
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

В. Г. Чебану

ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИКИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОПЛАЗМОЛИЗА РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова, lpepv@phys.asm.md*

Введение

Известны различные технологические процессы, в которых электрическое поле применяют для контактного воздействия на сырье растительного и животного происхождения [1–4], подавления жизнедеятельности микрофлоры пищевых сред [5, 6], микроорганизмов или патогенной флоры [7, 8].

В основе этого воздействия лежат процессы прямого действия электрического тока на живую ткань, вызывающего структурные изменения на клеточном и субклеточном уровнях [9, 10] и последующее увеличение клеточной проницаемости. Одним из таких процессов является электроплазмолиз растительного сырья [11, 12, 13], представляющий определенный научный интерес и получивший распространение в перерабатывающей промышленности [3, 14–16, 17].

Однако для более надежного и обоснованного внедрения в производство этого совершенного инструмента, изменяющего структуру клеточной ткани, в литературе нет достаточных данных и рекомендаций энергетического и технологического характера. Тем более что применяемое напряжение для электрической обработки растительной ткани различно по величине и форме. В зависимости от величины напряженности электрического поля, вырабатываемой блоком питания, при котором обрабатывается сырье, процесс электроплазмолиза необходимо подразделять на **высоковольтный** ($E \geq 1000$ В/см) и **низковольтный** ($E \leq 1000$ В/см).

Эффективное значение напряженности поля в растительной массе при контактной обработке сырья равно:

$$E_{\text{эф}} = E/\varepsilon,$$

где ε – диэлектрическая проницаемость сырья.

Величина $E_{\text{эф}}$ – не что иное, как градиент потенциала между электродами и на практике его целесообразно разделить на три ступени:

- **низкий градиент** (до 500 В/см);
- **умеренный градиент** (500–1000 В/см);
- **высокий градиент** (более 1000 В/см).

Электроплазмолиз сырья связан функциональной зависимостью с отношением основных физических величин, характеризующих процесс:

$$A = \sigma_{\text{ср}} \cdot E^2 \cdot \tau_p,$$

где A – удельная работа, необходимая для электроплазмолиза, Дж/м³; E – напряженность приложенного электрического поля, В/м; σ – средняя электропроводность сырья, См/м; τ – время обработки, сек.

Анализ схем подключения электродов к электрическим сетям

Отметим [7, 18] некоторые варианты возможных схем подключения систем электродов для контактного воздействия на сырье

1. При соединении электродов в треугольник между фазными электродами течет ток плазмолиза (I_p – ток нагрузки), но, помимо этого тока, через сырье от крайних электродов к заземляющему электроду нуля силового трансформатора будет протекать ток утечки I_u . Этот ток обуславливает потери энергии.

2. Если электроды соединяются в звезду с чередованием фазных и нулевых электродов, под-

ключенных к заземленному нулю трансформатора, то такая схема с точки зрения безопасности наиболее приемлема, при этом нагрузка более симметрична. Однако время электроплазмолиза τ_p увеличивается, в среднем в три раза, и, следовательно, во столько же раз снижается производительность аппарата.

3. В случае включения основных электродов в треугольник, когда дополнительные, по краям, соединены с заземленным нулем трансформатора, они (последние) становятся с позиции электрической безопасности экранирующими. Но здесь из-за асимметрии фаз интенсивность процесса на крайних межэлектродных промежутках снижается значительно, чем на других (основных). Это можно устранить при изменении расстояния между экранирующими электродами и основными, уменьшив ее на $\sqrt{3}$.

Энергетическая оценка процесса

Для количественной оценки расхода энергии в электродном основном промежутке и утечки при процессе электроплазмолиза провели измерения расхода энергии W_0 на экспериментальном стенде и в производственных условиях.

Использовалась малогабаритная установка ЛУП-1, [19], обладающая широким диапазоном возможностей для регулирования электрических и временных параметров при обработке различных видов сырья. Она состоит из блока питания, ячейки для размещения объекта обработки и пульта дистанционного управления.

Блок питания позволяет выбрать широкий спектр различных режимов по длительности обработки и паузы, по количеству импульсов обработки и полярности импульса, а также по учету использованной электрической энергии.

Ячейки представляют собой сосуды прямоугольной формы из органического стекла, внутри которых можно располагать электроды, различные по форме и количеству. Электроды (фазные и нулевые) легко подключаются друг к другу по разным схемам, а также к источнику питания и позволяют регулировать межэлектродное расстояние (рис. 1).

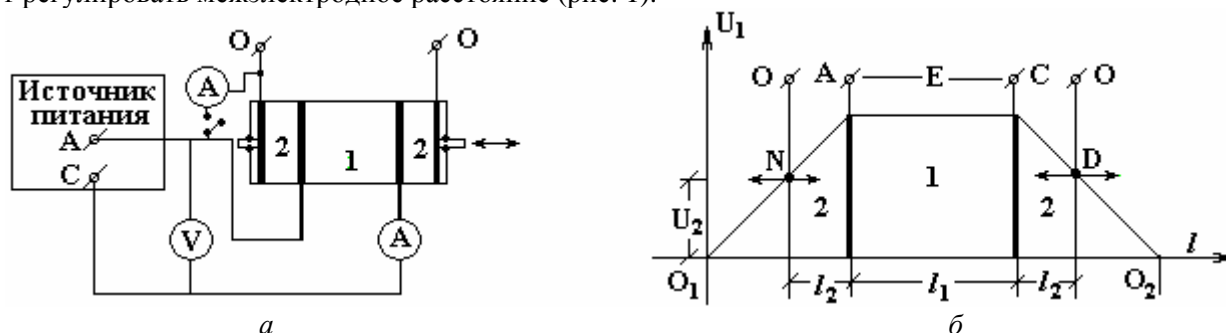


Рис. 1. Схема экспериментального стенда с использованием источников питания (ЛУП-1, БП-125А) и ячейки электроплазмолиза (а), а также зоны элементарной ячейки с различным падением напряжения между электродами. 1 – зона плазмолиза межэлектродного пространства l_1 (фазы А и С), 2 – зоны плазмолиза за электродным пространством l_2 фазы А и 0, фазы С и 0 (б)

В производственных условиях источником тока служили блок питания БП-125А [2] и проточная экспериментальная камера цилиндрической формы с электродами (рис. 2). Блок питания подключали к 3-фазной сети с нулевым проводом, который позволял регулировать и выбирать оптимальные режимы обработки измельченного сырья, контролировать электрические параметры для учета расхода энергии. Основные электроды камеры имели выводы, подключенные к блоку питания по различным электрическим схемам, а экранирующие электроды установили на входе и выходе сырьевого потока.

Рабочую камеру плазмолиза подсоединяли к поточной технологической линии при помощи резиновых шлангов между сырьевым насосом и сокоотделительным устройством (рис. 2,б).

Исследовались варианты подключения электродов по схемам: а) фаза – нуль; б) фаза – нуль – фаза; в) нуль – фаза – нуль; г) в звезду и в треугольник, с экранирующими электродами и без них.

Потребляемую мощность W_0 измеряли непосредственно или определяли по формуле

$$W_0 = \left(\frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} \cdot I_A + \frac{U_{BC}}{\sqrt{3}} \cdot I_B + \frac{U_{CA}}{\sqrt{3}} \cdot I_C \right) \cdot 10^{-3} \text{ kVA},$$

где U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – напряжения между фазами, В; I_A, I_B, I_C – токи соответствующих фаз, А.

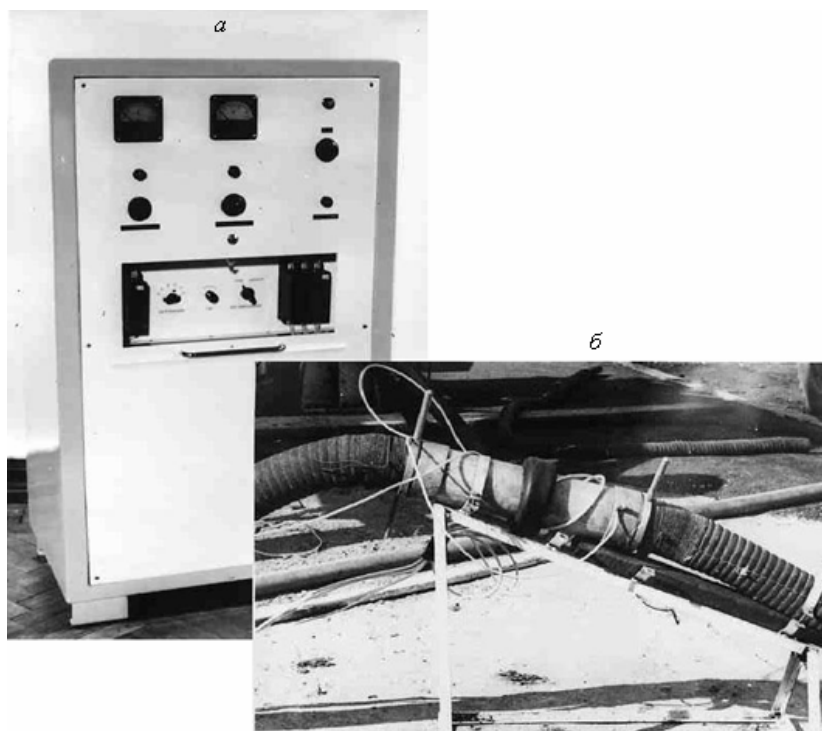


Рис. 2. Блок питания БП-125А (а) и рабочая камера электроплазмолиза сырья (б)

Расходы электроэнергии определены по отношению к энергии, затраченной при оптимальном осуществлении электроплазмолиза, и являются постоянной величиной. Для конкретного вида сырья и идентичных условий проведения процесса плазмолиза энергия $W_p = \text{const}$ [2, 20, 21].

При одинаковых условиях проведения плазмолиза одного вида сырья с постоянными электрическими и структурно-технологическими параметрами в схемах а) и б) величина W_p больше в 1,5–2,6 раза по сравнению с расходом энергии по схеме в). В схеме в) крайние электроды подключены к нулю и утечки тока не наблюдается благодаря их экранирующим функциям.

Фактический расход электроэнергии в схемах в) и г) превышает W_p на 5–10%, когда нуль подключен к боковым электродам круглой формы, у краев которых искажается электрическое поле. Устраняется это явление путем применения плоско-параллельных электродов, и общий расход энергии при этом примерно равняется W_p , если пренебречь потерями на нагрев в контактах и в соединительных кабелях ($W_0 = W_p$).

Перерасход электроэнергии по сравнению с W_p в 1,5–2,6 раза выше в схемах а) и б), где на крайние электроды подается фаза, и вызван утечкой тока через сырье к нулю трансформатора.

Когда происходит утечка с одного электрода на промежуток, включенный между фазой и нулем, потери достигают 90% от расхода в межэлектродном пространстве.

Если электроды соединены в звезду по схеме С-0-В-0-А-0-С, утечка с двух крайних электродов на шести промежутках, включенных между фазой и нулем, или одного электрода на три промежутка, что одно и то же, вызовет потерь в три раза меньше, чем в предыдущем случае, и составит порядка 30%.

При включении электродов в треугольник (первая схема) абсолютные потери на утечку от крайних электродов останутся такими же, как и при соединении в звезду с подачей фаз на крайние электроды. Так как мощность в межэлектродном пространстве выше в три раза, потери на утечку снизятся во столько же раз по сравнению с потерями в варианте, где электроды соединяются в звезду (крайние электроды подключаются к фазе), и составят 10% от расхода в межэлектродном пространстве.

Движущиеся электроды расходуют на 4–6% меньше энергии, чем стационарные. Эти потери сводятся к нулю, если обеспечивается надежный электрический контакт между частицами сырья, а также электродом и сырьем. Если технически это невозможно осуществить, то время обработки соответственно увеличивают, чтобы обеспечить полный плазмолиз всех клеток сырья.

По мере раздвижения нулевых электродов от фазных (А и С) по сторонам в направлении к точкам 0_1 и 0_2 образуются зоны плазмолиза за основным электродным пространством 2 (рис. 1, б). Эти

зоны могут быть расширены в зависимости от величины приложенного напряжения, времени обработки и вида сырья. По мере увеличения межэлектродного расстояния l_1 и l_2 величина напряженности поля в этой зоне падает и стремится к нулю. На рисунке эта величина соответствует положению точек N и D и равняется U_2 , что составляет часть от величины приложенного напряжения между электродами U_1 .

Из картины распределения поля следует, что зоны плазмолиза (основного межэлектродного пространства 1 и за электродным пространством 2) (рис. 1) могут быть расширены также за счет увеличения количества электродов в рабочей камере [22, 23].

Эксперименты по определению распределения напряженности поля между электродами для различных схем подключения и места их расположения позволяют обосновать конструкцию аппарата, выбрать технологические параметры процесса электроплазмолиза растительного сырья и безопасную его реализацию.

Таким образом, появляются возможности решения задач по разработке, конструированию различных электродных камер для аппаратов, причем в ряде случаев исследования могут осуществляться с применением сравнительно простых моделей электродных ячеек.

Электрические и технические требования для реализации процесса

Следует отметить и то обстоятельство, что схема соединения нагрузки в звезду применяется только при одинаковой нагрузке всех трех фаз [24]. Из практики известно, что не во всех конструкциях аппаратов для электроплазмолиза условия равномерной загрузки фаз выполняются, поэтому напряжения на сопротивлениях лучей звезды нагрузки получаются неодинаковыми. Кроме того, по этой схеме недопустимым является включение или отключение одной фазы нагрузки.

В этом отношении соединение нагрузки треугольником имеет преимущества. Сопротивления фаз могут быть неодинаковыми и в исключительных случаях могут включаться и отключаться независимо друг от друга (**традиционное исполнение аппарата**).

Такая же возможность имеется при соединении обмоток генератора и нагрузки звездой, если их нейтральные точки соединены непосредственно или через землю (**морское исполнение аппарата**).

Для обеспечения безопасности в реализации процесса рабочие электроды аппарата заключают в электрически изолированных корпусах, на входе и выходе потока сырья устанавливают дополнительные экранирующие электроды, которые соединяются с заземленным нулем трансформатора, тем самым полностью зона плазмолиза ограничивается в закрытой камере ($I_n = 0$) [2, 25].

Рабочая камера электроплазмолитатора должна содержать прикрепленную к корпусу клеммную коробку, которая позволяет группировать, соединять выводы электродов по той или иной электрической схеме. С противоположных сторон корпуса, по ходу сырьевого потока, устанавливают патрубки или фланцы для легкого и удобного подключения аппарата к сырьевому потоку различных по производительности и назначению технологических линий [2,15]. В случае отсутствия дополнительных экранирующих электродов патрубки или фланцы аппарата заземляются.

При сборе электродов в пакеты [26] количество пакетов рабочей камеры пропорционально числу фаз источника питания, а число электродов в пакете определяют по формуле

$$N = k \frac{D}{l} \sin \left(\frac{\pi}{n} - \frac{l}{D} \right),$$

где N – число электродов в пакете; n – количество пакетов (3,6,9 и т. д.); D – внутренний диаметр корпуса аппарата, мм; l – расстояние между электродами в пакете, мм; $\pi = 3,141$; $k = 0,6-1,4$.

Расстояние между электродами в пакете равно расстоянию между пакетами и ленточными электродами и определяется по формуле

$$l = (0,06 - 0,3) \cdot U \quad ,$$

где U – напряжение между электродами, В.

Заключение

Из вышеизложенного следует, что энергетические и эксплуатационные показатели процесса электроплазмолиза клеточной ткани сырья в значительной степени зависят от вида электрических сетей, к которым подключается аппарат, от величины напряженности электрического поля, а также и от схемы включения электродов рабочей камеры.

Проведенные энергетический и технический анализы следует учесть при исследовании, моделировании электродных камер, проектировании и разработке установок для электрической обработки растительного сырья различного применения. При условии соблюдения технических требований можно обеспечить безопасную работу установки и ее эксплуатацию в оптимальном энергетическом режиме и эффективной отдаче в быту, на консервных и винодельческих заводах, на воздушных, морских и космических кораблях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Болога М.К.* Электрофизико-химические исследования и технологии в Институте прикладной физики АН Молдовы // *Электронная обработка материалов*. 2004. № 2. С. 4–13.
2. *Чебану В. Г.* Повышение эффективности обработки растительного сырья электроплазмолизом. Автореф. дисс. Киев, 1988. 24 с.
3. *Ciobanu V.* Tehnologii de utilizare rațională a fructelor în mediul rural // Conferința națională „Comunitățile rurale și renașterea satului”. Chișinău, 2005. P.121–122.
4. *Рогов И.А.* Электрофизические методы обработки пищевых продуктов. М.: ВО Агропромиздат, 1988. 272 с.
5. *Гулый И.С., Украинец А.И., Дебелинский С.Н., Ботошан Н.И., Чебану В.Г., Ковбаса В.Н., Берзой С.Е.* Воздействие электрического поля высоких напряжений на физико-химические свойства пива // *Электронная обработка материалов*. 1991. № 4. С. 50–55.
6. *Наний Е. П.* Электропастеризация. Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1979. 70 с.
7. *Акопян Р. А., Микаелян Э. Г.* Влияние схемы включения электродов на обеззараживание почвы // *Тр. Ар. НИИ МЭСХ*. 1975. № 4. С. 14–16.
8. *Яровой П. И., Чебану В.Г., Станку М. Ли др.* Обеззараживание сточных вод переменным электрическим током // *Электронная обработка материалов*. 1985. № 6. С. 76–78.
9. *Чебану В.Г.* Ультроструктурный анализ клетки при электроплазмолизе // 4-я Республиканская конференция по электронной микроскопии „Электронная микроскопия и современная технология”. Кишинэу. 1990. С. 125–126.
10. *Ciobanu V.* Studiul structurii țesutului succulent vegetal tratat prin electroplasmoliză. // *Lucrările Conferinței Naționale cu participare Internațională „Cercetarea științifică în condițiile integrării europene”*. Brăila (România), 2004. 6 pag.
11. *Рудковская Г.В., Ботошан Н.И., Чебану В.Г., Берзой С.Е., Поплавский П.П.* Способ производства томатопродуктов. Описание изобретения к А. с. (SU) №1524214. МКИ А23 L 06. Изд. ППП Патент. М. 1988. 7 с.
12. *Parcenco A., Botoșanu N., Berzoi S., Ciobanu V.* Fenomenul histerezei în mediul biologic la prelucrarea termică sau electrică // *Lucrările Conferinței Naționale de Termotehnică*. Ediția a 7-a. Brașov (România) 23–24 mai 1997. V. 3. P. 309–317.
13. *Лазаренко Б. Р., Фурсов С. П., Щеглов Ю. А., Бордиян В. В., Чебану В. Г.* Электроплазмолиз. Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1977. 80 с.
14. *Ciobanu Vasile.* Intensificarea procesului de deshidratare a masei verzi fărâmițate a plantelor prin electroplasmoliză // *Comunicări științifice*. București. Ediția tehnică, 1993. Vol.1. P. 45–50.
15. *Бордиян В. В.* Интенсификация сушки растительного сырья электроплазмолизом. Автореф. дисс. М., 1991. 18 с.
16. *Botoșanu N., Berzoi S., Ciobanu V.* Electrodifuzia și transferul de masă sau căldură în medii biologice. // *Lucrările Conferinței Naționale de Termotehnică*. Ediția a 7-a. Brașov (România). 23–24 mai 1997. Vol. 3. P. 251–257.
17. *Купчик Л.А., Картель Н.Т., Купчик М.П.* Электрохимический способ получения окисленных целлюлозных сорбентов // *Электронная обработка материалов*. 2003. № 6. С. 70–73.
18. *Ciobanu V.* Unele aspecte energetice de efectuare a procesului de electroplasmoliză // *Lucrările Conferinței Naționale de termotehnică*. Reșița. (România). 2003. P. 279–280.
19. *Чебану В.Г., Берзой С. Е., Розенталь Я.Ш., Говберг М.Г., Симон М.В.* Лабораторная установка для исследования процесса электроплазмолиза ЛУП-1 // *Электронная обработка материалов*. 1990. № 2. С. 81–82.
20. *Болога М., Чебану В. Г., Берзой С.Е., Ботошан Н.И.* Оптимизация процесса электроплазмолиза яблочной мезги // *Электронная обработка материалов*. 1988. №140. С. 70–72.

21. Чебану В.Г., Берзой С.Е., Ботошан Н.И. Влияние свободной жидкой фазы сырья на эффективность электроплазмолиза // 4-я Всесоюзная научная техническая конференция „Электрофизические методы обработки пищевых продуктов и сельскохозяйственного сырья”. М., 1989. С. 210–211.
22. Щеглов Ю. А., Богдан К. Н. Зональный плазмолиз растительной ткани // Электронная обработка материалов. 1968. № 5. С. 92–93.
23. Щеглов Ю. А., Чебану В. Г. Способ электроплазмолиза растительного сырья. Описание изобретения к А. с. СССР № 446266. МКИ А23 N 1/ 00. ЦНИИП. М., 1975. 2 с.
24. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. М.; Л.: ГЭИ, 1988. Часть 1-я. С.280.
25. Чебану В. ,Г., Щеглов Ю. А., Коваль Н. П., Рябов В. П. Описание изобретения к А. с. (SU) № 1045445 МКИ А23 N 1/00. Электроплазмоллизатор для измельченного растительного сырья. Изд. ППП. Патент Москва, 1983 , 4 с.
26. А. с. 747462 (SU), МКИ А23 N 1/ 00. Электроплазмоллизатор для измельченного растительного сырья. Щеглов Ю. А., Коваль Н.П., Бобраков Б. П., Рябинский Ф. Б., Фурер Л. А., Чебану В. Г. Опубл. Б. И. 1985. № 26.

Поступила 05.02.07

Summary

Energetics of low-voltage impulse electroplasmolysis of vegetable raw materials for various ways of connecting of electrodes of the working chamber to the power source supply was theoretically and experimentally substantiated. The main electrical and technical requirements for designing and realization of the process of electroplasmolysis of cell tissues in various areas of application, ensuring electric safety at work, optimal modes of working as well as efficiency, are outlined.
