённого яблочного сока электрическими импульсами (период следования импульсов $T = 5$ s)

Амплитуда напряжения, kV	Число импульсов	Емкость накопит. конд. $C_{\text{накоп}}$, μF	Длительность экспер., s	Начальная темп., $^{\circ}\text{C}$	Конечная темп., $^{\circ}\text{C}$	Обсемененность, $\text{КоЕ}/\text{cm}^3$	
						Дрожжи	Плесени
Титр инфицированного сока						3×10^5	1×10^3
6,5	10	0,125	50	21,1	26,3	3×10^4	$1,5 \times 10^2$
6,5	20	0,125	100	23,3	31,7	6×10^3	$1,0 \times 10^2$
6,5	32	0,125	160	20,5	29,7	$2,5 \times 10^3$	4×10^1
6,5	40	0,125	200	19,0	31,0	$2,3 \times 10^3$	3×10^1
6,5	50	0,125	250	20,5	33,1	$3,2 \times 10^2$	Нет роста
6,5	50	0,125	250	20,6	33,8	$2,2 \times 10^2$	Нет роста

С целью оптимизации режимов обработки и уточнения механизма воздействия были проведены эксперименты с переменными значениями накопительного конденсатора $C_{\text{накоп}}$ (переменными значениями энергии в импульсе и длительности импульса). Как следует из предыдущего изложения, увеличение $C_{\text{накоп}}$ позволяет увеличить мощность и суммарную энергию в импульсе, но одновременно сокращает возможное число подаваемых импульсов (и соответственно уменьшает время обработки). Против всяких ожиданий увеличение мощности импульса оказалось непродуктивным: микроорганизмы, по нашим данным, оказались более чувствительны к многократным, хотя и более коротким импульсам (при одинаковой суммарной вложенной энергии). Таким образом, уменьшение энергии импульса при соответствующем увеличении длительности обработки положительно сказывается на результате.

Исходя из приведенных результатов можно предположить, что, наряду с факторами температуры и времени обработки, важна крутизна фронтов импульса (правда, при этом, как видно на рис. 7, в вышеописанных опытах обеспечена крутизна лишь переднего фронта, что сохраняет перспективу улучшения показателей в последующем за счёт более крутого и заднего фронта). Прежде всего именно крутизной переднего фронта данная импульсная обработка отличается от ранее проведенной обработки токами промышленной частоты, при которой напряжение менялось плавно, по синусоидальному закону.

Можно констатировать определенное преимущество электрической обработки жидких сред с целью инактивации микроорганизмов высоковольтными импульсами в сравнении с обработкой токами промышленной частоты и традиционным нагревом. При этом необходимо выяснить точный механизм воздействий и оптимизировать их режимы.

Выводы. Обработка жидких сред высоковольтными электрическими импульсами позволяет добиться инактивации микроорганизмов при более низких температурах и за более короткое время

выдержки в сравнении с традиционными тепловыми методами пастеризации, что способствует лучшей сохранности термолабильных компонентов продуктов. Сказанное позволяет позиционировать воздействия высоковольтными электрическими импульсами на жидкие среды как перспективный метод инактивации микрофлоры жидких сред с минимальным термическим повреждением продуктов. Однако оптимизация воздействий (по амплитуде напряженности электрического поля, форме и длительности импульса, периоду следования импульсов, общему времени обработки) необходима для каждого продукта в отдельности, что обусловлено огромным разнообразием и соответственно различной чувствительностью клеточных структур к электрическим воздействиям. Заслуживает специального изучения чувствительность ферментов и других компонентов продукта к различным режимам. Недостаточно доказательных данных и для гарантирования безопасности (сертификации) продуктов, прошедших обработку высоковольтными импульсами. Для обеспечения внедрения метода необходимо продолжение исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kostak B.* Bacterial considerations in microwave foods // *Food Engineering*. June 1990.
2. *Sastry S.K.* Moderate electric field treatments for enhancement of bioprocesses. Proceedings of the International Conference // "Energy-saving technologies for drying and hygrothermal processing", Moscow, 2002, v.3, p. 40–47.
3. *Лазаренко Б.Р., Роцин В.П., Абрамова Р.В., Яворская Р.И.* Влияние электрических воздействий на микроорганизмы // *Электронная обработка материалов*. 1968. № 5. С. 79–84.
4. *Гулый И.С., Украинец А.И., Дебелинский С.Н., Ботошан Н.И., Чебану В.Г., Ковбаса В.Н., Берзой С.Е.* Воздействие электростатического поля высоких напряжений на физико-химические свойства пива // *Электронная обработка материалов*. 1991. № 4. С. 50–55.
5. *Яровой П.И., Чебану В.Г., Станку М.Л., Щеглов Ю.А., Ягина В.С., Григоращенко Т.В., Маркитан Л.И.* Обеззараживание сточных вод переменным электрическим током // *Электронная обработка материалов*. 1985. № 6. С. 76–78.
6. *Joel Schindall.* The Charge of the Ultra - Capacitors // *IEEE Spectrum*, November 2007.
7. *Гамбург Ю.Д.* Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов. М.: Янус-К, 1997.
8. *Barbosa-Canovas G.V., Qin B.L., Swanson B.G. (Eds.)*. Biological effects induced by pulsed electric fields of high intensity // *Rodrigo M., Martinez A., Fiszman S.M., Mateu A. (Eds.)*. *Technologias avanzadas en esterilizacion y seguridad de alimentos y otros productos*, p. 151-165, Spain, «Grafo ipresores», 1996.
9. *Wouters P.C., Smelt J.P.* Inactivation of microorganisms with pulsed electric fields: potential for food preservation // *Food Biotechnology*. 1997. V. 11. P. 193–239.
10. *Andersbach A, Heinz V, Knorr D.* Effects of pulsed electric fields on cell membranes in real food systems // *Innov. Food Sci. & Emerg. Technol.*, 2000, Nb.1, p. 135–149.
11. *Barbosa-Canovas G.V., Pierson M.D., Zhang Q.H., Schafner D.W.* Pulsed electric fields // *J. Food Sci.*, 2000, v.65 (supplement), p. 65–79.
12. *Ade-Omowaye B.I.O., Andersbach A, Taiwo K.A. and Knorr D.* Use of pulsed electric field pretreatment to improve dehydration characteristics of plant based foods // *Trends in Food Science & Technology*, 2001, v.12, p. 285–295.
13. *Васильев Г.М., Васецкий В.А., Васильева Э.М., Ганжа В.Л.* Электроимпульсная технология пастеризации молока // *Энергоэффективность*. 2001. №9. С.12–13.
14. *Hasegawa Hideo, Takeda Koji, Matsuzoe Soichi, Ueki Yutaka, Tamura Toshiuki.* Стерилизация с использованием пульсирующего высокого напряжения // *San'yo denki gihou= Sanyo Technical Rev.* 2001. V. 32. № 2. P. 92–100.
15. *Bendicho S., Barbosa-Canovas G.V. and Martin O.* Milk processing by high intensity pulsed electric fields // *Trends in Food Science & Technology*. 2002. V. 13. P. 195–204.
16. *Бажал М.И., Нгади М.О., Рагаван Ж.С.В.* Синергическое воздействие давления и импульсного электрического поля на прессование растительной ткани // *Электронная обработка материалов*. 2003. № 3. С. 59–66.

Поступила 11.08.08

Summary

High field-strength electric impulses of proper duration and frequency can affect vegetative microorganisms in liquid mediums. This method is a promising one for non-thermal treatment of thermolabile products. The optimal parameters of pulse processing are determined on the base of physical processes examination. Effect of non-thermal inactivation is confirmed experimentally.