

Высоковольтная технологическая установка по электронной обработке текучих пищевых продуктов в порционном режиме

Э. Д. Гурбанов

ОАО "Азерсу",
Московский проспект, 67, г. Баку, AZ 1012, Азербайджанская Республика,
e-mail: KurbanovEJ_mpei@mail.ru

Исследуется разработка высоковольтных электроимпульсных установок по электронно-ионной обработке текучих пищевых продуктов в порционном режиме в готовой упаковочной таре под воздействием сильных электромагнитных полей с целью инактивации микроорганизмов, содержащихся в них, и продления сроков их хранения. Приведена методика расчета и согласования основных параметров импульсного источника питания и нагрузки (обрабатываемого продукта в таре) для более эффективного приложения энергии источника на нагрузку. Выявлено, что с уменьшением фронта импульса (единицы наносекунд) и увеличением его амплитуды можно достичь оптимальных режимов обработки с наименьшими удельными энергозатратами без предварительного нагрева продукта в теплообменнике.

Ключевые слова: высоковольтная установка, генератор импульсных напряжений, фронт импульса, длительность импульса, текучий пищевой продукт, электромагнитное поле, рабочая камера, разрядный промежуток, инактивация микроорганизмов, продление сроков хранения.

УДК 537.528

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе научно-технического прогресса все большее внимание уделяется развитию высокотехнологичных методов обработки различных сред и материалов, среди которых методы электронно-ионной активации сильными электромагнитными полями занимают приоритетное положение [1–3]. Они обладают целым рядом положительных характеристик, таких как низкая температура нагрева обрабатываемой среды, максимальный вклад энергии в активационные процессы и соответственно низкие удельные энергозатраты, не присущие другим общеизвестным методам обработки [4–6].

В этом контексте научно-исследовательские работы, направленные по разработку высоковольтных высокочастотных электроимпульсных устройств с целью энергоэффективного решения многих промышленных задач, вызывают у ученых огромный интерес. С участием автора опубликовано достаточное количество работ по электроимпульсной очистке газовых выбросов вредных производств, обеззараживанию питьевой и сточных вод, водосодержащих сред от патогенных микроорганизмов [7–12].

Наблюдаемый переход от низкочастотных методов электронно-ионной обработки различных сред и материалов к сверхвысокочастотным вызван в силу ряда причин, оснополагающей из которых является максимально полезное приложение энергии источника на нагрузку. В этой связи правильный учет и согласование основных

параметров источника энергии и нагрузки при разработке высокотехнологичного оборудования имеют важное значение. К числу таких установок можно отнести также оборудование по высоковольтной электроимпульсной обработке текучих пищевых продуктов, где в качестве источника энергии применяются высоковольтные генераторы импульсных напряжений, а нагрузки – рабочие камеры с пищевым продуктом.

В предлагаемой статье рассматриваются особенности технологических процессов по электронно-ионной обработке текучих пищевых продуктов в порционном режиме с целью инактивации в них патогенных микроорганизмов и продления сроков их хранения, а также методика расчета основных взаимовлияющих параметров установки. В качестве нагрузки импульсного генератора используются рабочие камеры оригинальной конструкции с содержащимся в них обрабатываемым пищевым продуктом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В статье рассматриваются два варианта порционной электроимпульсной обработки текучих пищевых продуктов: а) при наличии гальванического контакта (проводящего электрода) между разрядным промежутком и обрабатываемым продуктом и б) при электроимпульсной обработке упаковочной тары с содержащимся внутри пищевым продуктом. Схемы обоих вариантов представлены на рис. 1. В рассматриваемых случаях в качестве источника высоковольтных

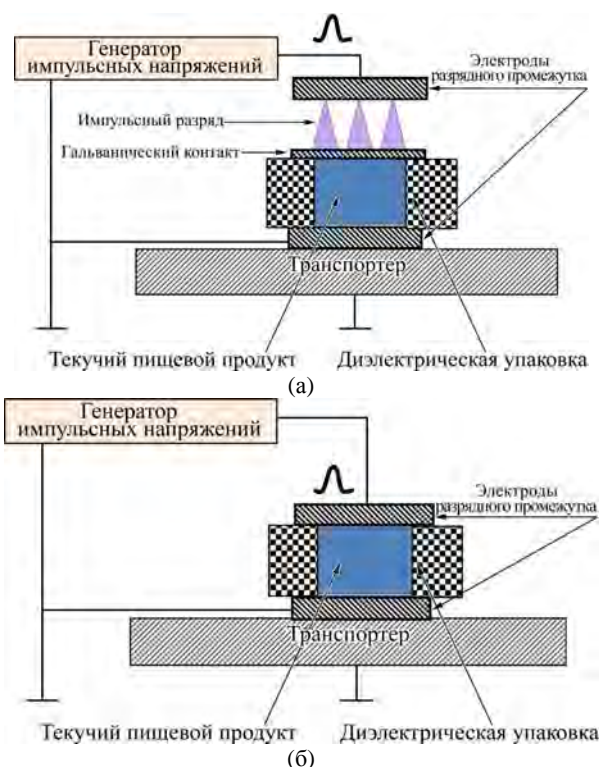


Рис. 1. Схема электроимпульсной обработки текучих пищевых продуктов в готовой упаковочной таре на технологической линии.

импульсных воздействий применяются разработанные нами генераторы импульсных напряжений, исполненные по различным электрическим схемам: а) на основе высоковольтного повышающего трансформатора на переменном напряжении с искровыми воздушными разрядниками и б) на основе тиристорного генератора и импульсного трансформатора с обостряющим многозачерным искровым разрядником на выходе.

Рассмотрим вначале 1-й вариант технологической линии, когда производится электроимпульсная обработка текучих пищевых продуктов при наличии гальванического контакта между разрядным промежутком и исследуемым объектом (рис. 1а). При помощи транспортеров рабочие камеры с обрабатываемым продуктом подаются к электродной системе на выходе высоковольтного генератора импульсных напряжений. Когда рабочая камера находится в пределах электродной системы, осуществляется подача на нее высокого импульсного напряжения и в межэлектродном пространстве зажигается электрический разряд. После прекращения электронно-ионной обработки тары с продуктом транспортеры отводят рабочую камеру с продуктом из разрядной зоны и подводят туда очередную рабочую камеру с водосодержащей средой.

Представленная порционная обработка (при наличии гальванического контакта) обычно используется в лабораторных исследованиях, когда требуется обработать малое количество того или иного продукта. Основным ее преимуществом

является то, что после такой обработки продукт может содержаться в рабочей камере, как в упаковке, и быть извлечен из нее лишь в требуемый момент. Для применения данной технологии в массовом масштабе необходимо решить следующие задачи:

- определить с материалом (должен иметь высокую электрическую прочность) и его себестоимостью (с приемлемой ценой для потребителя);
- обеспечить минимальные удельные энергозатраты при условии отсутствия дополнительных теплообменников, что является непростой задачей;
- предотвратить вторичное заражение пищевого продукта микроорганизмами при перемещении его в другой сосуд, если опытная рабочая камера не является упаковочной тарой;
- принять меры по предотвращению пробоя внешнего корпуса камеры при отклонении ее от требуемого безопасного рабочего положения в электродном промежутке.

Схема технологического процесса по электроимпульсной обработке текучих пищевых продуктов в упаковочной таре представлена на рис. 1б. Диэлектрическая тара с исследуемым текучим пищевым продуктом подается в разрядный промежуток (между плоскопараллельными электродами) высоковольтного импульсного генератора, где происходит ее обработка сильными электромагнитными полями. При таком воздействии на объект сильные высокочастотные

электрические поля способны проникнуть в глубь продукта. Электромагнитные волны содержат широкий непрерывный спектр частот, благодаря чему пищевой продукт в диэлектрической таре может достаточно равномерно обрабатываться без его перемешивания путем встряхивания тары, так как разные частоты имеют различную глубину проникновения в продукт. Кроме того, помимо традиционного высокочастотного и сверхвысокочастотного нагрева появляется новый действующий фактор – высокая напряженность импульсного электрического поля, которая позволяет снизить требуемый для эффективной обработки нагрев, а в пределе и вовсе его исключить. Многократная поляризация и деполяризация биомолекул, органелл микроорганизмов при воздействии коротких широкополосных импульсов сильного электрического поля могут оказаться эффективным инактивирующим фактором.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для правильной разработки высоковольтного технологического оборудования по электронно-ионной обработке текучих пищевых продуктов в проточном и порционном режимах сильными электромагнитными полями нужны учет и согласование всех взаимовлияющих параметров как в высоковольтной, так и в низковольтной (нагрузочной) части схемы. В статье мы рассмотрим основные параметры технологической установки по обработке пищевых продуктов в готовой упаковочной таре, учет которых необходим при ее разработке.

Схема замещения разрядной цепи при наличии в разрядном промежутке упаковочной тары с продуктом представлена на рис. 2. При расчете учитываются как электрофизические параметры тары, так и обрабатываемого продукта. На схеме рабочая камера замещается конденсатором, диэлектриком которого служит обрабатываемый продукт (рис. 2).

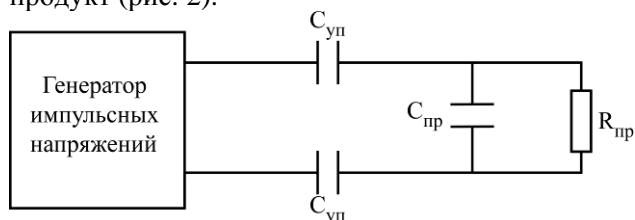


Рис. 2. Схема замещения разрядной цепи: $C_{уп}$ – емкость стенки упаковочной диэлектрической тары; $R_{пр}$, $C_{пр}$ – активное сопротивление и емкость обрабатываемого продукта в таре.

Выделяемая мощность P в единичном объеме продукта определяется из соотношения [13]:

$$P = 2\pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot \varepsilon' \cdot \operatorname{tg}\delta, \quad (1)$$

где f – частота электромагнитного поля; E – напряженность электрического поля;

ε' – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости среды; $\operatorname{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

По мере распространения электромагнитной волны от поверхности вещества в глубь продукта мощность ее уменьшается по экспоненциальному закону [14]:

$$P_x = P \cdot e^{-\alpha x}, \quad (2)$$

где P_x – мощность на расстоянии x от поверхности вещества; P – мощность на поверхности вещества; α – коэффициент затухания:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[\frac{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1}{2} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве.

Мощность, рассеиваемая в единице объема продукта за счет наведенных токов проводимости, рассчитывается по формуле [13]:

$$P_p = j_2 E_2 = \gamma_2 E_2^2, \quad (4)$$

где E_2 – напряженность поля в продукте; j_2 – плотность тока проводимости в продукте.

Физика процесса при электроимпульсной обработке текучих пищевых продуктов в диэлектрической таре сходна с той, что имеет место при электроимпульсной инактивации микроорганизмов в воде [9]. Роль цитоплазматической (клеточной) мембраны для продукта при этом играет диэлектрическая тара. Отличие состоит лишь в том, что если поле внутрь тары не проникает, а прикладывается полностью к ней, то продукт (в отличие от клетки с пробоем мембраны) остается необработанным (или испорченным в случае пробоя диэлектрической тары). Кроме того, соотношение между толщиной d_m мембраны и характерным размером клетки d_k , с одной стороны, и толщиной стенки диэлектрической тары (бутылки) d_{yn} с ее характерным поперечным размером d_m , с другой стороны, может быть существенно разным. При близких к действительности $d_m \approx 10^{-8}$ м, $d_k \approx 10^{-6}$ м, $d_{yn} \approx 5 \cdot 10^{-3}$ м, $d_T \approx 7 \cdot 10^{-2}$ м получим:

$$\frac{d_m}{d_k} = 10^{-2} < \frac{d_{yn}}{d_T} = 7 \cdot 10^{-2}. \quad (5)$$

При $d_{yn} = (0,5-1)$ мм неравенство (5) приближается к равенству:

$$\frac{d_m}{d_k} \approx \frac{d_{yn}}{d_T}. \quad (6)$$

Чем меньше отношения d_m/d_k , d_{yn}/d_T , тем большая часть наведенного внешним импульсным электрическим полем напряжения прикладывается к внутреннему содержимому клетки и к продукту в упаковке.

Средняя мощность N_{cp} , выделяемая в обрабатываемом продукте объемом V_0 , определяется из следующего соотношения:

$$\begin{aligned} N_{cp} &= V_0 t_u f_{cl} P_{\Sigma} = V_0 t_u f_{cl} (P + P_p) = \\ &= V_0 t_u f_{cl} (2\pi f \epsilon_0 E_2^2 \epsilon_2' \operatorname{tg} \delta + \gamma_2 E_2^2), \end{aligned} \quad (7)$$

где t_u – длительность импульса; E_2^2 – напряженность электрического поля в обрабатываемой среде; γ_2 – электропроводность среды; f – частота импульса $\sim 1/t_u$; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь, равный $\epsilon_2''/\epsilon_2' \approx 0,1$ [13, 15], где ϵ_2'' , ϵ_2' – мнимая и действительная части комплексной диэлектрической проницаемости продукта соответственно; f_{cl} – частота следования импульсов ($f_{cl} = 10^3 \text{ с}^{-1}$). Потерями мощности при ее распространении в глубь продукта можно пренебречь.

Из рис. 2 следует, что не все импульсное напряжение от генератора импульсов прикладывается к продукту, находящемуся в таре. Действительно:

$$U = 2U_1 + U_2 \approx 2E_1 d_1 + E_2 d_2 = E_2 \left(2 \frac{\epsilon_2'}{\epsilon_1'} d_1 + d_2 \right), \quad (8)$$

где U_1 , U_2 – напряжения, приложенные к стенке упаковки и к продукту соответственно; ϵ_1' , ϵ_2' – действительные части комплексной диэлектрической проницаемости материала упаковки и продукта соответственно. В (8) величина напряженностей поля в диэлектрике упаковки E_1 и в продукте E_2 обратно пропорциональна диэлектрическим проницаемостям этих веществ.

Общее сопротивление Z упаковки, заполненной продуктом, и среднюю мощность, поступающую в Z , можно определить из нижеследующих соотношений:

$$Z = \frac{2}{\omega C_{yn}} + \frac{\frac{R_{np}}{\omega C_{np}}}{\frac{1}{\omega C_{np}} + R_{np}} = \frac{2 + 3R_{np} \omega C}{\omega C (1 + R_{np} \omega C)} = \quad (9)$$

$$= \frac{2 + 3R_{np} \cdot 2\pi C / t_u}{(2\pi C / t_u) \cdot (1 + R_{np} \cdot 2\pi C / t_u)},$$

$$N_{cp,z} = \frac{U^2}{Z} t_u f_{cl}. \quad (10)$$

Следует отметить, что сложности при создании высоковольтного импульсного генератора связаны с получением импульса с коротким фронтом (наносекундного диапазона) и с небольшой величиной сопротивления самой нагрузки (единицы Ом). Увеличить мощность генератора можно путем увеличения амплитуды выходных импульсов при той же частоте их сле-

дования ($f_{cl} \approx 10^3 \text{ с}^{-1}$). В то же время увеличение мощности генератора ограничивается пробивным напряжением диэлектрической стенки упаковки – тары.

Отметим, что длинные импульсы электрического поля ($t_u > 50 \text{ нс}$) практически не проникают внутрь замкнутой диэлектрической оболочки тары с обрабатываемым продуктом, а на сверхвысоких частотах ($f \sim 10^{10} \text{ Гц}$, $\tau_u \sim 10^{-10} \text{ с}$) становится заметным скин-эффект. При этом глубину проникновения Δ (в метрах) электромагнитного поля в продукт можно определить из нижеследующего выражения [13]:

$$\Delta = \frac{9,55 \cdot 10^7}{f \sqrt{\epsilon'} \operatorname{tg} \delta}. \quad (11)$$

Экспериментальные результаты показывают, что при электроимпульсной обработке продуктов в диэлектрической таре рациональным представляется воздействие на среду импульсами с длительностью $t_u = (1-10) \text{ нс}$ [9].

Технология обработки продуктов в диэлектрической таре при помощи коротких ($t_u = 1 \text{ нс}$) импульсов находится на начальном этапе своего развития, но в то же время является весьма перспективной благодаря сочетанию достаточно высокой наведенной напряженности в продукте и наличию высоких характерных частот в непрерывном спектре $0 \leq f \leq 0,35/t_f$, где длительность фронта $t_f \leq 0,5 \text{ нс}$ может обеспечить высокую степень инактивации без существенного нагрева среды. При этом не требуется наличия дополнительного теплообменника для нагрева продукта по сравнению с СВЧ-обработкой [16].

ВЫВОДЫ

В настоящей статье приведена методика разработки высоковольтных технологических установок по электронно-ионной обработке текучих пищевых продуктов в порционном режиме сильными электромагнитными полями с целью инактивации содержащихся в них патогенных микроорганизмов и продления сроков их хранения. Показано, что порционный режим обработки пищевых продуктов с гальваническим контактом между рабочей камерой с продуктом и разрядной зоной перспективен при проведении лабораторных исследований. В технологических процессах эффективность применения данной технологии будет зависеть от решения ряда технических задач, указанных в тексте.

В статье был также рассмотрен вариант электроимпульсной обработки текучих пищевых продуктов в готовых диэлектрических тарах для инактивации содержащихся в них микроорганизмов и продления сроков их хранения. Про-

анализированы физические процессы, происходящие при воздействии сильных электрических полей при различных параметрах исследуемого объекта, и показана перспективность данного метода обработки материалов по сравнению с существующими технологиями. В целях эффективного приложения энергии источника на нагрузке приведена методика расчета основных взаимовлияющих электрических параметров установки и характеристик обрабатываемой среды. Выявлено, что в перспективе с разработкой высоковольтных генераторов импульсных напряжений с предельно минимальным фронтом и максимальной амплитудой импульса связана возможность достичь необратимой инактивации микроорганизмов в текучих пищевых продуктах и продлить сроки их хранения при минимальных удельных энергозатратах и без предварительного нагрева самого продукта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горин Ю.В., Кулахметов, Ф.Х., Курбанов Э.Д. Модификация поверхности композиционных материалов в факельном разряде. *ЭОМ*. 1991, (3), 48–52.
2. Джуварлы Ч.М., Горин Ю.В., Кулахметов Ф.Х., Курбанов Э.Д. Комплексная электроразрядная модификация поверхности материалов. *Тезисы докладов 4-й научно-технической конференции «Вакуумные покрытия-87»*. 8–10 октября 1987 года, Рига, Латвия. ч. 2, с. 62.
3. Курбанов Э.Д. Комбинированная обработка поверхности стекловолокон неравновесными электрическими разрядами в технологии производства стеклопластиков. *Вестник МЭИ*. 2009, (3), 42–46.
4. Горин Ю.В., Кулахметов Ф.Х., Курбанов Э.Д. Влияние диэлектрических волокон на характеристики барьерного разряда. *ЭОМ*. 1993, (6), 24–26.
5. Курбанов Э.Д., Горин А.В., Горин Ю.В. Активация комбинированных структур на основе волокон в тлеющем разряде. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2010, (1), 8–10.
6. Курбанов Э.Д. Модификация поверхности стекловолокон в барьерном электрическом разряде в процессе производства стеклопластиков. *Электричество*. 2009, (2), 32–36.
7. Кузнецов В.Г., Гашимов А.М., Курбанов Э.Д. Исследование структуры наносекундного стримерного разряда методом электрографии. *Техническая электродинамика*. 2009, (6), 17–22.
8. Курбанов Э.Д. Комплексное исследование характеристик наносекундного стримерного разряда в резконеоднородном поле при наличии в промежутке диэлектрических пластин. *Известия НАН Азербайджана*. 2009, 29(5), 78–93.
9. Гашимов А.М., Курбанов Э.Д. Высоковольтное импульсное воздействие на биологическую клетку. *ЭОМ*. 2009, 45 (5), 74–79.
10. Курбанов Э.Д. Процессы активации и пробоя твердых диэлектриков при воздействии на них сильных электрических полей. *Вестник МЭИ*. 2009, (2), 68–71.
11. Gurbanov E.J. Plasma Processes in Water under Effect of Short Duration Pulse Discharges. *Bulletin of the American Physical Society*. The 66-th Annual Gaseous Electronics Conference GEC-2013, 30 September–04 October 2013, Princeton (USA), 2013, 58(8), p. 47.
12. Kalenikov A., Kuzhekin I.P., Kurbanov E.D. Treatment of Water by High Electrical Fields and Pulsed Discharges. *Book of abstracts 28-th International conference "ICPIG-2007"*. July 15-20, 2007, Praga, p. 450.
13. Остапенков А.М., Птушкин А.Т. *Электрооборудование пищевых предприятий*. М.: Агропромиздат, 1989, с. 215.
14. Ашнер А.М. *Получение и измерение импульсных высоких напряжений*. М.: Энергия, 1979, с. 120.
15. Бенгтссон Н.Е. (Bengtsson N.E.), Олссон Т. (Ohlsson). СВЧ-нагрев в пищевой промышленности. *Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике*. 1974, (1), 52–66.
16. Ананин И.А., Каданер Я.Д., Урусова Л.М., Шмырев В.В. Импульсный микроволновой способ повышения стойкости напитков. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 1998, (5), 12–13.

Поступила 24.08.15
После доработки 28.09.15

Summary

The present article deals with the development of high-voltage electropulse installations for the electronic batch-mode processing of packed fluid foodstuffs under the influence of strong electromagnetic fields. The purpose of such processing is to inactivate microorganisms in the processed foodstuffs, thus prolonging their shelf-life period. The technique is suggested for the calculation and coordination of the main parameters of the pulsed power supply and loading (of the packed fluid foodstuffs) for more effective application of the source energy at loading. It is revealed that when reducing the pulse front (nanoseconds) and increasing its amplitude it is possible to reach the optimum processing regimes with the lowest specific energy consumption without preliminary heating of the product in a heat exchanger.

Keywords: high-voltage installation, generator of pulsed tensions, pulse front, duration of pulse, fluid foodstuffs, electromagnetic field, working chamber, discharge interval, inactivation of microorganisms, extension of shelf-life period.