
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

М.И. Бажал^{1,2}, М.О. Нгади¹, Ж.С.В. Рагаван¹

СИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ДАВЛЕНИЯ И ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРЕССОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ

¹*Department of Agricultural and Biosystems Engineering, McGill University, Macdonald Campus,
21111 Lakeshore Road, Ste-Anne-de-Bellevue, Quebec, Canada H9X 3V9*

²*Национальный университет пищевых технологий,
ул. Владимирская, 68, г. Киев, 01033, Украина*

Введение

Практический интерес к импульсной электрообработке биологических объектов связан прежде всего с нетермическим увеличением проницаемости клеток в электрическом поле [1, 2]. Диэлектрический пробой [3] или так называемый электроплазмолиз [4 – 6] биологических клеток происходит в результате образования и роста пор в клеточных мембранах, поляризуемых электрическим полем [7, 8]. В пищевых технологиях импульсная электрообработка используется для нетермической пастеризации жидких продуктов [2, 9] и интенсификации массообменных процессов в растительных тканях [10, 11]. В производствах, связанных с переработкой растительного сырья, электроплазмолиз предлагается использовать как дополнительный метод для повышения эффективности таких процессов, как прессование [12], разделительное центрифугирование [13, 14], экстрагирование [15, 16], осмотическое обезвоживание [17], сушка [18, 19]. Как известно, эффективность данных процессов определяется структурными свойствами сырья. Поэтому изменение этих свойств в результате электроплазмолиза растительной ткани является важным фактором оптимизации условий как самой электрообработки, так и комбинирования ее с другими методами переработки сырья [11, 20].

Необходимо отметить, что природа электроплазмолиза и локализация пор изучены еще недостаточно. Общепринятым механизмом электроразрушения суспендированных клеток, таких как, например, микроорганизмы и эритроциты, является образование пор в липидном матриксе клеточных мембран [21]. Электроплазмолиз клеток биологических тканей (растительных и животных) также может быть объяснен электропорацией клеточных мембран [11] и нарушением целостности клеточных стенок [22]. При этом наблюдается собственно плазмолиз клеток, сопровождающийся вытеканием из них сока и уменьшением объема вакуоли [23, 24]. Однако сам механизм влияния электрического поля на клеточные стенки мало изучен и остается во многом неясным.

Многочисленные исследования показывают, что растительная ткань размягчается в результате плазмолиза различными методами, самым известным из которых является тепловая обработка (ошпаривание) [22, 25]. Исследуя электро- и термоплазмолиз сахарной свеклы, А.Б. Матвиенко [26] установил, что модуль сжимаемости ткани уменьшался с 12,5 МПа для необработанных образцов до 6,5 МПа – после электрообработки и до 3 МПа – после термоплазмолиза перегретым паром. Аналогичные результаты получены для яблок [27] и моркови [17], когда наблюдалось уменьшение модуля сжимаемости образцов в 1,5 и более раз после их обработки импульсным электрическим полем. Однако зависимость механических свойств тканей от степени электроплазмолиза практически не изучена.

Необходимо отметить, что в общем случае деформация растительной ткани является частично необратимой, причем степень этой необратимости усиливается с увеличением деформации образца [28]. Однако на начальной стадии прессования при небольшой степени деформации растительные ткани проявляют преимущественно эластичные свойства, когда наблюдается линейная зависимость между нагрузкой и деформацией. В большинстве практических случаев используют закон Гука для упрощенного описания эластичных свойств растительных материалов [29]:

$$P = G\delta, \quad (1)$$

где P – давление, приложенное к образцу, G – модуль сжимаемости (Юнга), δ – относительная деформация образца.

Различные компьютерные модели и микроскопические исследования позволили значительно продвинуться в изучении механизма развития плазмолиза клеток в биологических тканях. Установлено, что электроплазмолиз тканей характеризуется начальным, инициирующим пробоем отдельных одиночных клеток с последующим их объединением и ростом кластеров плазмоллизированных клеток [10]. Известно, что упругость плазмоллизированных клеток снижается в результате уменьшения тургорного давления. Таким образом, возникает задача исследования механических свойств системы, содержащей элементы с характеристиками упругости, различными для целых и плазмоллизированных клеток. Практическая важность такой задачи определяется необходимостью изучения влияния электрообработки на процессы прессования растительного сырья.

Целью настоящей работы является изучение влияния электроплазмолиза на структурные изменения растительной ткани и установление взаимосвязи между степенью плазмолиза и механическими свойствами ткани.

Приготовление образцов

Использовались яблоки сортов Кортланд (Cortland) и Макинтош (McIntosh). Образцы цилиндрической формы диаметром $57 \pm 0,5$ мм и толщиной $15 \pm 0,5$ мм вырезались из срединной части яблок. Начальная влажность ткани, определенная методом высушивания, составляла 81 – 84%.

Экспериментальная установка

Лабораторная пресс-ячейка включала цилиндр из изолирующего материала, а также металлические поршень и диск из нержавеющей стали, выполняющие роль параллельных дисковых электродов. Рабочая плоская поверхность поршня и диск имели перфорацию для дренажа сока из прессуемого материала. Образец размещался между электродами.

Электроплазмолиз проводился прямоугольными монополярными импульсами длиной 300 мкс с частотой 1 Гц при напряженности электрического поля 1000 В/см. Максимальное количество приложенных импульсов достигало 60. Параметры электрообработки выбраны таким образом, чтобы не допустить нагрев образца более чем на 3°C. Кроме того, эти условия препятствовали возникновению так называемого «джамминг» эффекта, при котором наблюдаются периоды замедления и ускорения кинетических зависимостей степени электроплазмолиза при недостаточно высокой электрической напряженности (< 800 В/см) плазмоллизующего поля [30]. Температура образцов в течение электрообработки контролировалась с помощью термометрической системы на основе термодары (Hotmuh, DCC Corp., Pennsauken, NJ, USA).

В работе использован генератор электрических импульсов Velonex–350–12 (Pulse Engineering, Inc., CA, USA). Импульсное напряжение и ток измерялись с помощью высоковольтного щупа (модель P6015A, Tektronix Inc., OR, USA) и импульсного трансформатора тока (модель 411, Pearson Electronics, Inc., CA, USA), подсоединенных к цифровому запоминающему осциллографу Tektronix TDS 3012 (Tektronix Inc., OR, USA). Образцы яблок обрабатывались через 180–240 с после их получения, когда завершался переходный процесс увеличения проводимости ткани, связанный с миграцией влаги из поврежденных клеток поверхности образцов [31].

Электрофизические свойства образцов измерялись низковольтным (около 14 В) переменным током силой до 800 мА при частоте 60 Гц, позволяющей избегать нежелательных поляризационных эффектов [32]. Электропроводность ткани определялась по соотношению тока и падению напряжения на образце, измеренных с помощью мультиметра Fluke–187 (Fluke Corp., USA). Измерения проводились через 10 с после окончания электрообработки. Индекс дезинтеграции ткани z вычислялся как [33]

$$z = \frac{\sigma - \sigma_i}{\sigma_d - \sigma_i}, \quad (2)$$

где σ и σ_i – текущая и начальная электропроводности образца соответственно, σ_d – максимальная электропроводность полностью плазмоллизированного образца 60 импульсами длиной 300 мкс при напряженности электрического поля 1000 В/см.

После проведения электрообработки образцы подвергались тесту на сжатие. Механические свойства образцов исследовались с помощью установки Instron (модель 1011, Instron Corp., Canton, MA, USA) с максимальным усилием на плунжере до 20 кН. Каждый образец ткани, находясь после

электрообработки в той же цилиндрической пресс-ячейке, сжимался с постоянной скоростью 10 мм в минуту.

Определение пористости

Пористость, распределение пор по размерам, объемная и скелетная плотности яблочной ткани определялись с помощью ртутного порометра Autopore III 9400 (Micromeritics Instrument Corporation, GA, USA). Цилиндрические образцы яблок (контрольные и обработанные электрическим полем) разрезали на кубические кусочки со стороной от 3 до 5 мм, которые в течение 2 суток сушились в лабораторном сушильном шкафу (модель 750 F, Fisher Scientific, USA) при температуре 45°C, чтобы не допустить термоплазмолиза ткани, наступающего при температуре 50 – 55°C [15, 18, 34]. Для проведения измерений высушенные образцы яблочной ткани помещались в рабочую часть порометра объемом 5 см³. Используемая модель порометра позволяла определять наличие в среде пор размером от 0,015 до 72 мкм.

Пористость ткани ε определялась как отношение общего объема пор V_p к объему образца V :

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V}. \quad (3)$$

Распределение пор в ткани определялось парциальной пористостью ε_d , то есть долей объема пор $V_p(d)$ определенного диаметра d в общем объеме образца V :

$$\varepsilon_d = \frac{V_p(d)}{V}. \quad (4)$$

Тогда

$$V_p = \sum_{d=d_{\min}}^{d_{\max}} V_p(d). \quad (5)$$

Следовательно, согласно уравнениям (3) – (5), общая пористость ткани может быть также выражена в виде

$$\varepsilon = \sum_{d=d_{\min}}^{d_{\max}} \varepsilon_d. \quad (6)$$

Усушка S_v , то есть изменение объема образцов после их сушки определялась как

$$S_v = \frac{V}{V_i}, \quad (7)$$

где V_i и V – объем образца до и после сушки соответственно. Объем образцов определялся методом Архимеда с использованием пикнометра (точность $\pm 0,05$ мл). Рабочей средой служила вода, продолжительность пребывания образцов ткани в пикнометре не превышала 30 с.

Статистический анализ

Все данные получены путем усреднения по трем результатам, полученным в идентичных условиях. Статистическая обработка данных произведена с использованием системы Sigma Plot (SigmaPlot 2000, Ver. 6, SPSS Inc., Chicago, IL).

Результаты и обсуждение

Распределение пор в яблочной ткани

В таблице представлены показатели некоторых физических свойств высушенных яблочных образцов как контрольных, так и предварительно плазмолизированных импульсным электрическим полем.

Как видно из таблицы, электроплазмолиз значимо (с доверительным интервалом 5%) влияет на насыпную и скелетную плотность, размер пор и степень усушки яблочной ткани. При этом сокращение объема образцов в ходе их сушки на 22 – 30% меньше для ткани, подвергшейся электрообработке. Такой результат можно объяснить, по-видимому, тем, что по сравнению с контрольными образцами натяжение клеточных стенок плазмолизированной ткани в процессе ее сушки ослабляется в результате образования пор и фрагментации волокон клетчатки под воздействием электрического поля.

Объемная и скелетная плотности контрольных образцов составили соответственно 0,46 и 1,39 кг/м³, а также 0,51 и 1,42 кг/м³ – для сорта Кортланд и Макинтош. Для образцов, подвергнутых электрообработке, получены значения 0,38 и 1,52 кг/м³ для сорта Кортланд, а для сорта Макинтош – 0,45 и 1,47 кг/м³. Авторы [35] измеряли объемную и скелетную плотности яблочной ткани, высушен-

ной при 70°C, и получили при этом 0,51 и 1,60 кг/м³ соответственно. В работе [36] измеряли объемную плотность образцов различных растительных тканей, полностью обезвоженных с использованием различных методов, в диапазоне 0,12 – 0,73 кг/м³. При этом скелетная плотность яблок находилась в пределах 1,40 – 1,65 кг/м³ [36]. Некоторый разброс в измеренных величинах плотностей может быть отнесен к различиям в методах сушки и условиях измерений. Таким образом, значения плотности образцов, измеренные в настоящей работе, находятся в интервале, приводимом в литературе. Уменьшение объемной плотности ткани после ее электрообработки объясняется увеличением в результате этой обработки пористости ткани. Труднее объяснить увеличение действительной плотности ткани, подвергнутой электроплазмолизу. По всей видимости, это может быть связано с тем, что в контрольных образцах имелись поры диаметром менее 0,15 мкм, которые не заполнялись ртутью и таким образом их объем в расчетах считался заполненным материалом клетчатки. Под действием электрического поля какая-то часть этих пор расширилась до таких размеров, что их заполнение ртутью стало возможным. При этом объем скелетной части ткани уменьшился на величину объема этих увеличившихся пор, а масса практически не изменилась, в результате чего расчетная величина скелетной плотности должна была возрасти, что и наблюдалось экспериментально.

Распределение пор в яблочной ткани сорта Кортланд представлено на рис. 1. Экспериментальные данные объема пор в соответствие с их средним диаметром показаны на рис. 1,а. Рассчитанные по этим данным значения парциальной пористости яблочной ткани (4) представлены на рис. 1,б. В последнем случае, по сравнению с рис. 1,а, наблюдается некоторое сближение зависимостей для плазмолизованной и контрольной ткани, что объясняется меньшей усушкой, а следовательно, большим объемом плазмолизованных образцов. Аналогичные зависимости получены и для яблок Макинтош.

Анализируя графики на рис.1, можно заметить, что для плазмолизованной ткани по сравнению с контрольными образцами более высокие значения объема пор (рис. 1,а) и пористости (рис. 1,б) устойчиво наблюдаются в диапазоне среднего диаметра пор между ~ 0,1 и 5 мкм. Такой результат можно объяснить образованием новых пор при электрообработке, что привело к уменьшению среднего размера пор с 7,81 до 5,86 мкм для сорта Кортланд и с 6,64 до 5,32 для сорта Макинтош (см. таблицу).

Объемная (ρ_b) и скелетная (ρ_s) плотность, пористость (ε), средний диаметр пор ($\langle d \rangle$) и усушка (s_v) образцов яблок, высушенных при 45°C. Электроплазмолиз проводился 60 импульсами длиной 300 мкс с частотой 1 Гц при электрической напряженности 1000 В/см

Образец	ρ_b , кг/м ³	ρ_s , кг/м ³	ε	$\langle d \rangle$, мкм	s_v
Контроль					
Кортланд	0,46 ± 0,05	1,39 ± 0,06	0,67 ± 0,02	7,81 ± 0,29	0,20 ± 0,02
Макинтош	0,51 ± 0,04	1,42 ± 0,05	0,63 ± 0,015	6,64 ± 0,24	0,18 ± 0,02
Плазмолиз					
Кортланд	0,38 ± 0,03	1,52 ± 0,05	0,75 ± 0,03	5,86 ± 0,16	0,26 ± 0,01
Макинтош	0,45 ± 0,03	1,47 ± 0,03	0,69 ± 0,02	5,32 ± 0,14	0,22 ± 0,01

Средняя толщина клеточных стенок растительной ткани колеблется в пределах 0,1 – 10 мкм [37, 38]. Биологическая мембрана (плазмалемма), покрывающая стенки клеток, имеет толщину 7 – 10 мкм [39, 40]. Следовательно, при сопоставлении этих величин с полученными экспериментальными данными ясно, что электроплазмолиз приводит к образованию новых пор с размером, сопоставимым по порядку величины с толщиной клеточных стенок и таким образом можно сделать вывод, что поры в результате электрообработки образуются не только в мембранах, но и в клеточных стенках.

Тест на сжатие

Рис. 2 представляет характерные зависимости между давлением сжатия и относительной деформацией для контрольного и плазмолизованных образцов.

Характерное эластичное сжатие образцов наблюдалось при степенях сжатия не более 0,15. При дальнейшем сжатии отмечен перегиб кривых, соответствующий достижению равновесия между внешним сжимающим усилием и внутренним тургорным давлением клеток. Как видно из данных рис.2, электрообработка влияет на положение этих точек перегиба. Увеличение количества импульсов уменьшает величину равновесного давления, что свидетельствует об уменьшении тургорного давления в клетках. Дальнейшее повышение внешнего давления приводит к разрушению клеточных стенок и раздавливанию образца [38, 41, 42]. Внешнее давление уменьшается, как показано на рис.2. Максимально достигаемое давление сжатия соответствует давлению раздавливания.

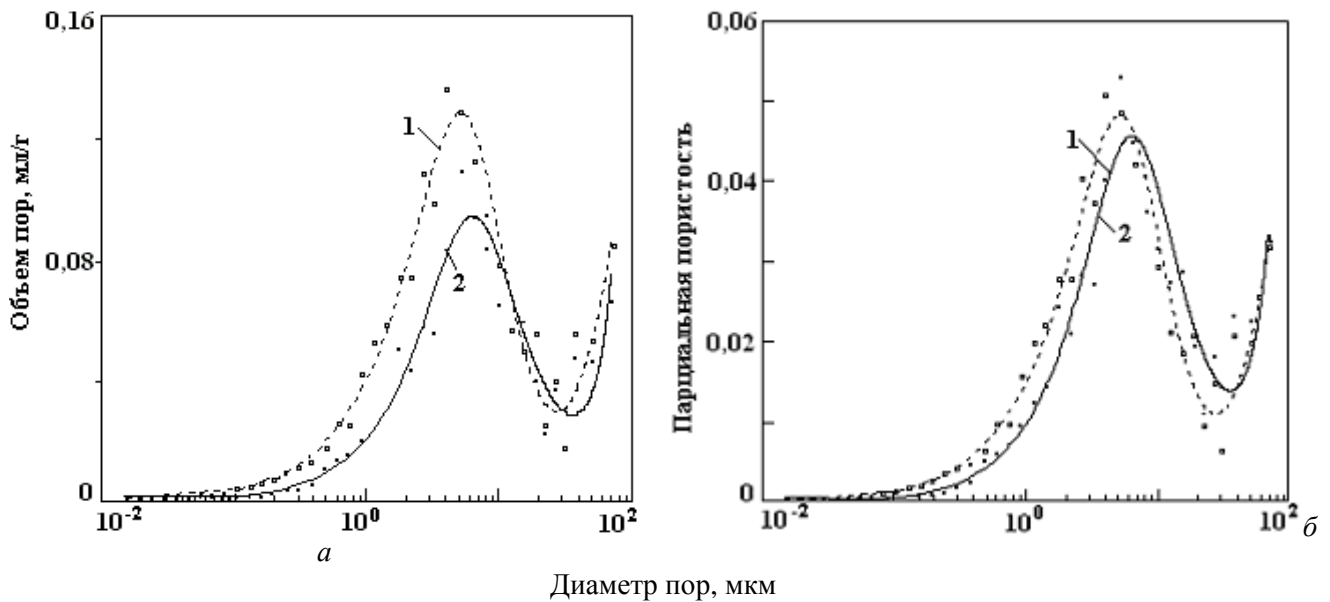


Рис. 1. Зависимость удельного объема пор (а) и парциальной пористости (б) от диаметра пор. Образцы обрабатывались 60 импульсами длиной 300 мкс с частотой 1 Гц при напряженности 1000 В/см. Индекс дезинтеграции $z = 0,9 - 1$. Точками представлены экспериментальные данные, усредненные по трем измерениям. Кривые на графике являются результатом сглаживания данных методом наименьших квадратов. 1 – плазмолиз; 2 – контроль

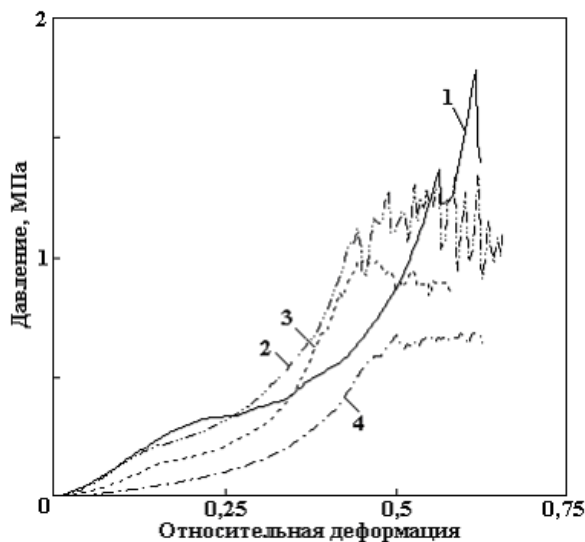


Рис. 2. Характерные кривые сжатия образцов ткани яблок (сорт Кортланд), обработанных электрическими импульсами n (1 – 0; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 60) длиной 300 мкс с частотой 1 Гц при электрической напряженности 1000 В/см; кривая $n = 0$ соответствует контрольному образцу

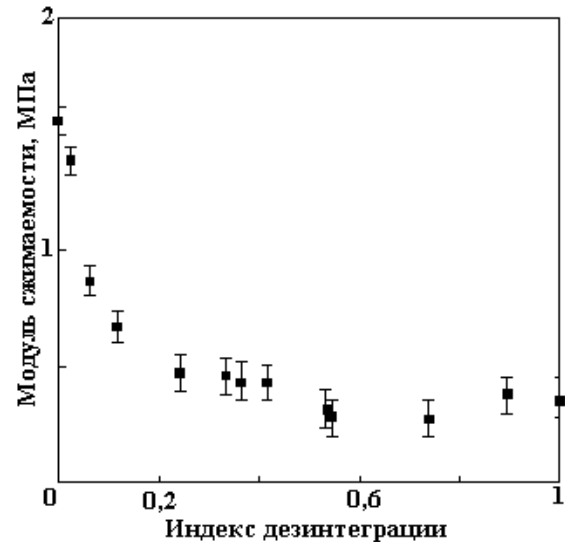


Рис. 3. Зависимость модуля сжимаемости от величины индекса дезинтеграции ткани яблок, обработанной различным количеством импульсов (до 60), длиной 300 мкс с частотой 1 Гц при напряженности 1000 В/см.

Величина модуля сжимаемости определялась по углу наклона кривых сжатия для малых степеней деформации, когда наблюдается эластичный характер сжатия. На рис. 3 представлена зависимость модуля сжимаемости образцов от индекса дезинтеграции ткани, рассчитанного по уравнению (2). Представленная зависимость обнаруживает резкое уменьшение модуля сжимаемости даже при небольшом увеличении индекса дезинтеграции до $z \approx 0,25$.

В работе [47] проведены исследования сжатия клеточных систем с помощью сеточной модели растительной ткани. Результаты позволили объяснить наблюдаемое экспериментально резкое увеличение сжимаемости растительной ткани после ее обработки электрическим полем. Это связано с тем, что плазмолиз клеток нарушает равновесное состояние тургорных давлений соседних целых клеток и необходимое для их сжатия внешнее давление значительно снижается. Таким образом, модуль сжимаемости этих клеток и всей системы в целом снижается.

С другой стороны, прессование во время электрообработки повышает эффективность электроплазмолиза, как показано в [32, 33]. В этом и проявляется синергетическое взаимодействие электроплазмолиза и давления. Расчеты по разработанной модели позволили оценить снижение модуля сжимаемости плазмолизованных и окружающих их клеток на 70 – 80% [47]. Этот результат доказывает, что эффективность процесса прессования растительной ткани в значительной степени определяется равновесием давления на клеточные стенки между соседними клетками. Даже относительно невысокая степень электроплазмолиза ткани (на уровне 25 – 30%) нарушает это равновесие, тем самым значительно снижая давление прессования и интенсифицируя процесс извлечения сока.

Для оценки влияния электрообработки на механические свойства самих клеточных стенок получена зависимость относительного давления раздавливания ткани $P^* = P/P_{\max}$ от индекса дезинтеграции z (рис. 4).

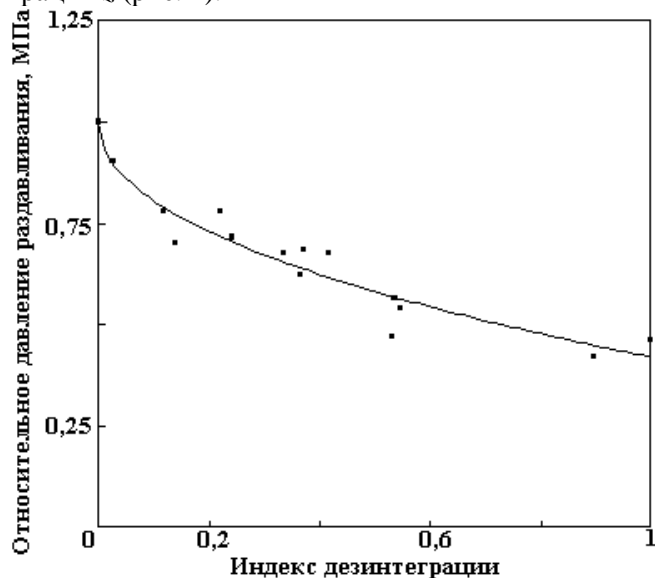


Рис. 4. Зависимость между относительным давлением раздавливания и индексом дезинтеграции для образцов ткани яблок (сорт Кортланд), обработанной импульсами (до 60) длиной 300 мкс с частотой 1 Гц при напряженности 1000 В/см.

Представленные на рис. 4 экспериментальные данные сглажены уравнением вида

$$P^* = 1 - kz^b, \quad (8)$$

где k – коэффициент сглаживания, b – показатель степени. Параметры уравнения (7) определены с помощью метода наименьших квадратов (коэффициент корреляции 0,922): $k = 0,58 \pm 0,03$ и $b = 0,47 \pm 0,06$.

Зависимость между индексом дезинтеграции z и степенью повреждения ткани (степенью плазмолиза) p описывается уравнением Арчи [33, 43]:

$$z = p^m, \quad (9)$$

где $m = 1,8 - 2,5$ для ткани яблок, плазмолизованной электрическим полем в диапазоне напряженностей от 100 до 1500 В/см [33]. Нелинейная зависимость между индексом дезинтеграции и степенью плазмолиза ткани объясняется влиянием неоднородности структуры ткани на ее электропроводность [44, 45]. Кроме того, в результате электроплазмолиза могут наблюдаться различные переходные процессы, происходящие в ткани, такие как миграция влаги, перераспределение жидкой (влага) и газовой (воздух) фаз в поровом пространстве клеточной системы, которые оказывают влияние на проводящие свойства растительной ткани [31, 46].

Преобразуя уравнения (8) и (9), получим

$$P = P_{\max} - kp^s, \quad (10)$$

где $s = mb$. Принимая во внимание величины $m = 1,8 - 2,5$ и $b = 0,47$, упомянутое выше, значение показателя степени s в уравнении (10) оказывается в диапазоне 0,85 – 1,18 со средним значением $s \approx 1$. Этот результат обнаруживает практически линейную зависимость между давлением раздавливания и степенью плазмолиза ткани. Таким образом, полученная зависимость показывает, что электрообработка уменьшает прочность каркасной структуры клеток.

Выводы

Изучено влияние импульсного электроплазмолиза на структурные свойства ткани яблок. Результаты показали, что после электрообработки пористость ткани исследованных образцов увеличилась с 67 до 75% и с 63 до 69% в зависимости от сорта яблок. Размер индуцированных пор по порядку величины был сравним с толщиной клеточных стенок. Анализ механических свойств ткани яблок показал, что тургорное давление и давление раздавливания уменьшаются с увеличением интенсивности электрической обработки. Эти данные позволили сделать вывод, что электроплазмолиз влияет не только на биологические мембраны, но и на целостность клеточных стенок.

Установлена линейная зависимость между давлением раздавливания и степенью плазмолиза ткани.

Проведенные исследования позволили расширить понимание синергетического механизма совместного действия механических и электрических факторов на плазмолиз растительной ткани.

ЛИТЕРАТУРА

1. Knorr D., Angersbach A. Impact of high intensity electric field pulses on plant membrane permeabilization // Trends Food Sci. Technol. 1998. V.9. P. 185 – 191.
2. 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.
3. Zimmermann U., Pilwat G., Beckers F., Rieman F. Effects of external electric fields on cell membranes // Bioelectrochem. Bioenerg. 1976. V.3. P. 58 – 83.
4. McLellan M.R., Kime R.L., Lind L.R. Electroporation and other treatments to improve apple juice yield // J. Sci. Food Agric. 1991. V.57. P. 303 – 306.
5. Gudmundsson M., Mafsteinsson H. Effect of electric field pulses on microstructure of muscle foods and roes // Trends Food Sci. Technol. 2001. V.12. P.122 – 128.
6. Лазаренко Б.П., Фурсов С.П., Щеглов Ю.А. и др. Электроплазмолиз. Кишинев, 1977.
7. Winterhalter M., Helfrich W. Effect of voltage on pores in membranes // Phys. Rev. A. 1987. V.36(12). P. 5874 – 5876.
8. Teissie J., Eynard N., Gabriel B., Rols M.P. Electroporation of cell membranes // Advanced Drug Delivery Rev. 1999. V.35. P.3 – 19.
9. Barsotti L., Dumay E., Mu T.H., Diaz M.D.F., Cheftel J.C. Effects of high voltage electric pulses on protein-based food constituents and structures // Trends Food Sci. Technol. 2001. V.12. P.136 – 144.
10. Гулый И.С., Лебовка Н.И., Манк В.В. и др. Научные и практические принципы электрической обработки пищевых продуктов и материалов. Киев, 1994.
11. Ade-Omowaye B.I.O., Angersbah A., Taiwo K.A., Knorr D. Use of pulsed electric field pretreatment to improve dehydration characteristics of plant based foods // Trends Food Sci. Technol. 2001. V.12(8). P. 285 – 295.
12. Bazhal M.I., Vorobiev E.I. Electrical treatment of apple slices for intensifying juice pressing // J. Sci. Food Agric. 2000. V.80. P.1668 – 1674.
13. Beveridge T. Juice extraction from apples and other fruits and vegetables. Critical Rev. Food Sci. Nutr. 1997. V.37(5). P.449 – 469.
14. Knorr D., Angersbach A., Eshtiaghi M.N., Heinz V., Lee D.U. Processing concepts based on high intensity electric field pulses // Trends Food Sci. Technol. 2001. V.12(4). P.129 – 135.
15. Jemai A.B. Contribution a l'étude de l'effet d'un traitement électrique sur les cossettes de betterave a sucre. Incidence sur le procédé d'extraction. Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, 1997.
16. Купчик М.П. Разработка технологии сахара из свеклы с применением электрических полей низкой частоты: Автореф. дис. докт. техн. наук. М., 1991.
17. Rastogi N.K., Eshtiaghi N.M., Knorr D. Accelerated mass transfer during osmotic dehydration of high intensity electrical field pulse pretreated carrots // J. Food Sci. 1999. V.64(6). P.1020 – 1023.
18. Ade-Omowaye B.I.O., Angersbah A., Eshtiaghi N.M., Knorr D. Impact of high intensity electric field pulses on cell permeabilisation and as pre-processing step in coconut processing // Innovative Food Sci. Emerging Technol. 2000. V.1(3). P.203 – 209.
19. Бордиян В.В. Интенсификация сушки растительного сырья электроплазмолизом: Автореф. дис. канд. техн. наук. М., 1991.
20. Bazhal M.I., Lebovka N.I., Vorobiev E.I. Pulsed electric field treatment of apple tissue during compression for juice extraction // J. Food Eng. 2001. V.50(3). P.129 – 139.
21. Weaver J.C., Chizmadzhev Y.A. Theory of electroporation: a review // Bioelectrochem. Bioenerg. 1996. V.41. P.135 – 160.
22. Rojas A.M., Castro M.A., Alzamora S.M., Gershenson L.N. Turgor pressure effects on textural behaviour of honeydew melon // J. Food Sci. 2001. V.66(1). P.111 – 117.
23. Чебану В.Г. Повышение эффективности электроплазмолиза растительного сырья: Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев, 1987.
24. Fincan M., Dejmek P. In situ visualization of the effect of a pulsed electric field on plant tissue // J. Food Eng. 2002. V.55(3). P.223 – 230.
25. Krokida M.K., Oreopoulou V., Maroulis Z.B., Marinos-Kouris D. Effect of pre-treatment on viscoelastic behaviour of potato strips // J. Food Eng. 2001. V.50. P.11 – 17.

26. Матвиенко А.Б. Интенсификация извлечения растворимых веществ электрообработкой растительного сырья и воды: Автореф. дис. докт. техн. наук. Киев, 1996.
27. Taiwo K.A., Angersbach A., Ade-Omowae B.I.O., Knorr D. Effects of pretreatments on the diffusion kinetics and some quality parameters of osmotically dehydrated apple slices // *J. Agric. Food Chem.* 2001. V.49. P.2804 – 2811.
28. Blahovec J. Improved rate controlled model for stress relaxation in vegetable tissue // *Int. Agrophysics.* 2001. V.15. P.73 – 78.
29. Finney E.E., Hall C.W. Elastic properties of potatoes // *Trans. ASAE.* 1967. V.10(1). P.4 – 8.
30. Lebovka N.I., Bazhal M.I., Vorobiev E. Simulation and experimental investigation of food material breakage using pulsed electric field treatment // *J. Food Eng.* 2000. V.44. P.213 – 223.
31. Lebovka N.I., Bazhal M.I., Vorobiev E. Pulsed electric field breakage of cellular tissues: visualization of percolative properties // *Innovative Food Sci. Emerging Technol.* 2001. V.2(2). P.113 – 125.
32. Bazhal M.I. 2001. Etude du mécanisme d'électroperméabilisation des tissus végétaux. Application à l'extraction du jus des pommes. Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, 2001.
33. Lebovka N.I., Bazhal M.I., Vorobiev E. Estimation of characteristic damage time of food cellular materials in pulsed electric fields // *J. Food Eng.* 2002. V.54. P.337 – 346.
34. Серебряков Р.А., Бажал М.И., Купчик М.П. и др. Определение энергетического барьера тепловой денатурации клеток при термоплазмолизе сахарной свеклы // Научные труды Национального университета пищевых технологий. 2002 (на украинском языке).
35. Zogsas N.P., Maroulis Z.B., Marinos-Kouris D. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying // *Drying Technol.* 1994. V.12(7). P.1653 – 1666.
36. Krokida M.K., Maroulis Z.B. Structural properties of dehydrated products during rehydration // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2001. V.36. P.529 – 538.
37. Mauseth J.D. Botany: An Introduction to Plant Biology. Philadelphia. Saunders College Pub. 1991. P.50 – 56.
38. Jackman R.L., Stanley D.W. Perspectives in the textural evaluation of plant foods // *Trends Food Sci. Technol.* 1995. V.6(6). P.187 – 194.
39. Raven P.H., Evert R.F., Curtis H. Biology of plants. 3^d ed. N.-Y. Worth Publishers, 1981. P.16 – 17.
40. Stanier R.Y., Doudoroff M., Adelberg E.A. The microbial world. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Inc., 1970. P.325 – 326.
41. Sajnin C., Gerschenson L.N., Rojas A.M. Turgor pressure in vegetable tissues: comparison of the performance of incipient plasmolysis technique using mannitol and polyethylenglycol // *Food Res. Int.* 1999. V.32(8). P.531 – 537.
42. Wu H., Pitts M.J. Development and validation of a finite element model of an apple fruit cell // *Postharvest Biol. Technol.* 1999. V.16. P.1 – 8.
43. Archie G.E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics // *Trans. AIME.* 1942.. V.146. P.54 – 62.
44. Angersbach A., Heinz V., Knorr D. Effects of pulsed electric fields on cell membranes in real food systems // *Innovative Food Sci. Emerging Technol.* 2000. V.1. P.135 – 149.
45. Wang C.S., Kuo S.Z., Kuo-Huang L.L., Wu J.S.B. Effect of tissue infrastructure on electric conductance of vegetable stems // *J. Food Sci.* 2001. V.66(2). P.284 – 288.
46. Aguilera J.M., Stanley D.W., Baker K.W. New dimensions in microstructure of food products // *Trends Food Sci. Technol.* 2000. V.11(1). P.3 – 9.
47. Bazhal M.I., Ngadi M.O., Raghavan G.S.V. Modeling compression of cellular systems exposed to combined pressure and pulsed electric field // *Trans. ASAE.* 2002 (submitted).

Поступила 16.12.02

Summary

The influence of pulsed electric field (PEF) electroplasmolysis on compressibility of apple tissue were investigated as a function of the tissue plasmolysis degree. It has been established that PEF treatment increases apple tissue porosity from 63 to 69% and from 67 to 75% in dependency of apple variety. Sizes of the PEF induced pores were comparable with the cell wall thickness. The analysis of changes in structural and mechanical properties of the samples after PEF treatment allowed to make conclusion that electroplasmolysis affects not only biological membranes but also cell wall integrity of tissue. Significant reduction in tissue elastic modulus even at low plasmolysis degree (about 25 – 30%) has been explained in the term of synergy between pressure and PEF.