Список використаних джерел

1. Левченко Ю.В., Басова Ю.О., Попов С.В. STEM-технології при викладанні дисциплін професійної підготовки інженерів. *Актуальні питання забезпечення якості вищої освіти*: матер. 55 наук.-метод. конф., м. Полтава, ПДАУ, 21-22 лютого 2024 р. Полтава, 2024. С. 165-168. DOI: https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28757537.v1

2. Івахнов А. В., Кулапін О. В., Махотіло К. В., Лазуренко О. П., Булгаков О. В., Шокарьов Д. А. STEM-конструктор «Фотоелектрична система» для очної та дистанційної освіти. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит.* 2024. №12(203). С. 5-20. DOI: https://doi.org/10.20998/2313-8890.2024.12.01

3. Zachariadou K., Yiasemides K., Trougkakos N. A Low-Cost Computer-Controlled Arduino-Based Educational Laboratory System for Teaching the Fundamentals of Photovoltaic Cells. *European Journal of Physics*. 2012. Vol. 33, No. 6. P. 1599-1610.

4. Vijayakumar P., Rajasekar N. Design and Development of Low-Cost Photovoltaic Module Characterization Educational Demonstration Tool // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 46, No. 11. P. 5433-5440. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.135

5. Alqahtani A., Alsaffar M., El-Sayed M., Behbehani H. A photovoltaic system experiment in a laboratory environment. *International Journal of Electrical Engineering Education*. 2018. Vol. 55, Is. 1. P. 37-52. DOI: https://doi.org/10.1177/0020720917750956

6. Попов С.В., Левченко Ю.В., Петраш О.В., Попов К.С. Експериментальне дослідження режимів інтелектуального імпульсного зарядного пристрою. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*, 2024 (1), 122-135. DOI: https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-9

УДК 631.563:537.52

ЕЛЕКТРОПЛАЗМОЛІЗ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ: ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТА МЕТОД ЕЛЕКТРИЧНОГО КОНТРОЛЮ ДЕЗІНТЕГРАЦІЇ КЛІТИННОЇ СТРУКТУРИ

Мардзявко В. А., Руденко А. Ю.
Миколаївський національний аграрний університет

Актуальність. Підвищення ефективності соковиділення, екстрагування та сушіння рослинної сировини потребує керованої зміни її клітинної структури. Альтернативою енергоємним традиційним методам є електроплазмоліз, який у міжнародній літературі розглядається як електропорація, електропермеабілізація та PEF-обробка.

Мета роботи – дослідити фізичні закономірності електроплазмолізу та визначити електричні параметри, що характеризують ступінь дезінтеграції клітинної структури за результатами реєстрації струму.

Теоретичні основи. У термінології електричної обробки рослинної сировини електроплазмоліз – це електрично індуковане порушення цілісності клітинних мембран і підвищення їх проникності. Під дією електричного поля виникає трансмембранна напруга, яка за перевищення критичного рівня спричиняє утворення пор у мембранах [8]. Зі збільшенням напруженості поля, тривалості та питомої енергії впливу відбувається необоротна електропермеабілізація і руйнування клітин, що сприяє виходу внутрішньоклітинної вологи та інтенсифікації соковиділення, екстрагування, сушіння й масоперенесення.

Електричні параметри процесу. Основним параметром є напруженість електричного поля:

$$E = \frac{U}{d}; \tag{1}$$

де U – напруга між електродами, В; d – відстань між електродами, м. Проходження струму супроводжується джоулевим тепловиділенням. Питома потужність і питома енергія, передана одиниці об'єму матеріалу за час τ, визначаються як:

$$\begin{aligned} p_v &= \sigma E^2; \\ A &= \sigma E^2 \tau \end{aligned} \tag{2}$$

де σ – електропровідність тканини, См/м. Для порівняння режимів з різною тривалістю доцільно використовувати питому енергію обробки на одиницю маси яка за постійних напруги та струму зводиться до $W = \frac{\tau U_t \cdot I_t}{m}$.

$$W = \frac{1}{m}\int_0^{\tau} \tau U_t \cdot I_t \cdot dt \tag{3}$$

Це дозволяє коректно порівнювати досліди, що мають однакову напругу, але різну тривалість чи електропровідність сировини.

Індекс дезінтеграції. Руйнування мембран супроводжується переходом електролітів у міжклітинний простір, тому електропровідність тканини зростає. На цьому ґрунтується індекс дезінтеграції клітинної структури (Cell Disintegration Index):

$$Z = \frac{(\sigma - \sigma_i)}{(\sigma_d - \sigma_i)}; 0 < Z < 1 \tag{4}$$

де $\sigma, \sigma_i, \sigma_d$ – електропровідність обробленого, необробленого та повністю дезінтегрованого зразків. Значення Z = 0 відповідає неушкодженій тканині, Z → 1 – максимальній дезінтеграції. Цей підхід використовується в дослідженнях картоплі, яблук, томатів, цукрового буряка та інших матеріалів [1, 4].

Аналіз досліджень. Lebovka зі співавторами показали, що дію імпульсного електричного поля та нагрівання на тканину цукрового буряка можна кількісно оцінювати за електропровідністю та індексом дезінтеграції [1]. За даними [2], PEF-

обробка в діапазоні 1–7 кВ/см підвищує ефективність твердо-рідинної екстракції сахарози. Для яблучної мезги за E = 650 В/см в промислових умовах вихід соку зріс із 71,1 до 76,3 % [3]. Для картоплі ефективна дезінтеграція досягається за полів порядку 200–1000 В/см та короткої тривалості впливу, при цьому електропорація полегшує дифузію вологи та прискорює сушіння [4]. PEF-обробка фіолетової картоплі підвищує екстракцію антоціанів [5]. Для моркви PEF – ohmic обробка (≈1,33 кВ/см, 100 Гц) прискорює нагрівання, сприяє електропорації клітин і скорочує загальний час бланшування приблизно на 60 % [6]. Отже, основний ефект електричного впливу полягає у зміні структурно-мембранного стану сировини. Умовно режими електричної обробки поділяють на омічне нагрівання – до 100 В/см, помірні електричні поля (MEF) – 100–1000 В/см та PEF – понад 1000 В/см [7]. Експериментальна установка та методика. Лабораторна установка містить мікроскоп, осцилограф, автотрансформатор, вимірювальні прилади, шунт та зразок рослинної сировини між електродами.



Рис. 1 Зовнішній вигляд експериментальної установки для дослідження електроплазмолізу: 1 – біологічний мікроскоп MICROMED; 2 – цифровий осцилограф; 3 – лабораторний автотрансформатор; 4 – мілівольтметр; 5 – мультиметр цифровий MY–64; 6 – дослідний зразок рослинної сировини; 7 – шунт для вимірювання струму

Мікроскоп використовують для оцінки структурних змін клітин. Установка забезпечує контактну електричну обробку рослинної тканини з дослідженням електроплазмолізу (електропермеабілізації). Опір зразка визначають за напругою та струмом. Для кількісної оцінки реєструють напругу, струм, тривалість обробки, температуру, вихід соку або вологи та індекс дезінтеграції \(Z\). Дослідження проводять за напруги 20–100 В, тривалості 1–60 с і для різних видів сільськогосподарської сировини.

Зі збільшенням напруженості поля та питомої енергії обробки зростає електропермеабілізація мембран, що спричиняє збільшення струму, зменшення опору та посилення виходу внутрішньоклітинної вологи. Осцилограма струму може бути використана для оцінки стану клітинної структури. Одночасний вплив електропорації та джоулевого нагрівання зумовлює необхідність контролю температури.

Висновки. Основним фізичним механізмом електроплазмолізу є електропорація клітинних мембран, яка зі збільшенням енергетичної дози переходить в необоротну електропермеабілізацію та дезінтеграцію тканини.

Для кількісного опису процесу доцільно використовувати напруженість поля $E = U/d$, питому енергію w та індекс дезінтеграції Z, а не лише напругу.

Реєстрація осцилограм струму через вимірювальний шунт дозволяє встановити кореляцію I(t) ↔ σ(t) ↔ Z(t) ↔ ступінь руйнування клітин і перейти від якісного спостереження до кількісного електричного контролю стану сировини.

Одночасне вимірювання напруги, струму, часу та температури в поєднанні з мікроскопічним аналізом є найбільш перспективним підходом до розділення електропораційного та теплового ефектів.

Список використаних джерел

1. Lebovka N. I., Shynkaryk M. V., El-Belghiti K., Benjelloun H., Vorobiev E. Plasmolysis of sugarbeet: Pulsed electric fields and thermal treatment. Journal of Food Engineering. 2007. Vol. 80, No. 2. P. 639–644. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.06.020.

2. López N., Puértolas E., Condón S., Raso J., Álvarez I. Enhancement of the solid-liquid extraction of sucrose from sugar beet by pulsed electric fields. LWT – Food Science and Technology. 2009. Vol. 42. P. 1674–1680. DOI: 10.1016/j.lwt.2009.05.015.

3. Turk M. F., Vorobiev E., Baron A. Improving apple juice expression and quality by pulsed electric field on an industrial scale. LWT – Food Science and Technology. 2012. Vol. 49. P. 245–250. DOI: 10.1016/j.lwt.2012.07.024.

4. Lebovka N. I., Shynkaryk N. V., Vorobiev E. Pulsed electric field enhanced drying of potato tissue. Journal of Food Engineering. 2007. Vol. 78. P. 606–613. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2005.10.032.

5. Puértolas E., Cregenzán O., Luengo E., Álvarez I., Raso J. Pulsed-electric-field-assisted extraction of anthocyanins from purple-fleshed potato. Food Chemistry. 2013. Vol. 136. P. 1330–1336. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.09.080.

6. Astráin-Redín L., Raso J., Álvarez I. et al. New pulsed electric fields approach to improve the blanching of carrots. LWT. 2023. Vol. 189. Art. 115468. DOI: 10.1016/j.lwt.2023.115468.

7. Astráin-Redín L., Ospina S., Cebrián G., Álvarez-Lanzarote I. et al. Ohmic Heating Technology for Food Applications, From Ohmic Systems to Moderate Electric Fields and Pulsed Electric Fields. Food Engineering Reviews. 2024. Vol. 16. P. 225–251.

8. Kotnik T., Rems L., Tarek M., Miklavčič D. Membrane Electroporation and Electropermeabilization: Mechanisms and Models. Annual Review of Biophysics. 2019. Vol. 48. P. 63–91. DOI: 10.1146/annurev-biophys-052118-115451.