

Электроплазмолиз винограда с применением биполярных импульсов

Н. А. Попова, А. Я. Папченко, М. К. Болога

*Институт прикладной физики АН Молдовы,
ул. Академическая, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова,
e-mail: andrei.papcenco@mail.ru*

Изучены закономерности электроплазмолиза винограда при использовании биполярных импульсов с крутым фронтом и пологим срезом в системе питания с глухозаземленной нейтралью. Описаны методика исследований, экспериментальные результаты по влиянию напряженности поля на изменение удельного сопротивления сырья, продолжительность и удельную энергию плазмолиза, выход сока и красящих веществ, результаты микроскопических исследований структуры плодового сырья. Приводятся эквивалентные электрические схемы замещения процесса плазмолиза, методика расчета электроплазмолитатора, результаты тестирования в технологической линии по переработке винограда.

Ключевые слова: электроплазмолиз, электрические импульсы, удельное сопротивление, биологическое сырье, клеточные структуры.

УДК 664.1.033

ВВЕДЕНИЕ

В процессах, связанных с извлечением ценных компонентов из растительного сырья, важным является разрушение полупроницаемых мембран клеток ткани. От степени их разрушения зависят выход сока и энергетические затраты на его извлечение.

Существуют разные способы повышения клеточной проницаемости сырья: измельчение, тепловая обработка, обработка ферментными препаратами, электроплазмолиз (ЭП). Электроплазмолиз отличается высокой скоростью обработки с малыми энергозатратами. Поэтому применение усовершенствованных методов ЭП может не только интенсифицировать технологический процесс, но и улучшить качество продукции.

Под действием электрического тока разрушаются плазматические оболочки клеток и повышается их проницаемость, что приводит к увеличению выхода сока. При этом отмечается снижение электросопротивления растительного сырья, которое может служить критерием оценки и управления процессом электроплазмолиза.

Цель работы – изучение процесса ЭП под действием переменных импульсов, изменения проницаемости клеточных мембран; оптимизация выхода сока и полезных ферментов; уменьшение содержания примесей, привносимых в сок.

Анализируя состояние вопроса, следует отметить, что под воздействием электрического тока в растительной ткани происходят существенные морфологические и физиологические изменения, которые привлекали внимание исследователей различных стран [1–13].

Механизм электроплазмолиза до конца не выяснен, предложены разные его варианты: селективный нагрев плазматических оболочек ткани; омический нагрев биологической ткани до 80–140°C; электрическое деформационное сжатие клеточных мембран; диффузионная миграция влаги в электрическом поле [14–15].

Электрический ток производит передвижение ионов, причем их свободному переносу препятствуют полупроницаемые оболочки клеток. Вследствие этого у полупроницаемых мембран имеют место изменение концентрации ионов, неравномерное распределение последних, что и является причиной электрического раздражения, которое сопровождается увеличением их проницаемости. Проходя через растительную ткань, электрический ток вызывает увеличение ее проницаемости, и по достижении определенного предела раздражения в клетке могут произойти необратимые изменения, приводящие к отмиранию протоплазмы и, следовательно, к полной ее проницаемости [16].

Для раскрытия механизма процесса плазмолиза предложены электрические схемы замещения клеточных структур и математические модели клеток с использованием RC -элементов [12, 17, 18], где R и C – электрическое сопротивление и емкость элементов клетки соответственно.

Плазмолиз растительного сырья осуществляется на постоянном, переменном (промышленной частоты 50 Гц) и импульсных токах. Различают высокоградиентный (1800–2000 В/см) и низкоградиентный (10–130 В/см) электроплазмолиз. При импульсном ЭП через уплотненную растительную ткань пропускают короткие им-

пульсы высокого напряжения и большой мощности. В результате осуществляется разрыв плазматических оболочек, ускоряется процесс обработки и повышается его эффективность [19].

Исследования плазмолиза ведутся в основном контактным переменным током. Для плавного регулирования напряжения на электродах используется тиристорный регулятор мощности в режиме фазных нагрузок при напряжении до 220 В. Недостатком такой обработки является ограничение величины напряжения на электродах в пределах фазного, что лимитирует повышение напряженности электрического поля в зоне плазмолиза.

В работе была исследована обработка растительного сырья линейными биполярными импульсами с крутым фронтом и пологим спадом в системе питания с заземленной нейтралью, определены выход сока и содержание красящих веществ. Предполагается, что такая ЭП обработка позволит повысить напряжение на электродах до 380 В, ускорить процесс и снизить удельные энергозатраты [20]. Эффективность предлагаемого способа определялась в лабораторных и производственных условиях SRL GRAND GARANOVSCI Тараклийского винзавода.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Объектом исследования служил виноград сортов: «Каберне», «Молдова», «Изабелла» и «Ркацетели». В экспериментах использовалась установка, схема которой и временная диаграмма импульсов представлены на рис. 1 и 2.

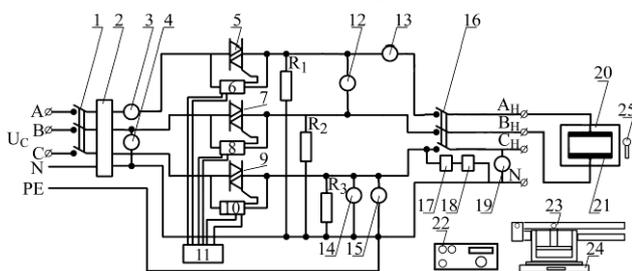


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – автоматический выключатель; 2 – счетчик электроэнергии; 3, 13 – амперметры; 4, 12, 14 – вольтметры; 5, 7, 9 – симисторы; 6, 8, 10 – фазные блоки управления; 11 – генератор импульсов; R_1 , R_2 и R_3 – нагрузочные сопротивления; 15 – осциллограф; 16 – магнитный пускатель; 17 – катушка магнитного пускателя; 18 – таймер; 19 – электрический секундомер; 20 – ячейка; 21 – электроды; 22 – мост переменного тока; 23 – пресс ручной; 24 – весы; 25 – термометр.

В электродную ячейку 20 загружается растительное сырье, и мостом 22 измеряется его сопротивление. Электроды 21 подключаются к клеммам A_n и B_n , и напряжение трехфазной сети питания с заземленной нейтралью U_c подается на

вход симисторов. На электроды симисторов 5, 7, 9 от генератора импульсов 10 подается напряжение управляющих импульсов U_y , которые благодаря нагрузочным сопротивлениям R_1 , R_2 , R_3 открываются; после симисторов напряжение поступает на вход магнитного пускателя 16. Время, необходимое для плазмолиза сырья, задается с помощью таймера 18. На электроды 21 ячейки 20 подаются обрабатывающие электрические импульсы U_ϕ или U_λ , и измеряются параметры плазмолиза растительного сырья. После плазмолиза электродная ячейка подключается к мосту переменного тока 22, и измеряется электрическое удельное сопротивление сырья.

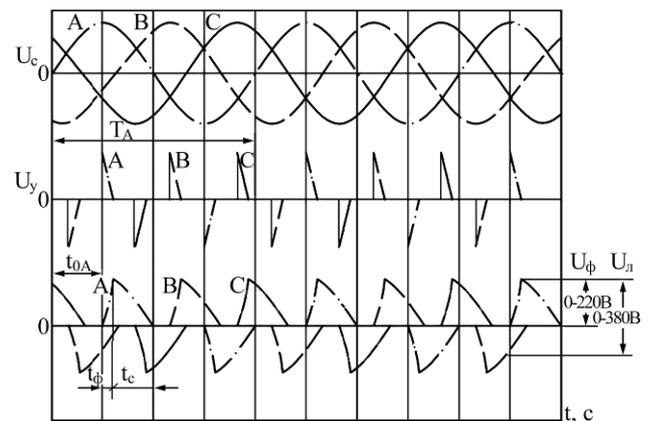


Рис. 2. Временная диаграмма: U_c – напряжение питающей сети трехфазного тока с заземленной нейтралью; U_y – напряжение управляющих импульсов; U_ϕ – напряжение фазных обрабатывающих импульсов; U_λ – напряжение линейных обрабатывающих импульсов; t_ϕ – время фронта; t_c – время среза.

Электроплазмолиз сырья проводится следующим образом. Очередная навеска дробленого винограда загружается в электродную ячейку 20, и мостом 22 измеряется ее удельное электрическое сопротивление до и после обработки. Затем на электроды 21 от генератора 10 подаются электрические импульсы заданной напряженности электрического поля и энергии. После обработки сырье загружается в пресс, перемешивается и определяется количество сока–самотека. Далее при постепенно повышающемся через каждую минуту давлении (5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 75 и 100 кг/см²) определяется выход прессового сока.

Анализы клеточного сока на содержание сахара и кислот проводились с помощью ареометра и методом прямого титрования. Содержание красящих веществ измерялось с помощью прибора КФК-3-УХЛ4.2.

Критериями оценки эффективности электроплазмолиза растительного сырья служили его удельное электрическое сопротивление и выход сока. Экспериментальные данные обрабатывались с помощью методов математической статистики.

ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приводятся результаты исследований влияния напряженности поля линейных биполярных импульсов в системе питания с заземленной нейтралью на изменение удельного сопротивления сырья, продолжительность и удельную энергию плазмолиза, выход сока-самотека и сока прессовой фракции, содержание красящих веществ в соке.

Зависимости удельного сопротивления измельченной массы винограда от продолжительности плазмолиза при фиксированных напряженностях (рис. 3) показывают, что ее увеличение в четыре раза сокращает длительность процесса плазмолиза более чем в сто раз, что объясняется повышением реакции растительной ткани на изменение напряженности.

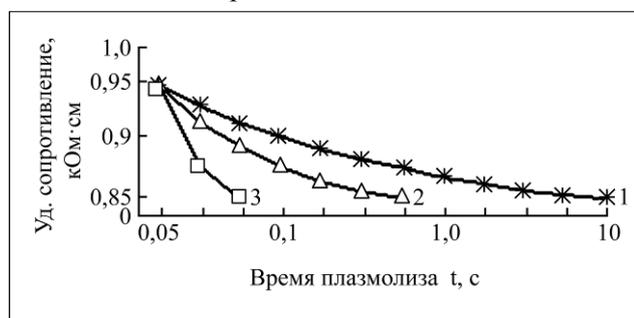


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления измельченного винограда сорта «Каберне» от времени плазмолиза при E , В/см: 1 – 50; 2 – 100; 3 – 200.

Применение линейных биполярных импульсов в сравнении с фазными позволяет повысить напряжение на электродах до 380 В и ускорить процесс плазмолиза.

При сравнении зависимостей удельных сопротивлений от продолжительности плазмолиза сырья фазными и линейными биполярными импульсами (рис. 4) видно, что последними в отличие от фазных можно ускорить процесс плазмолиза в 4–10 раз при одинаковом удельном сопротивлении сырья.

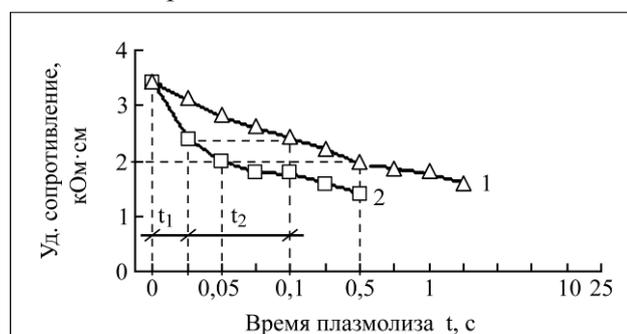


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления измельченного винограда сорта «Каберне» при применении фазных (кривая 1) и линейных (кривая 2) биполярных импульсов с амплитудами 220 и 380 В; расстояние между электродами 2 см.

Важным параметром является удельная энергия плазмолиза ΔW , которая определяется по формуле

$$\Delta W = UI t / m = E^2 t / \rho, \text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}; \quad (1)$$

$$t = \Delta W \rho / E^2, \text{ с}, \quad (2)$$

где ρ – среднее удельное сопротивление растительного сырья, кОм·см; E – напряженность электрического поля, В/см; t – время плазмолиза растительного сырья, с.; U – напряжение на электродах, В; I – величина силы тока в цепи электродной камеры, А; m – масса растительного сырья, кг.

Продолжительность процесса плазмолиза прямо пропорциональна произведению его удельной энергии на среднее удельное сопротивление сырья и обратно пропорциональна квадрату напряженности электрического поля.

Для проверки достоверности описания процесса формулой (2) рассчитано время плазмолиза растительного сырья $t_{\text{расч.}}$ при $\Delta W = 1$ Вт·ч/кг, $\rho_{\text{нач.}} = 3,4$ кОм·см, $\rho_{\text{конеч.}} = 2$ кОм·см, $\rho_{\text{сред.}} = 2,7$ кОм·см и различной напряженности поля. Расчетное и экспериментальное время плазмолиза сырья при различных напряженностях приведено в табл. 1, из которой следует, что они значительно отличаются.

Таблица 1

Исследование	E , В/см				
	50	100	150	200	400
$\Delta W_{\text{расч.}} = E^2 t_{\text{расч.}} / \rho$, Вт·ч/кг	1	1	1	1	1
$t_{\text{расч.}}$	1,08	0,27	0,12	0,06	0,016
$\Delta W_{\text{эксп.}} = E^2 t_{\text{эксп.}} / \rho$, Вт·ч/кг	4,1	1,9	1,1	0,7	0,4
$t_{\text{эксп.}}$	4,4	0,51	0,13	0,05	0,01
$K_{\text{плаз.}} = \Delta W_{\text{эксп.}} / \Delta W_{\text{расч.}}$	4,1	1,9	1,1	0,7	0,4

Формула (1) не отражает процессы, происходящие в клетках растительной ткани при электроплазмолизе. При напряженности 50 В/см они длительно выдерживают раздражающее воздействие биполярными импульсами, а при напряженности выше 150 В/см живая растительная ткань переходит в режим разрушения полупроницаемых мембран клеток. В результате время плазмолиза резко сокращается.

Отношение $\Delta W_{\text{эксп.}}$ к $\Delta W_{\text{расч.}}$ авторами принято в качестве коэффициента плазмолиза сырья ($K_{\text{плаз.}}$):

$$\Delta W_{\text{эксп.}} / \Delta W_{\text{расч.}} = K_{\text{плаз.}}$$

и формула (1) примет вид

$$\Delta W_{\text{эксп.}} = UI t K_{\text{плаз.}} / m = E^2 t K_{\text{плаз.}} / \rho, \text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}.$$

Увеличение напряженности электрического поля в диапазоне от 50 до 400 В/см сокращает удельный расход энергии на плазмолиз винограда (рис. 5), снижает его удельное сопротивление – от 3,4 до 2,0 КОМ·см.

На основе планированных экспериментов влияния напряженности биполярных импульсов на соотношение $\Delta W_{\text{экс.}}/\Delta W_{\text{расч.}} = K_{\text{плаз.}}$ при плазмолизе винограда сорта «Каберне» получено уравнение

$$K_{\text{плаз.}} = 18,115 + 0,0112x - 8,622\log_{10}(x)$$

с коэффициентом корреляции $K = 0,9966$, x – напряженность электрического поля.

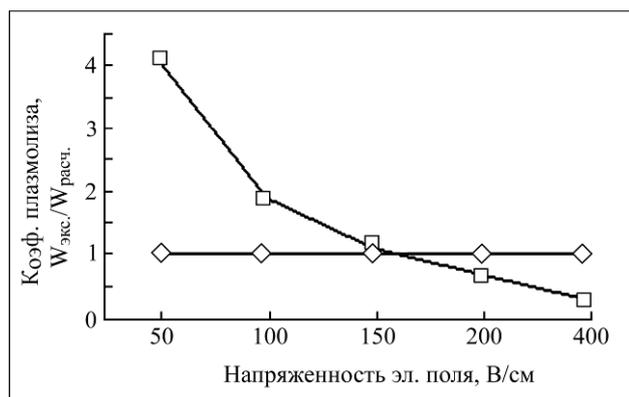


Рис. 5. Зависимость $\Delta W_{\text{экс.}}/\Delta W_{\text{расч.}}$ от напряженности при плазмолизе винограда сорта «Каберне».

Важным параметром в оценке эффективности электроплазмолиза растительного сырья является выход сока.

В этой связи получены зависимости выхода сока из измельченной массы винограда от удельной энергии линейных биполярных импульсов, давления и времени прессования (рис. 6).

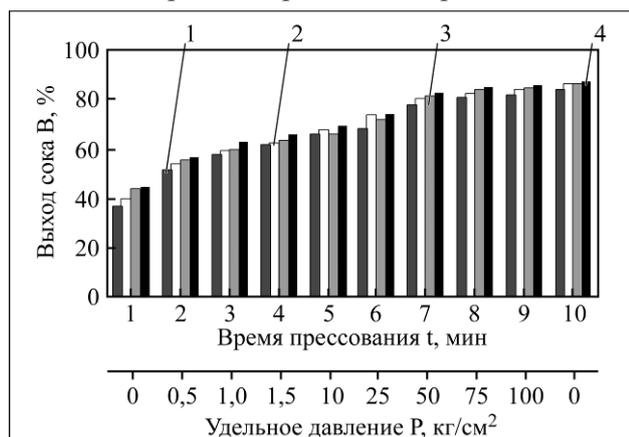


Рис. 6. Зависимость выхода сока из измельченного винограда сорта «Каберне» от времени и давления прессования при фиксированных значениях удельной энергии плазмолиза, ΔW , Вт·ч/кг: 1 – контроль; 2 – 0,5; 3 – 1; 4 – 3.

На первом этапе отделения сока от мезги без давления (при ее перемешивании) получают сок-самотек, рост количества которого при

$\Delta W = 0,5$ Вт·ч/кг по сравнению с контролем составил 6%.

При одинаковых режимах прессования ($P = 100$ кг/см², $t = 10$ мин) линейные биполярные импульсы повышают выход сока из винограда сорта «Каберне» на 1,5–2,5% (рис. 6).

На основе математического планирования экспериментов по влиянию удельной энергии плазмолиза, давления и времени прессования на выход сока из винограда сорта «Каберне» (табл. 2) получена модель процесса:

$$B = 1,725 W + 0,887 t + 0,066 P + 66,912,$$

учитывающая влияние выбранных факторов степенью корреляции 0,9732.

По результатам исследований установлены оптимальные режимы плазмолиза сырья: $\Delta W = 1-3$ Вт·ч/кг; $E = 100-150$ В/см; время обработки – 0,1–1 с; время и давление прессования – 10 мин и 100 кг/см² соответственно.

Зависимость содержания красящих веществ в соке из красных сортов винограда от удельной энергии плазмолиза, продолжительности и удельного давления с использованием линейных биполярных импульсов (рис. 7) показывает, что происходит увеличение содержания красящих веществ в соке-самотеке на 4% и в соке прессовой фракции – на 20%.

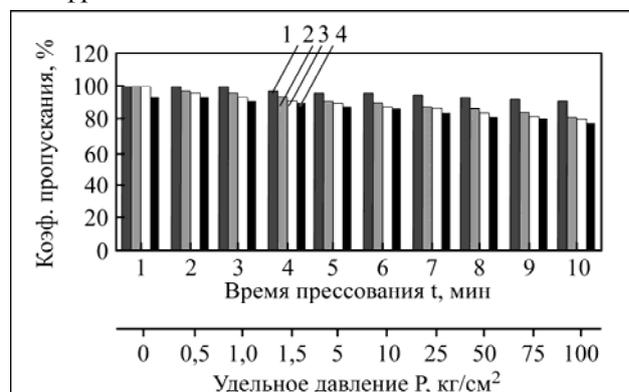


Рис. 7. Зависимость содержания красящих веществ в соке винограда сорта «Каберне» от времени и давления прессования при плазмолизе и фиксированных значениях разности температур, °С: 1 – контроль; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 10.

Выполнены планированные эксперименты влияния температуры, времени прессования и давления на содержание красящих веществ в соке и получена математическая модель вида

$$D = 193 - 5 T - 3,5 t_1 - 0,35 P$$

с коэффициентом корреляции 0,998, где T – повышение температуры в процессе плазмолиза, °С; t_1 , мин; P , кг/см² и D – прозрачность сока, %.

Таким образом, для процесса диффузии ценных компонентов из растительного сырья все факторы значимы.

Таблица 2

№ п/п	Факторы	Уровни варьирования факторов			
		X_1 ΔW , Вт·ч/кг	X_2 t , мин	X_3 P , кг/см ²	Y B , %
1	Основной уровень, код (0)	1	9	90	85,3
2	Интервал варьирования, код (+1)	0,5	1	10	
3	Верхний уровень, код (+1)	1,5	10	100	86,5
4	Нижний уровень, код (-1)	0,5	8	80	81,4
5	Звездная точка +1,682	2,34	10,68	106,82	87,1
6	Звездная точка -1,682	0,34	7,32	73,18	78,4

МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОДОВОГО СЫРЬЯ

Изучение электроплазмолиза биологических тканей сопряжено с необходимостью учета изменения структуры клеток (рис. 8).

Микроскопическими исследованиями установлено, что под действием электрических импульсов полупроницаемые мембраны клеток, плазмалемма и тонопласт теряют свойство полупроницаемости и становятся проницаемыми для сока. Микрофотограмма (а) и участок поперечного среза протопласта и стенки клетки (б) контрольного образца сырья (рис. 9), а также микрофотограмма (а) и участок поперечного среза протопласта и стенки клетки (б) образца, подвергнутого электроплазмолизу (рис. 10), показывают, что в образцах, обработанных электрическими импульсами, происходят существенные изменения. На рис. 10б – нарушение целостности протоплазмы клеток и разрывы клеточных мембран, плазмалеммы и тонопласта.

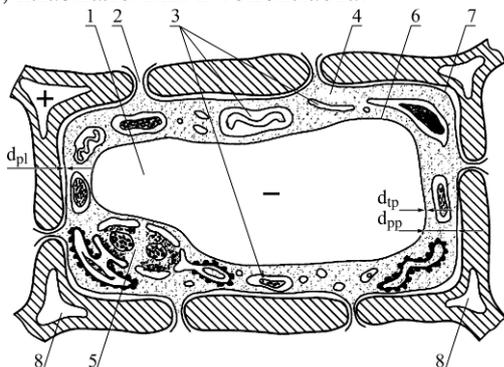


Рис. 8. Схематическое изображение сочной растительной клетки: 1 – вакуоль; 2 – плазма десмы; 3 – аппарат Гольджи; 4 – цитоплазма; 5 – ядро; 6 – тонопласт; 7 – плазмалемма; 8 – межклетник.

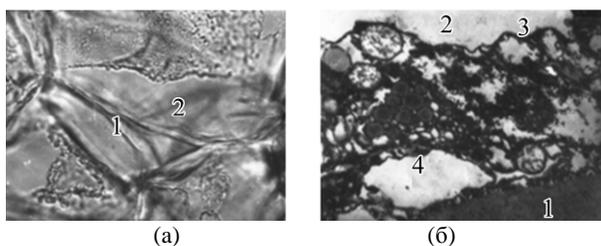


Рис. 9. Микрофотограмма (а) и участок поперечного среза протопласта и стенки клетки (б) контрольного образца: 1 – клеточная оболочка; 2 – вакуоль; 3 – тонопласт; 4 – плазмалемма.

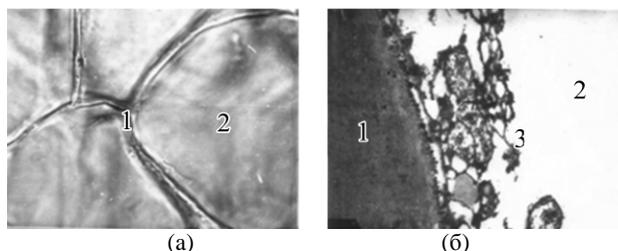


Рис. 10. Микрофотограмма (а) и участок поперечного среза протопласта и стенки клетки (б) образца сырья, подвергнутого электроплазмолизу: 1 – клеточная оболочка; 2 – вакуоль; 3 – фрагменты цитоплазмы (тонопласта и плазмалеммы).

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОЛИЗА ПЛОДОВОГО СЫРЬЯ

Для описания процесса плазмолиза ранее были предложены электрические схемы замещения клеточных структур на основе математических моделей клеток при помощи RC элементов [12]. Рассмотрены также и стохастические модели, в которых учитывалась оптимизация по выделению энергии [13]. Однако в указанных работах рассматриваются модели растительной ткани без учета влияния процессов переключения, содержащих элемент необратимости при электроплазмолизе. Именно при импульсном ЭП наиболее эффективно происходит разрыв плазматических оболочек.

В этой связи предложены схемы замещения, отражающие динамику изменений в растительной ткани в процессе ее подготовки к извлечению сока: клетки, ткани, измельченной и электроплазмолизованной ткани растительного сырья (рис. 11–14) – и формулы определения полного сопротивления. В схемах замещения мембран клеток использован управляемый диод, который в отличие от активного сопротивления более полно отражает динамику процесса. При нормальной жизнедеятельности клетки на границах мембран между ее вакуолью и межклеточной жидкостью имеются электрический заряд емкостью C и определенная разность потенциалов. Эти параметры управляют с помощью UD жизнедеятельностью клетки (рис. 11 и 12). При воз-

действию на последнюю биполярных импульсов с крутым фронтом и пологим спадом подавляется заряд на емкости C и возникает импульсный ток, нарушающий целостность плазматических оболочек. Величина тока зависит от амплитуды биполярных импульсов и определяет время процесса.

На рис. 11 представлена электрическая схема замещения клетки растительного сырья, состоящая из вакуоли (R), ограниченной полупроницаемыми мембранами (C, UD).

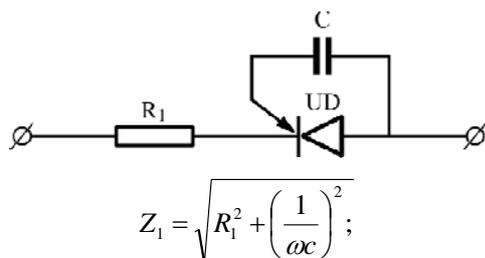


Рис. 11. Эквивалентная электрическая схема замещения клетки сочного растительного сырья и формула определения ее полного сопротивления Z_1 . R_1 – сопротивление сока вакуоли; C – емкость клеточных мембран и UD – управляемый диод полупроницаемых мембран клетки.

Клетка в нормальных условиях полупроницаема и ее общее удельное сопротивление в зависимости от состояния составляет 20–50 кОм·см.

Растительная ткань состоит из клеток и межклеточной жидкости (рис. 12), причем межклеточная жидкость имеет по сравнению с клеткой малое удельное электрическое сопротивление и малый объем. Удельное сопротивление растительной ткани составляет примерно 8–16 кОм·см. При воздействии электрических импульсов ток течет по межклеточной жидкости, воздействует на плазмалемму и тонопласт, и клетки становятся проницаемыми для сока вакуолей.

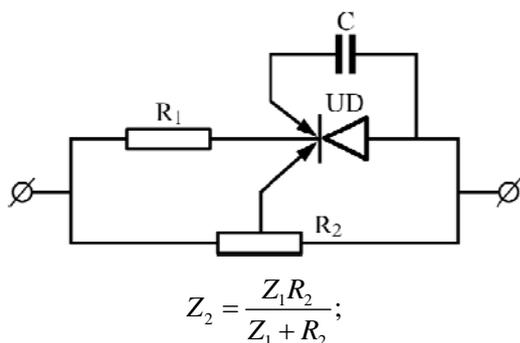


Рис. 12. Эквивалентная электрическая схема замещения ткани сочного растительного сырья и формула определения ее полного сопротивления Z_2 . R_2 – сопротивление межклеточной жидкости, Z_1 – общее сопротивление клетки.

На общее сопротивление ткани в нормальных условиях влияет только сопротивление межклеточной жидкости. С учетом того, что измеренное удельное сопротивление ткани в нормальных условиях составляет примерно 16 кОм·см, а

удельное сопротивление межклеточной жидкости примерно 100 Ом·см, коэффициент концентрации межклеточной жидкости в растительной ткани kb составит примерно 0,006.

На общее сопротивление измельченной ткани (рис. 13) влияют сопротивление сока, вышедшего из клеток ткани в процессе измельчения R_3 , и общее сопротивление ткани Z_2 . Так как измеренное удельное сопротивление измельченной ткани составляет примерно 6 кОм·см, а удельное сопротивление сока вакуоли клеток примерно 1,2 кОм·см, то коэффициент концентрации сока вакуоли в измельченной растительной ткани kc составит примерно 0,2.

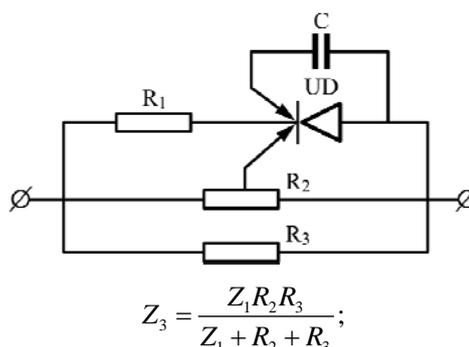


Рис. 13. Эквивалентная электрическая схема замещения измельченной ткани сочного растительного сырья и формула определения ее полного сопротивления. R_3 – сопротивление сока, вышедшего из клеток ткани в процессе измельчения; Z_3 – общее сопротивление измельченной ткани.

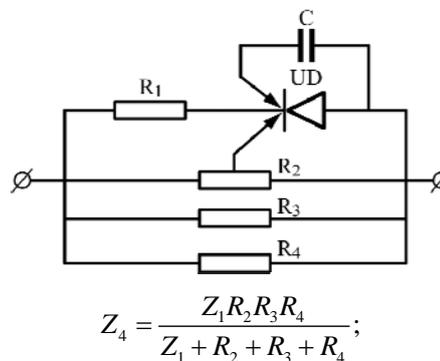


Рис. 14. Эквивалентная электрическая схема замещения измельченной электроплазмализованной ткани сочного растительного сырья и формула определения ее полного сопротивления Z_4 . R_4 – сопротивление сока, утратившего связь с клеткой в результате электроплазмоллиза измельченного растительного сырья; Z_4 – общее сопротивление измельченной электроплазмализованной ткани.

На общее сопротивление электроплазмализованной измельченной ткани Z_4 (рис. 14) влияют сопротивление сока, утратившего связь с клеткой в результате электроплазмоллиза измельченного растительного сырья R_4 , и общее сопротивление измельченной ткани Z_3 . С учетом того, что измеренное удельное сопротивление измельченной электроплазмализованной ткани растительного сырья составляет примерно 1,5 кОм·см, а удельное сопротивление сока вакуоли клеток

1,2 кОм·см, коэффициент концентрации сока вакуоли в измельченной электроплазмолизованной растительной ткани kd составит примерно 0,8.

Из приведенных эквивалентных схем замещения клетки, ткани, измельченной ткани и измельченной плазмолизованной ткани следует, что всякое воздействие (измельчение, электроплазмолиз) на растительное сырье вызывает увеличение его проницаемости и снижение удельного сопротивления. Благодаря малому удельному сопротивлению межклеточной жидкости в сравнении с удельным сопротивлением сока вакуоли происходит плазмолиз растительной ткани, находящейся в соке.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОПЛАЗМОЛИЗАТОРА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛОДОВОГО СЫРЬЯ

По результатам экспериментальных исследований разработан электроплазмолизатор для измельченного растительного сырья биполярными импульсами [21–24], продольный разрез которого представлен на рис. 15, а поперечные разрезы – на рис. 16 и 17.

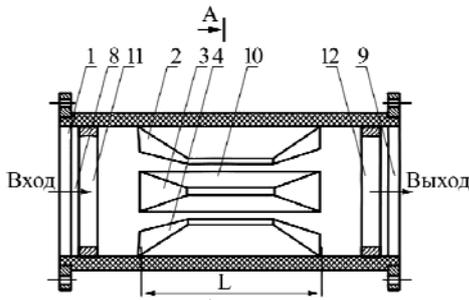


Рис. 15.

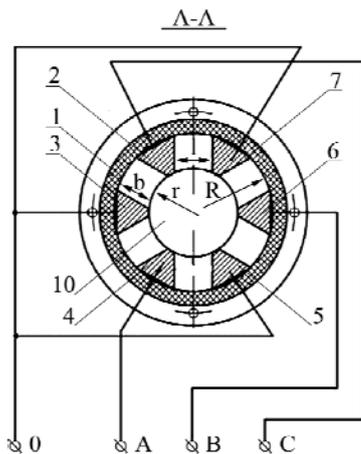


Рис. 16.

Он состоит из цилиндрического диэлектрического корпуса 1, в котором установлены электроды 2–7 в форме усеченных пирамид; 8 – вход; 9 – выход; 10 – рабочая зона; 11 и 12 – кольцевые электроды. Плазмолизатор подключается к трехфазному источнику питания.

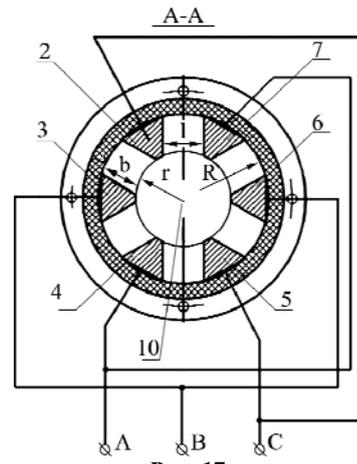


Рис. 17.

Основными параметрами, по которым различаются электроплазмолизаторы, являются: производительность, геометрия рабочей камеры, число фаз электрического тока и потребляемая мощность. Помимо конфигурации рабочей камеры влияние оказывают размеры электродов, их количество и взаимное расположение.

Расчет электроплазмолизаторов заключается в определении указанных параметров с целью обеспечения необходимых условий плазмолиза. Для этого принимаем исходные данные: вид перерабатываемого сырья; производительность технологической линии Q , т/ч; способ подачи измельченного сырья от дробилки к стекателю; диаметр мезгопровода D .

Исходя из конструкции плазмолизатора (рис. 15–17), задаются расстояние между электродами l , напряжение питания U и определяют:

– напряженность электрического поля в зоне плазмолиза $E = U/l$, В/см;

– сечение мезгопровода

$$S = \pi D^2 / 4, \text{ см}^2;$$

– длина грани электродов

$$b = 0,3D \text{ см};$$

– сечение электрода

$$S_1 = \frac{b^2}{2}, \text{ см}^2;$$

– сечение камеры плазмолиза

$$S_2 = S - nS_1, \text{ см}^2,$$

n – количество электродов, шт.;

– скорость перемещения сырья в электродной камере

$$v = \frac{Q}{3600\gamma S_2}, \text{ см/с};$$

– длина электродов

$$L = vt_0, \text{ см};$$

t_0 – время плазмолиза принято 1 с.;

– площадь электродов в фазе

$$S_3 = 2n_1bL, \text{ см}^2,$$

n_1 – количество электродов в фазе, шт.;

– ток в каждой фазе плазмоллизатора

$$I = \frac{US_3}{\rho l}, \text{ А};$$

плотность тока в фазе плазмоллизатора

$$j = \frac{I}{S_3} \leq 0,3, \text{ А/см}^2;$$

объем камеры плазмоллиза

$$V = S_2L \text{ см}^3;$$

– доля объема сырья в электродной камере от производительности технологической линии

$$k = \frac{Q\gamma}{V};$$

$$t_0 = \frac{h}{3600};$$

– по графику (рис. 3) принимаем время плазмоллиза t ;

– потребляемая удельная энергия плазмоллиза

$$\Delta W = \frac{\sqrt{3}U^2S_3kt}{Q\rho L}, \text{ Вт}\cdot\text{ч/т}.$$

ТЕСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПЛАЗМОЛИЗА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ВИНОГРАДА

Электродная камера работает следующим образом. Через вход электродной камеры 8 подается сырье, а на электроды – напряжение. Форма, размещение и подключение электродов к источнику питания позволяют создать однородное поле в зоне обработки, что обеспечивает высокую эффективность и увеличение срока эксплуатации устройства.

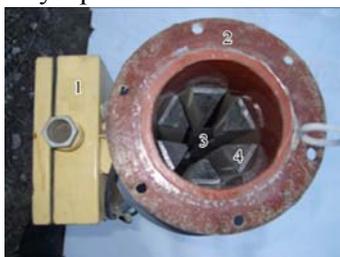


Рис. 18. Модель экспериментальной камеры плазмоллиза: 1 – клеммная коробка; 2 – фланец; 3 – камера плазмоллиза; 4 – электроды.



Рис. 19. Электроплазмоллизатор в технологической линии по переработке винограда: 1 – корпус; 2 – фланцы; 3 – мезгопровод технологической линии; 4 – клеммная коробка; 5 – кабель электропитания.

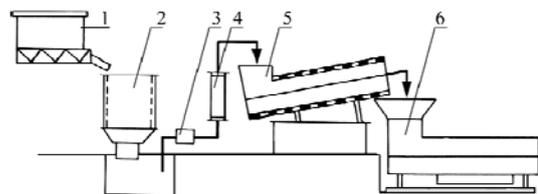


Рис. 20. Схема технологической линии по переработке винограда: 1 – бункер; 2 – дробилка; 3 – мезгонасос; 4 – электроплазмоллизатор; 5 – стекатель; 6 – пресс.

Разработанный способ электроплазмоллиза измельченного растительного сырья линейными биполярными импульсами с крутым фронтом и пологим срезом и проточный электроплазмоллизатор прошли производственные испытания в технологической линии Тараклийского винограда (рис. 18–20).

Получено увеличение выхода сока из винограда сорта «Каберне» на 3,1% и сорта «Ркацители» на 2,4%.

Качественные показатели сока свидетельствуют об отсутствии изменений по сравнению с традиционной технологией.

ВЫВОДЫ

Разработан способ электроплазмоллиза винограда линейными биполярными импульсами с крутым фронтом и пологим срезом в системе питания с глухозаземленной нейтралью, отличающийся ускорением процесса плазмоллиза и снижением удельных энергозатрат.

Экспериментально установлено, что плазмоллиз линейными биполярными импульсами с крутым фронтом и пологим срезом обеспечивает увеличение выхода сока самотека до 6%, общий выход сока – до 2,5%, содержание красящих веществ – на 20%.

На основе микрофотограммы участков поперечных срезов протопласта и стенки клетки в контроле и после плазмоллиза показано, что при электроплазмоллизе происходят глубокие изменения в протоплазме клеток, нарушение целостности плазматических оболочек – плазмалеммы и тонопласта.

Разработаны эквивалентные электрические схемы замещения и получены формулы определения полного сопротивления клетки, ткани, измельченной ткани, измельченной электроплазмоллизированной ткани.

Способ электроплазмоллиза измельченного растительного сырья линейными биполярными импульсами и проточный электроплазмоллизатор испытаны в производственной технологической линии по переработке винограда. Получено увеличение выхода сока из винограда сорта «Каберне» на 3,1% и винограда сорта «Ркацители» – на 2,4%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жилкин В.М., Грибков А.Н., Муромцев Ю.Л. Оценка результативности процесса подготовки растительных материалов к обезвоживанию. *Вестник ТГТУ*. 2009, **15**(2), 410–415.
2. Sack M., Eing C., Berghofer T., Buth L., Stangle R., Frey W. and Bluhm H. Electroporation-Assisted Dewatering as an Alternative Method for Drying Plants. *Transactions on Plasma Science*. 2008, **36**, 88–92.
3. Ngadi M.O., Bazhal M.I., Raghavan G.S.V. Engineering Aspects of Pulsed Electroporation of Vegetable Tissues. *CIGR. J of Scientific Research and Development*. 2003, **5**, 235–239.
4. Popova Natalia. Analiza posibilităților de micșorarea energiei de consum specifice la producerea aperitivelor din conserve de legume. Teze conferinței fizicienilor din Moldova, CFM-2007, 18–21 septembrie 2007, Chișinău p.167–168.
5. Христюк В.Т. Современные способы электрофизического воздействия на биосистемы, пищевое сырье и жидкие пищевые среды. *Известия вузов. Пищевая технология*. 2008, **11**(2), 155–159.
6. Алексеенко Е.В., Дикарева Ю.М. Влияние условий биокатализа ягод облепихи на выход сока. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2012, (9), 38–40.
7. Джаруллаев Д.С., Мустафаева К.К. Способ увеличения выхода сока из облепихи. *Дагестанский государственный технический университет. Известия вузов*. 2008, (3), 28–29.
8. Михайлова Т.Н. Эффективность электрообработки яблочной стружки для интенсификации пресования для получения сока. *Пищевая и перерабатывающая промышленность*. 2003. (1), 289–291.
9. Бадалян З.В., Степанова Э.Ф. Изучение возможности совершенствования технологии получения сока подорожника. *Современные наукоемкие технологии*. 2011, (1), 32–33.
10. Вавилова О.И. Моделирование и экспериментальное исследование кинетики измельчения пищевого сырья под действием импульсного электрического поля. *Пищевая и перерабатывающая промышленность*. 2004, (1), 45–47.
11. Климова Е.В. Сравнение антиоксидантной активности морковного сока, стабилизированного импульсным электрическим полем высокого напряжения. *Пищевая и перерабатывающая промышленность*. 2011, (2), 501–504.
12. Чебану В.Г., Баранов С.А., Щеглов Ю.А. Роль клеточных структур в определении электропроводности растительной ткани электрического пробоя неоднородных систем в нестационарных полях. *ЭОМ*. 1983, (5), 77–79.
13. Baranov S.A. Generalized Conductivity and Optimum Energy Release. *Technical Physics*. 1999, **44**(7), 853–854.
14. Popova N., Papcenco A., Bologa M. Influența impulsurilor electrice asupra structurii celulelor materiei prime vegetale. Teze ARA-35. 6-11 iulie, 2011, Timișoara, Romania, C. 135–137.
15. Popova N., Papcenco A., Bologa M. Dynamics of the Treatment of Vegetal Raw Materials by Electroporation. Teze MSCMP-2012. 11–14 September, 2012, Chișinău, p. 291–292.
16. Гулый И.С., Лебовка Н.И., Манк В.В., Купчик М.П., Бажал М.И., Матвиенко А.Б., Папченко А.Я. *Научные и практические принципы электрической обработки пищевых продуктов и материалов*. Киев: НУУИТ, 1994. 1–68 с.
17. Чизмаджев Ю.А., Пастушенко В.А. Электрическая стабильность биологических и модельных мембран. *Биологические мембраны*. 1989, (10), 1013–1045.
18. Папченко А.Я., Попова Н.А., Чебану В.Г., Болога М.К. Электроплазмоллиз в технологии переработки красных сортов винограда. *ЭОМ*. 2010, **46**(2), 80–82.
19. Popova N., Botoșanu N., Papcenco A., Berzoi S., Țârdea I., Ciobanu V. Proprietățile optice a sucului de portocale primit din materia primă electroplasmolizată. Materialele conferinței naționale de termotehnică cu participare internațională, ediția a IX-a, Craiova, 27–30 mai 1999, p. 203–208.
20. Popova N., Papcenco A. The Effects of Electrical Pulses to the Structure of Cells Plant Materials. *Abstracts 2nd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering*. Chișinău, Moldova, Chișinău, April, 18–20, 2013, 468–470.
21. Popova N. Dispozitiv de tăiere și electroplasmoliză a materiei prime vegetale. Brevet de invenție MD 3902 G2 2009.05.31.
22. Popova N., Papcenco A. *Electroplasmolizator pentru materie primă vegetală*. Brevet de invenție MD 3641 G2 2008.07.31.
23. Papcenco A., Popova N. *Electroplasmolizator pentru materie primă vegetală*. Brevet de invenție MD 37640 G2 2008.11.30.
24. Cobanu V., Papcenco A., Bologa M., Gaina B., Popova N., Țârdea I. *Instalație pentru electroplasmoliza materiei prime vegetale fărâmițate*. Brevet de invenție MD 3965 C2 2009.10.31.

Postynula 20.06.14

Posle dorabotki 31.10.14

Summary

The regularities of electroporation of grapes using bipolar pulses with a sharp leading edge and sloping tail with a power supply with a grounded neutral are studied. The research methodology, experimental results on the effect of an electric field intensity on the change in the specific resistivity of raw materials, of the duration and specific energy of plasmolysis, of the juice and dyes yield, and the results of microscopic studies of the structure of the fruit raw materials are described. Equivalent electrical circuits of the plasmolysis process, a method of the electroporator calculation, and the test results obtained at the production line for grapes processing are given.

Keywords: electroporation, electrical pulses, specific resistivity, biological materials, cellular structure.