

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Серебряков Роман Анатолійович**

УДК 664.1:539.22

**РОЗРОБЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРОПЛАЗМОЛІЗУ  
ТКАНИНИ ЦУКРОВОГО БУРЯКУ ТА СПОСОБУ ЇЇ  
КОМБІНОВАНОЇ ТЕПЛОВОЇ І ЕЛЕКТРИЧНОЇ ОБРОБКИ**

05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних і фармацевтичних  
виробництв

**АВТОРЕФЕРАТ  
ДИСЕРТАЦІЇ НА ЗДОБУТТЯ НАУКОВОГО СТУПЕНЯ  
КАНДИДАТА ТЕХНІЧНИХ НАУК**

Київ 2002

*Дисертацією є рукопис.*

Робота виконана в Національному університеті харчових технологій.

***Науковий керівник***

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

**Бажал Максим Іванович**, Національний університет харчових технологій, провідний науковий співробітник проблемної науково-дослідної лабораторії

***Офіційні опоненти:***

доктор технічних наук, професор **Мазуренко Олександр Григорович**, Національний університет харчових технологій, завідувач кафедри електротехніки;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

**Осадчий Леонід Мартинович**, Науково-дослідний інститут цукрової промисловості, провідний науковий співробітник

***Провідна установа:*** Інститут технічної теплофізики НАН України

Захист відбудеться “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2003р. о \_\_\_ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02 в Національному університеті харчових технологій за адресою: 01033, м.Київ-33, вул. Володимирська 68, аудиторія \_\_\_\_\_

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій, за адресою: 01033, м.Київ-33, вул. Володимирська 68.

Автореферат розісланий “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2003року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради, к.т.н., доц.

Зав’ялов В.Л.

## Загальна характеристика дисертаційної роботи

**Актуальність теми.** Дисертаційна робота присвячена розробці процесу імпульсного електроплазмолізу і застосуванню його при переробці бурякової сировини.

В сучасній технології цукрового виробництва України для екстрагування цукрози з цукрового буряку широко використовується теплова денатурація клітинних оболонок з метою підвищення їх проникності, відомі також позитивні результати використання електричної обробки для додаткового плазмолізу бурякової тканини – електроплазмоліз.

На практиці для електроплазмолізу використовуються електричні поля постійного, змінного та імпульсного струму. Можливість вибору форми імпульсів, регулювання в широких межах напруженості поля, часу тривалості імпульсів та пауз, а отже гнучкість режимів підводу енергії до системи – все це надає переваги застосуванню для електроплазмолізу саме імпульсних електричних полів.

Відомі приклади використання на практиці високоградієнтних імпульсних електричних полів (напруженістю понад 1000 В/см), коли в промислових умовах електрообробки потрібно використовувати високі напруги (понад 10кВ), що веде до складності конструювання блоків живлення та обслуговування установок з точки зору техніки безпеки та контролю процесів пробою сировини. Тому перспективним є розроблення процесу імпульсного низькоградієнтного електроплазмолізу тканини цукрового буряку.

Оскільки електроплазмоліз використовується як спосіб додаткової обробки до теплового плазмолізу, то важливим питанням є дослідження спільної дії теплових та електричних факторів на фізико-хімічні властивості клітинних систем. Крім того, підвищення проникності рослинної тканини якимось одним методом (наприклад, термічним або електричним) обмежено відомими недоліками цих способів, зокрема погіршенням технологічної якості сировини при досягненні високих ступенів плазмолізу тканини.

Тому актуальним є розроблення способу комбінованої теплової та електричної обробки з дослідженням впливу параметрів імпульсного поля (напруженість, тривалість імпульсів та пауз) на ефективність електроплазмолізу, що дозволить встановити та оптимізувати взаємозв'язок між фізико-хімічними властивостями сировини, температурою та параметрами електрообробки.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана відповідно до пріоритетного напрямку наукових робіт Українського державного університету харчових технологій на 1998-2000 рр. “Створення наукових основ імпульсних електротехнологій та апаратів для переробки рослинної сировини та збереження харчових продуктів” № держ. реєстрації 0198В000541.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розроблення процесу імпульсного електроплазмолізу тканини цукрового буряку та способу її комбінованої теплової і електричної обробки перед процесом екстрагування.

У відповідності з метою визначені такі **задачі**:

- розроблення процесу імпульсного електроплазмолізу шляхом дослідження впливу параметрів імпульсного електричного поля (напруженості, тривалості імпульсів і пауз, форми імпульсів) на ступінь плазмолізу рослинної тканини та пов'язані з цим енерговитрати;
- розроблення математичної моделі процесу омічного нагрівання сировини під час імпульсного електроплазмолізу;
- розроблення способу комбінованої теплової та електричної обробки шляхом дослідження спільного впливу електричного та теплового факторів на стабільність біологічних мембран;
- вивчення технологічних аспектів комбінованої електричної та теплової обробки бурякової сировини.

**Об'єкт дослідження.** Процеси, що відбуваються в рослинній сировині під час електричного та теплового впливу на неї.

**Предмет дослідження.** Цукровий буряк.

**Методи досліджень.** Ефективність електричної та теплової обробки тканини цукрового буряку визначали за зміною ступеня плазмолізу, що розраховується з використанням електрометричного методу за зміною електропровідності рослинної тканини під час її обробки. Про ефективність обробки судили, співставляючи розрахункові питомі енерговитрати та ступінь плазмолізу. Для вивчення механізму руйнування клітинних мембран в електричному полі використовували також методи математичного моделювання.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

- встановлено механізм впливу тривалості імпульсів та пауз на процес електроплазмолізу з урахуванням процесів дифузійної міграції вологи;
- досліджено вплив напруженості імпульсного електричного поля на ефективність плазмолізу рослинної тканини;
- сформульовано задачу дослідження комбінованого впливу теплової та електричної обробки на процеси плазмолізу рослинної тканини;
- науково обґрунтовано ефективність спільної дії теплового і електричного факторів на дестабілізацію біологічних мембран, скорочення тривалості електрообробки та підвищення однорідності електроплазмолізу з урахуванням розподілу клітин в тканині за їх розмірами;
- запропоновано математичну модель та проведено розрахунок омічного нагрівання клітинних мембран під час електрообробки рослинної тканини;
- розроблено спосіб комбінованої теплової та електричної обробки рослинної тканини перед процесом дифузії.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

- запропоновано оптимальні параметри імпульсного електричного поля для здійснення електроплазмолізу;
- встановлено найефективніший спосіб комбінованої обробки бурякової сировини, а саме такий, що поєднує попередню теплову обробку з наступним електроплазмолізом;

- визначено оптимальну температуру теплового плазмолізу бурякової тканини, при якій найбільш доцільно застосовувати додаткову електрообробку;

- пропозиції та висновки, що містяться в роботі, рекомендується використовувати для розрахунків електротехнологічного обладнання цукрового виробництва;

- за результатами теоретичних та експериментальних досліджень проведені виробничі випробування дослідно-промислового зразка електроплазмолізатора трубного типу для проведення комбінованої теплової та електричної обробки сокостружкової суміші на ВАТ “Старосинявський цукровий завод” (м.Стара Синява, Хмельницької області) та на ВАТ “Цукровий завод Октябрського цукрокомбінату” (м.Карлівка, Полтавської області).

**Особистий внесок здобувача.** Автором особисто проведено: аналіз існуючих методів електричної та комбінованої обробки з застосуванням імпульсних електричних полів; експериментальне визначення впливу параметрів імпульсного електричного поля на зміну ступеня електроплазмолізу рослинної тканини; розробку математичної моделі омичного нагрівання середовища під час електрообробки; постановку і проведення експериментів та обробку їх результатів; формулювання висновків та пропозицій.

При роботі над дисертацією консультації надавав доктор технічних наук, професор Купчик Михайло Петрович.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 6-й і 7-й міжнародних науково-технічних конференціях “Проблеми та перспективи створення і впровадження нових ресурсо- та енергоощадних технологій, обладнання в галузях харчової і переробної промисловості”- Київ 1999, 2001; 66-й і 67-й наукових конференціях студентів, аспірантів та молодих науковців УДУХТ (1998, 2000).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 9 друкованих праць, з них: 6- публікації в фахових виданнях, затверджених ВАК України; 2– тези доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях, 1– патент України на винахід.

**Структура та об’єм роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, що включає 110 найменувань вітчизняних і зарубіжних авторів, та додатків. Роботу викладено на 100 сторінках основного тексту, вона містить 36 рисунків та 6 таблиць.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**РОЗДІЛ 1.** Обґрунтовано актуальність вибраного напрямку досліджень, розглянуто основні електрофізичні процеси обробки рослинної сировини і місце серед них процесу електроплазмолізу; наведено основні механізми руйнування клітин під дією електричного поля; розглянуто існуючі моделі математичного опису процесу електроплазмолізу; проаналізовані дані щодо впливу параметрів електричних полів на основні фізико-хімічні властивості рослинної тканини; розглянуто існуючі способи здійснення електроплазмолізу; проведено аналіз існуючих комбінованих ме-

тодів обробки з використанням електричних полів і зазначено недостатню вивченість впливу параметрів низькоградієнтного імпульсного електричного поля на ефективність електроплазмолізу та відсутність даних щодо застосування комбінованого термо- та електроплазмолізу.

**РОЗДІЛ 2.** Викладена методика визначення ефективності процесів обробки тканини цукрового буряку, представлені схеми лабораторних установок, викладені основні параметри електричних імпульсів.

Ефективність електрообробки зразків рослинної тканини визначали електрометричним методом за зміною ступеня електроплазмолізу, який розраховувався як відношення електропровідності тканини цукрового буряку після електрообробки ( $\sigma$ ) до її початкового значення ( $\sigma_0$ ).

$$s = \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (1)$$

В дослідженнях використовувалися два види імпульсних полів: прямокутні біполярні та монополярні імпульси з паузами між ними та модульоване синусоїдальне поле з піковою формою імпульсу.

Пікове імпульсне поле використовувалося для вивчення механізму руйнування клітин рослинної тканини під час дії імпульсних електричних полів різної напруженості.

При визначенні спільної дії термічного та електроплазмолізу час теплової обробки зразків вимірювався у відносних одиницях  $t_n$ , що дорівнюють часу нагрівання, тобто  $t = t_n$ . Для визначення впливу тривалості теплової обробки на ступінь плазмолізу тканини здійснювали три режими обробки зразків: 1) нагрівання до заданої температури за час  $t_n$ , охолодження до кімнатної температури  $T_k$ ; 2) нагрівання до заданої температури за час  $t_n$ , витримка при цій температурі на протязі часу  $t_n$ , охолодження до  $T_k$ ; 3) нагрівання до заданої температури за час  $t_n$ , витримка на протязі подвійного часу нагрівання  $2t_n$ , охолодження до  $T_k$ .

Комбіновану теплову та електричну обробку проводили з застосуванням двох методів: а) попередня електрична обробка з наступною тепловою; б) тепла обробка з наступним додатковим електроплазмолізом.

В обох комбінованих методах застосовувалися всі три режими теплової обробки.

**РОЗДІЛ 3.** Представлені результати досліджень впливу параметрів імпульсного електричного поля на ефективність електроплазмолізу.

**У підрозділі 3.1** розглядаються питання вивчення механізму руйнування клітин рослинної тканини під час дії імпульсних електричних полів різної напруженості.

Результати досліджень показали, що підвищення напруженості електричного поля не тільки прискорює процеси плазмолізу в рослинній тканині, але також змінює сам характер кінетичної залежності. Так, при застосуванні імпульсного поля  $E=350$  В/см спостерігалось уповільнення електроплазмолізу після деякого початкового руйнування клітин на протязі близько 1 с. Подальше зростання проникності

тканини спостерігалось тільки через 7 с після початку електрооброблення і тривало до моменту досягнення ступеня підвищення електропровідності близько 10. Збільшення напруженості електричного поля до 500 В/см викликало постійне підвищення ступеня електропровідності тканини до рівня також близько 10, що, ймовірно, відповідало стану максимального плазмолізу зразків.

Така залежність кінетики плазмолізу від напруженості електричного поля пояснювалась наступним чином. Середній час життя біологічних мембран описується рівнянням виду:

$$t_m = P \cdot \exp \left[ \frac{\pi \gamma^2}{kT \left[ \sigma + C_m \left( \frac{\epsilon_w - 1}{\epsilon_m} \right) \frac{u_m^2}{2} \right]} \right] \quad (2)$$

де:  $P$  – передекспоненціальний множник;  $k$  – стала Больцмана;  $C_m$  – питома ємність мембрани;  $\gamma$  – лінійний натяг пори;  $\sigma$  – поверхневий натяг мембрани;  $\epsilon_w=80$ ,  $\epsilon_m=2$  – значення діелектричної проникності водного розчину електроліту та мембрани, відповідно;  $u_m$  – значення трансмембранної напруги:

$$u_m = \frac{3}{4} E d_c \cos \varphi \quad (3)$$

Розподіл клітин  $f(d)$

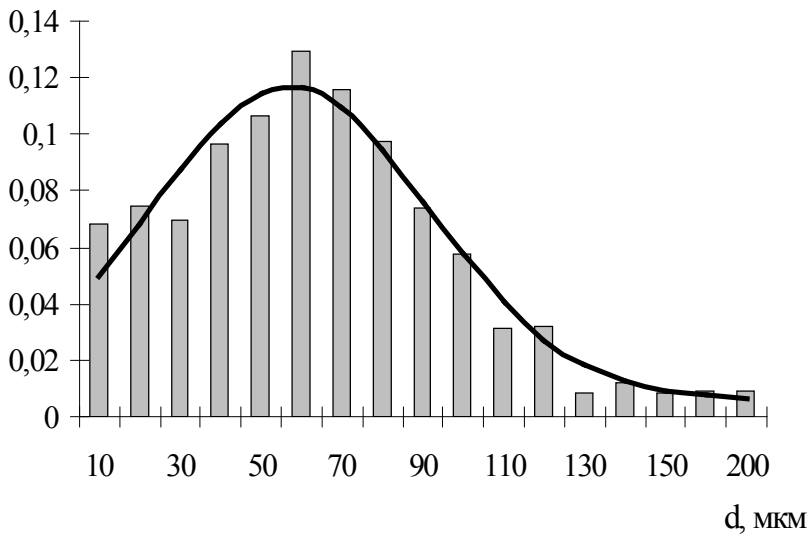


Рис. 1. Розподіл клітин цукрового буряку.

Для оцінки розподілу клітин за їх розмірами в буряковій тканині за допомогою мікроскопу було вивчено зрізи клітковини, виготовлені з серединної частини кореня цукрового буряку (рис. 1). Отриманий розподіл клітин задовільно описується законом нормального розподілення Гауса (суцільна крива на гістограмі рис. 1):

$$f(d_c) = a + b \cdot e^{(-0.5(d_c - \bar{d}_c) / \Delta d_c^2)^2} \quad (4)$$

де  $a=0,0065 \pm 0,0056$  і  $b=0,110 \pm 0,007$  – коефіцієнти згладжування;  $\bar{d}_c=57,06 \pm 1,90$  мкм – середній діаметр клітин,  $\Delta d_c^2=34,47 \pm 2,92$  – середньоквадратична дисперсія. Всі

де  $E$  – величина зовнішньої напруженості електричного поля,  $d_c$  – розмір клітини (наприклад, для цукрової тканини  $d_c=10-100$  мкм),  $\varphi$  – кут між зовнішнім полем та радіусом-вектором точки на мембрані.

Як видно з рівняння (3), величина трансмембранного потенціалу залежить від діаметра клітини. Це значить, згідно рівняння (2), що в електричному полі заданої напруженості плазмоліз клітин різного розміру повинен тривати різний час.

дані отримані за допомогою методу найменших квадратів.

Виконані за допомогою рівнянь (2) і (3) розрахунки при постійній температурі 20 °С показали, що в усіх випадках необхідний час електрообробки значно зростає зі зменшенням розміру клітин та напруженості електричного поля  $E$ . Зменшення величини  $E$  з 500 до 250 В/см збільшує час життя модельних мембран майже в  $10^6$  раз для клітин мінімального розміру  $d_c \approx 10$  мкм і вдвічі для клітин середнього діаметра 57 мкм.

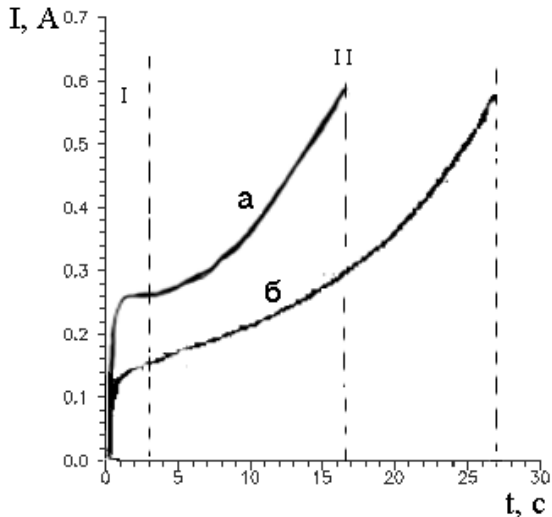


Рис.2. Криві струму споживання:

- а) – імпульси напругою 1000В;
- б) – імпульси напругою 700 В.

Таким чином, враховуючи розмірну дисперсію клітин в буряковій тканині, можна зробити висновок, що кінетика електроплазмолізу значною мірою визначається законом розподілення клітин та напруженістю електричного поля. Отже, уповільнення процесу плазмолізу під дією імпульсного поля  $E=350$  В/см може бути пояснене великим часом життя клітин з мінімальним і середнім діаметром, доля яких найбільша в системі. Зростання напруженості імпульсного поля значно скорочує час життя клітин згідно рівнянь (2) і (3) та прискорює процес плазмолізу, що спостерігалось експериментально.

Враховуючи залежність електричної стабільності біологічних мембран від розміру клітин, зрозуміло, що електроплазмоліз починається з клітин більшого діаметра, які мають найменший час життя в електричному полі. Причому доля клітин, плазмолізованих за одиницю часу електрообробки, буде збільшуватися з ростом напруженості електричного поля. Для вивчення режиму вибіркового пробою були проаналізовані криві струму споживання, отримані в ході електрообробки за допомогою реєструючого амперметра (рис.2). Аналіз кривих показав, що процес електроплазмолізу можна умовно розділити на два етапи: 1 етап - встановлення струму в системі, початковий, ініціалізуючий пробій окремих клітинних мембран, 2 етап - активна фаза електроплазмолізу, що характеризується масовим пробоем клітин з прискореним наростанням струму внаслідок збільшення ефективної електропровідності середовища.

Для визначення впливу початкового ініціалізуючого етапу пробою на ефективність процесу електроплазмолізу було досліджено залежність загального ступеня руйнування зразків  $s = \sigma / \sigma_0$  від ступеня плазмолізу на першому етапі пробою  $s_1 = \sigma_1 / \sigma_0$  під дією електричних полів напруженістю 350 і 500 В/см (рис.3). Отримані залежності свідчать про виключно важливу роль першого етапу пробою.

Збільшення  $s_1$  призводить до зростання загального ефекту обробки, а оскільки збільшення напруженості електричного поля посилює ступінь пробою на першому етапі, то це й обумовлює переваги використання імпульсів підвищеної напруженості. Для оцінки ефективності використання підведеної енергії запропоновано вико-

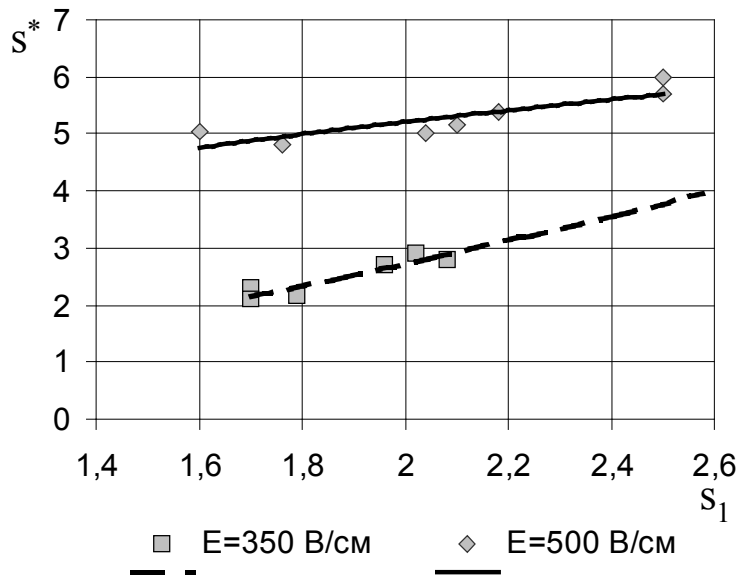


Рис.3. Залежність загального ступеня електроплазмолізу від ступеня пробою тканин на першому етапі пробою для імпульсів різної напруженості.

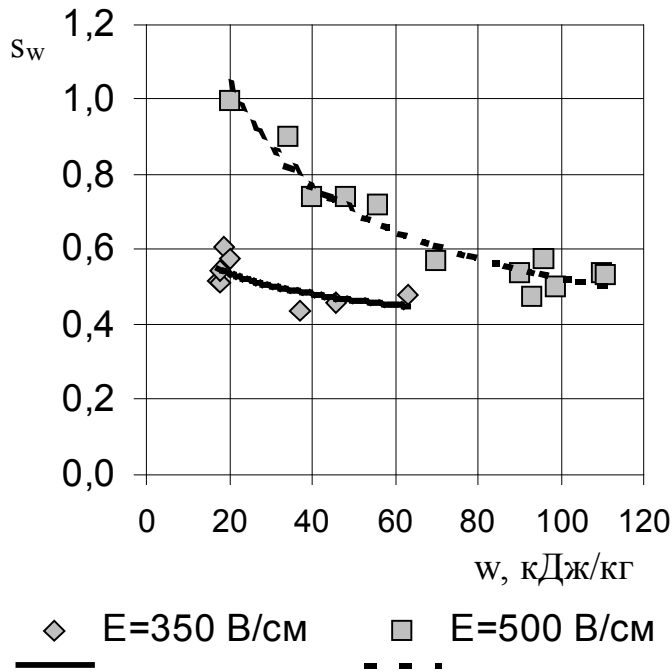


Рис.4. Залежності відносного питомого ступеню електроплазмолізу  $S_w$  від питомих енерговитрат  $w$ .

ристовувати величину питомого ступеня плазмолізу, що розраховувався як відношення загального ступеня плазмолізу  $s^*$  до питомих енерговитрат  $w$  ( $s_w = s^*/w$ , величини  $s/w$  віднесені до максимального

значення, що спостерігалось під час електрообробки різної напруженості) від енерговитрат на процес електроплазмолізу). Як видно з рис.4, ефективність енерговитрат виявляється більшою для електричного поля вищої напруженості. Крім того, в умовах низької напруженості поля, можливе максимальне питома значення підведеної енергії  $w$  не перевищує половини енергії, що може бути підведена в умовах підвищеної напруженості. Такий результат може бути пояснений посиленням однорідності структури плазмолізу рослинної тканини в умовах збільшення напруженості електричного поля.

**У підрозділі 3.2** представлено результати досліджень впливу тривалості імпульсів і пауз на ефективність електроплазмолізу.

Процес електроплазмолізу характеризувався двома часовими параметрами: загальною тривалістю процесу, що визначався тривалістю імпульсів  $t_{\text{імп}}$  і пауз  $t_{\text{пауз}}$  та їх кількістю  $n$ :  $t_{\text{процес}} = n(t_{\text{імп}} + t_{\text{пауз}})$ , і еквівалентним часом електричної дії, тобто

часом безпосередньо електричного впливу на рослинну тканину:  $t_{\text{ел.дії}} = n \cdot t_{\text{імп}}$ . Важливою практичною задачею було дослідження впливу  $t_{\text{імп}}$  та  $t_{\text{пауз}}$  на ефективність і повноту обробки. Методологічно дана задача була вирішена шляхом вивчення

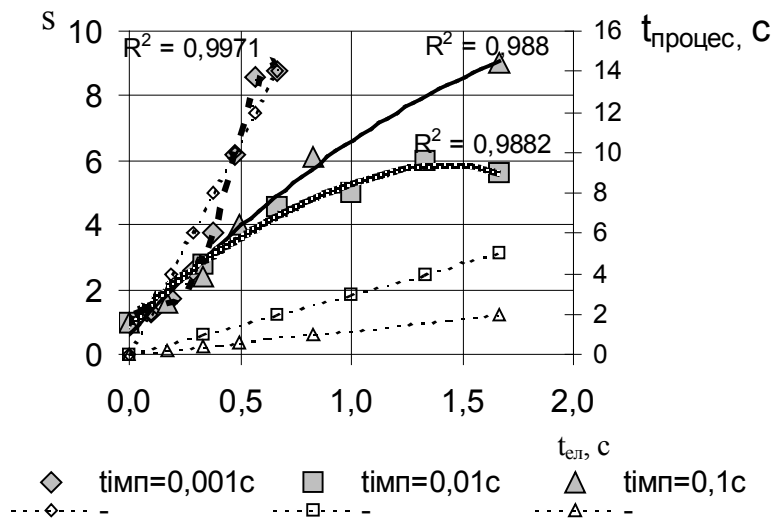


Рис.5. Часові залежності зміни ступеню плазмолізу тканини  $s$  після дії імпульсів різної тривалості при однаковій паузі між ними  $t_{\text{пауз}}=0,01$  с.

ності від параметрів плазмолізуючого електричного поля.

Аналізуючи дані, представлені на рис.5, був зроблений висновок, що для електричних полів трьох різних параметрів отримані значення  $s$  розрізняються, тільки коли тривалість еквівалентної електричної дії  $t_{\text{ел.дії}}$  перевищує 0,4–0,5 с, причому ця різниця посилювалася зі збільшенням часу обробки. Використовуючи допоміжні графіки, було визначено, що вказаному пороговому значенню  $t_{\text{ел.дії}}$  відповідає загальна тривалість процесу обробки  $t_{\text{процес}}$ :

- для  $t_{\text{имп}}=0,1\text{c}$   $t_{\text{процес}} \approx 1$  с;
- для  $t_{\text{имп}}=0,01\text{c}$   $t_{\text{процес}} \approx 2$  с;
- для  $t_{\text{имп}}=0,001\text{c}$   $t_{\text{процес}} \approx 10$  с.

При вивченні впливу величини міжімпульсних пауз на процес електрообробки показано, що розраховані значення  $s$  практично співпадають у всіх трьох досліджених режимах обробки, якщо її тривалість не перевищує 1–2 с (рис.6). Таким чином, аналізуючи результати, представлені на рис.5 і рис.6, можна зробити висновок, що електричні поля різних параметрів по-різному впливають на зміну електропровідності тканини, якщо загальна тривалість електрообробки  $t_{\text{процес}}$  перевищує деяке поро-

залежності зміни показників ефективності електроплазмолізу від довжини імпульсів та пауз між ними при інших рівних умовах.

За результатами досліджень побудовано графіки зміни ступеня плазмолізу тканини  $s$  в залежності від еквівалентного часу електричної дії імпульсів тривалістю  $t_{\text{имп}}=0,001, 0,01, 0,1$  с при однаковій величині паузи між ними  $t_{\text{пауз}}=0,01\text{c}$  (рис.5). Допоміжні штрихові прямі лінії та відповідну праву допоміжну вісь на рис.5 наведено для визначення загальної тривалості електрообробки  $t_{\text{процес}}$  в залеж-

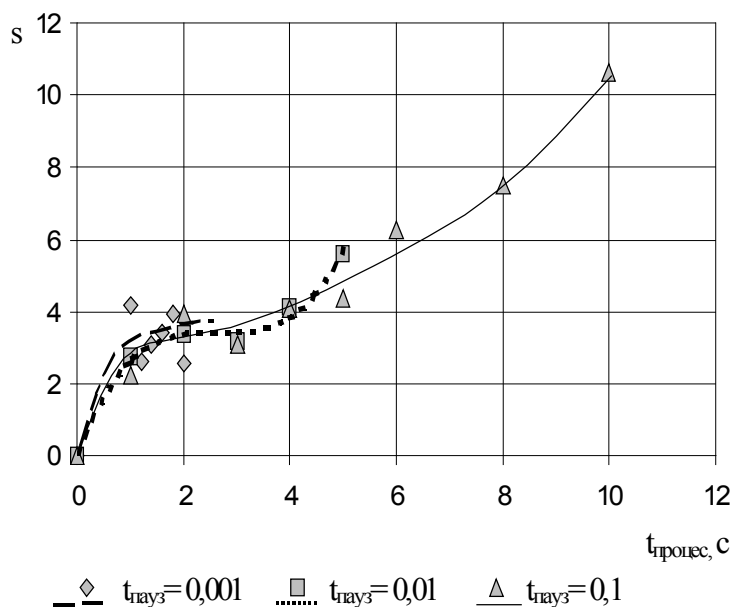


Рис.6. Часові залежності зміни ступеню електроплазмолізу при використанні різних міжімпульсних пауз.

гове значення близько 1 с. При менших значеннях  $t_{\text{процес}}$  ефективність дії різних імпульсних полів співпадає. Такий результат може бути пояснений впливом процесів дифузійної міграції вологи з плазмолізованих клітин. Характеристичний час  $\tau_d$ , за який сік (вода) мігрує в рослинній тканині на відстань середнього розміру клітини  $d_c$ , визначається за допомогою рівняння Ейнштейна-Смолуховського:

$$\tau_d \sim d_c^2 / (6D) \approx 1 \text{ с} \quad (5)$$

де  $D \approx 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  - коефіцієнт дифузії води,  $d_c = 10^{-4} \text{ м}$ .

Протягом електрообробки тривалістю менше 1 с не встигає відбуватися дія процесів дифузійної міграції вологи, оскільки  $t_{\text{процес}} < \tau_d$ , тому в цьому випадку зміна електропровідності характеризується в основному тільки електричним впливом і не залежить від довжини і кількості імпульсів та пауз при однаковому часі еквівалентної електричної дії. При зростанні тривалості обробки  $t_{\text{процес}} > \tau_d$  за рахунок збільшення міжімпульсної паузи та тривалості імпульсів прояв процесів дифузійної міграції вологи посилюється і додатково підвищує електропровідність тканини, що змінюється внаслідок електроплазмолізу.

Можна припустити, що дифузійна міграція вологи зі зруйнованих клітин сприяє підвищенню навколо них провідності тканини і утворенню високопровідних ділянок, роз'єднаних низькопровідними цілими клітинами. При цьому, за даними математичного моделювання, спостерігається висока нерівномірність плазмолізу з швидким утворенням перколяційного каналу, що відображається на зростанні струму через тканину і збільшенні витрат електроенергії. Отже, прояв процесів дифузійної міграції вологи знижує ефективність електроплазмолізу і є негативним фактором. Щоб уникнути його, необхідно задавати такі параметри електричного поля, щоб загальна тривалість електрообробки не перевищувала характеристичного часу процесу дифузійної міграції вологи:

$$t_{\text{процес}} < \tau_d \quad (6)$$

**У підрозділі 3.3** представлено результати досліджень впливу полярності імпульсів на ефективність електроплазмолізу. Для цього зразки бурякової тканини піддавались обробці біполярними та монополярними імпульсами прямокутної форми. Результати експериментів показали (рис.7), що більш ефективним виявилось використання знакозмінних полів, що пояснюється симетричним руйнуванням мембран на анодній і катодній частинах клітин в біполярному полі.

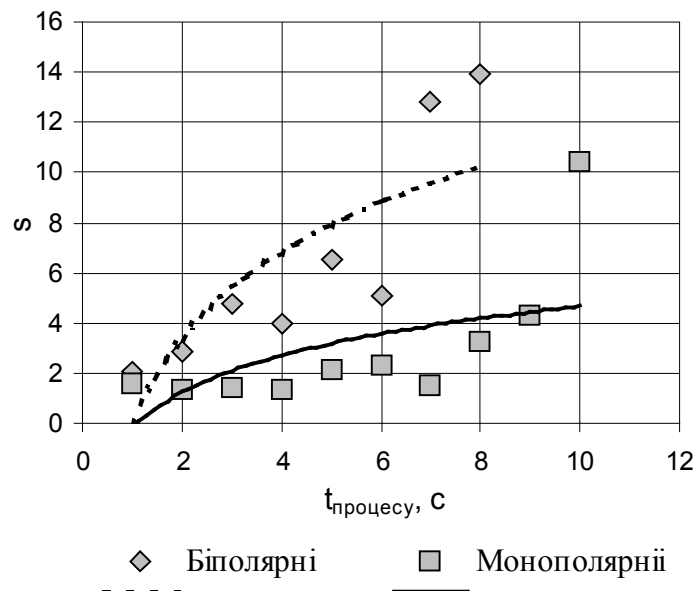


Рис.7 Зміна ступеню електроплазмолізу від часу електрообробки для імпульсів різної полярності

**РОЗДІЛ 4** присвячено вивченню механізму омічного нагрівання середовища, пов'язаного з процесами локальної генерації тепла при протіканні струму через мембрани біологічних тканин.

**У підрозділі 4.1** описується розроблена спрощена модель біологічної тканини в зовнішньому електричному полі.

В даній моделі кожна клітина представлена в формі куба зі стороною  $d_c$ , товщина мембранної оболонки дорівнює  $d_m$ ;  $\sigma_c$  і  $\sigma_m$  – електропровідності внутрішньої рідини в клітині та мембранної оболонки відповідно;  $L$  – товщина зразка,  $j$  – густина струму, що протікає через зразок;  $U$  – зовнішня напруга, що прикладена до зразка;  $E = U/L$  – напруженість поля.

**Підрозділ 4.2** висвітлює результати моделювання процесу омічного нагрівання біологічної тканини.

Оскільки при омічному нагріванні розподіл температур всередині біологічної тканини може бути сильно неоднорідним, тоді омічне тепло, що виробляється струмом густиною  $j$  за одиницю часу в об'ємі  $V$  можна оцінити співвідношенням

$$Q = \int_V dV j^2 / \sigma(r) = \int_V dV \sigma(r) E^2 \quad (7)$$

де  $j = E \sigma_{ef}$ ,  $\sigma_{ef}$  – ефективна електропровідність тканини;  $\sigma$  – електропровідність внутрішньоклітинної рідини або мембрани. Аналіз даного рівняння показав, що максимальне нагрівання під час електрообробки відбувається в областях з мінімальними значеннями  $\sigma$  (наприклад там, де розташовані мембрани), а середня температура клітинного середовища при цьому залишається відносно невисокою. Таким чином, було показано, що мембрана в процесах електрообробки слугує підігрівним елементом, що є відповідальним за нагрів всієї клітини.

**Підрозділ 4.3** присвячено співставленню результатів математичного моделювання з реальними величинами процесу.

Для оцінки реальних параметрів електрообробки біологічної сировини вважали, що питома теплоємність тканини  $c = 3,4 - 3,6$  кДж/(кг·град), густина  $\rho \approx 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\sigma_{ef} = 10^{-1}$  См/м. Тоді, наприклад при  $E = 0,1$  кВ/см =  $10^4$  В/м, швидкість підвищення температури складе:

$$v_{ef} = \Delta T_{ef} / t = E^2 \sigma_{ef} / (c \cdot \rho) = (10^8 \cdot 10^{-1}) / (3 \cdot 10^3 \cdot 10^3) = 3 \text{ К/с} \quad (8)$$

При цьому локальне підвищення температури мембран товщиною  $d_m = 10^{-8}$  м становить:

$$v_m = E^2 \sigma_{ef}^2 / (c_m \rho_m \sigma_m) = \frac{E^2 (d_c / d_m)^2 \sigma_m}{(1 + \lambda)^2 c_m \rho_m} \quad (9)$$

а саме  $v_m \approx 10^8 \cdot 10^8 \cdot 10^{-5} / (3,5 \cdot 10^3 \cdot 10^3) \approx 3 \cdot 10^4$  К/с при  $E = 100$  В/см,  $d_c / d_m = 10^4$ ,  $\sigma_m \sim 10^{-5}$  См/м.

Аналізуючи отримані результати, можна бачити, що за даних умов при збереженні таких високих локальних температур на мембрані це неминуче призводило б до денатурації компонентів мембрани і її руйнування. Але за наявності процесів теплообміну підвищення температури на мембранах може бути значно меншим.

Час вирівнювання температури на відстанях, що дорівнює за порядком вели-

чини розміру клітини  $d_c$ , оцінюється за допомогою співвідношення:

$$\tau_c \sim d_c^2 / \chi \quad (10)$$

де  $\chi$  є коефіцієнт температуропровідності.

Для типових величин  $d_c = 10^{-4}$  м і  $\chi = 1,3 - 1,4 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с  $\sim 10^{-7}$  м/с (цукровий буряк в інтервалі вологостей 70–80%) було отримано  $\tau_c = 0,1$  с. Таким чином, при утворенні локального перегріву всієї клітини процеси вирівнювання температури нівелюють цей перегрів за час  $\tau_c$ . Час вирівнювання температури на відстані товщини мембрани  $d_m = 10^{-8}$  м, становить

$$\tau_m = d_m^2 / \chi = 10^{-9}$$
 с (11)

В **підрозділі 4.4**, визначено кінетичні залежності зміни температури в місцях розташування мембран.

Для оцінки кінетики зміни температури в області знаходження мембрани було розглянуто окрему мембрану, що знаходиться в точці  $x=0$  в оточенні внутрішньоклітинного розчину. Вивчено наслідки дії початкового теплового імпульсу, що має довжину  $t_i$ , при якому температура мембрани підвищується на початкову величину  $\Delta T_m$ . Розподіл температурного поля знайдено шляхом розв'язку рівняння теплопровідності та записано у вигляді:

$$T(x, y, z) = \frac{\Delta T_m}{\sqrt{4\pi t^*}} \exp\left(-\frac{x^{*2}}{4t^*}\right) \quad \text{при } t \geq t_i \quad (12)$$

де  $t^* = t / \tau_m$ ,  $x^* = x / d_m$ .

За одиницю часу було прийнято час вирівнювання температури на відстані товщини мембрани, а за одиницю довжини – товщину мембрани.

Аналіз профілів зміни нормованої температури в клітині ( $\Delta T \cdot 10^3 / v_m$ ) під час дії електричного поля на протязі часу  $t = 10^{-4}$  с та після його виключення показав (рис.8), що процеси теплообміну значно зменшують перегрів, локалізований в місці розташування мембрани, хоча в умовах неповного зменшення перегріву температура мембрани в декілька разів перевищує температуру оточуючого середовища. Після вимкнення електронавантаження спостерігається досить швидке вирівнювання температури в межах клітини за час  $\tau_c$ , при цьому температура мембрани  $\Delta T_m$  за наявності теплообміну зростає за законом

$$\Delta T_m = a v_m \sqrt{t} \quad (13)$$

де  $a = (1,77 \pm 0,02) \cdot 10^{-5}$ .

В умовах відсутності теплообміну підвищення температури мембрани товщиною  $d_m$  описується співвідношенням  $\Delta T_m^{(i)} = v_m t$ . За наявності теплообміну з оточуючим середовищем ця температура усереднюється за час  $t$  на відстані  $\sim \sqrt{\chi t}$ , тобто в цьому випадку маємо

$$\Delta T_m \approx \frac{d_m}{\sqrt{\chi t}} \Delta T_m^{(i)} = (d_m / \sqrt{\chi}) v_m \sqrt{t} \quad (14)$$

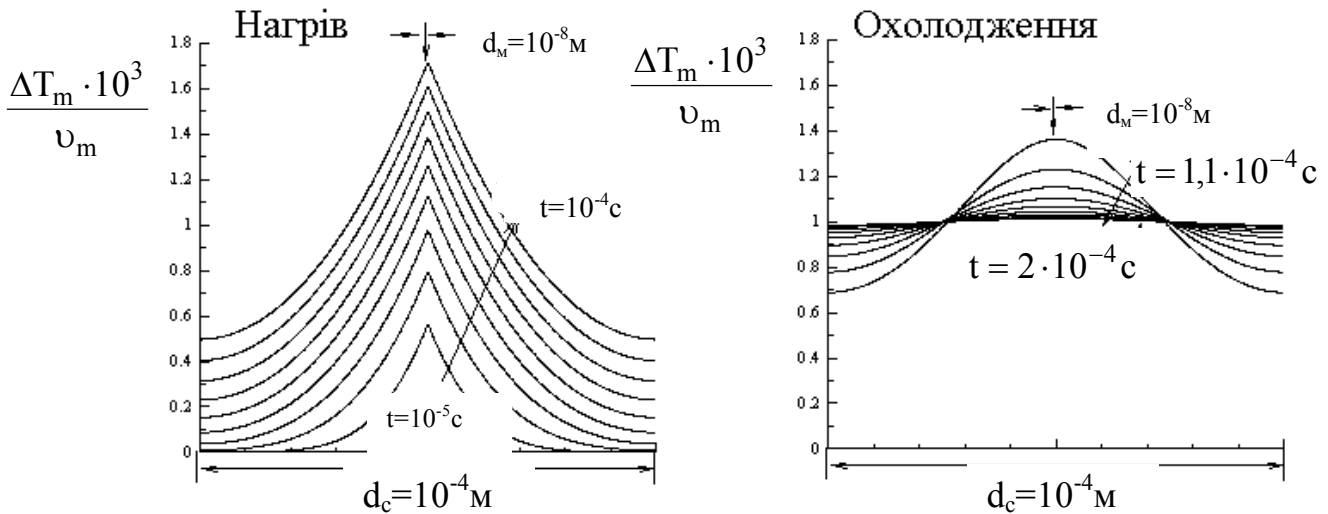


Рис.8. Профілі зміни нормованої температури в клітині ( $\Delta T_m \cdot 10^3 / v_m$ ) під час дії електричного поля на протязі часу  $t = 10^{-4}$  с (а) та після його вимкнення (б).

Таким чином, враховуючи, що  $\chi = 10^{-7}$  м/с і  $d_m = 10^{-8}$  м в загальному випадку для оцінки  $a$  отримаємо

$$a \approx 0,56(d_m / \sqrt{\chi}) \quad (15)$$

Для великих значень  $t$ , а саме коли  $t \gg \tau_c \sim d_c^2 / \chi$  розглядався граничний випадок, що фактично є еквівалентним миттєвому теплообміну по всій клітині ( $\chi \rightarrow \infty$ ). При цьому спостерігалось лінійне зростання температури на мембрані:

$$\Delta T_m = \Delta T_m^\infty \approx \frac{d_m}{d_c} \Delta T_m^{(i)} = v_m t / N = \Delta T_{ef} \quad (16)$$

що фактично дорівнювала температурі оточуючого середовища.

Перехідний час між визначеними двома режимами нагрівання мембрани приблизно визначався з умови  $\alpha \cdot v_m \sqrt{t_{tr}} = v_m t_{tr} / N$ , звідки

$$t_{tr} = (N \cdot a)^2 = (a \cdot d_c / d_m)^2 \chi \sim \tau_c = d_c^2 / \chi \quad (17)$$

Результати наближених оцінок значень перегрівів мембран реальних біологічних систем показали, що температура мембран при використанні навіть досить високих полів  $E = 0,5$  кВ/см може зростати на 10–20°C за час близько 0,1 с. Звичайно електрообробку припиняють за умов  $t > t_{tr}$ , оскільки при цьому починається небажаний омичний нагрів загальної маси зразка. Тому на практиці доцільно використовувати комбіновану термічно-електричну обробку з попереднім нагрівом загальної температури середовища до 40–50°C. Лише за таких умов локальний омичний нагрів може призводити до підвищення температури на мембранах до 60–70°C і викликати інтенсифікацію процесів плазмолізу.

В **РОЗДІЛІ 5** показані результати дослідження впливу комбінованої теплової та електричної обробки рослинної тканини на ефективність електроплазмолізу

В **підрозділі 5.1** вивчено процес термоплазмолізу рослинної тканини. Для визначення загальної ефективності термоплазмолізу було використано величину ін-

дексу дезінтеграції:

$$z = \frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_\infty - \sigma_0} \quad (18)$$

де  $\sigma_0$  – початкова провідність тканини;  $\sigma$  – поточна провідність тканини під час обробки;  $\sigma_\infty$  – провідність повністю плазмолізованої тканини.

Результати досліджень показали, що для всіх режимів обробки характерним є підвищення проникності бурякової тканини під час її нагрівання з наступним зниженням провідності після охолодження зразків до кімнатної температури. При цьому проникність тканини практично повністю повертається до початкового значення при застосуванні теплових полів з максимальною температурою до  $55^\circ\text{C}$ , що свідчить про фактичну відсутність термічного плазмолізу клітин.

Підвищення температури нагрівання зразків вище  $55^\circ\text{C}$  викликає не обернений термоплазмоліз клітин, про що свідчить зростання кінцевої електропровідності охолоджених зразків.

Кінетична залежність зміни індексу дезінтеграції тканини  $z$  в ході електрообробки визначається рівнянням виду

$$z = 1 - e^{-t/\tau} \quad (19)$$

де  $t$  – час дії теплового поля,  $\tau$  – характеристичний час термоплазмолізу. В даному випадку  $t/\tau = t_b$ . Отже, рівняння (18) може бути представлене у вигляді:

$$t_b = \ln(1 - z). \quad (20)$$

Графіки, побудовані за допомогою рівняння (20), згладжено прямими, кут нахилу  $\alpha$  яких визначає характеристичний час процесів термоплазмолізу:

$$\tau = 1/\text{tg}\alpha \quad (21)$$

На рис.9 представлено залежність  $\tau = f(1/T)$ . Можна бачити, що інтенсивність процесів термоплазмолізу швидко зростає після підвищення температури нагрівання до  $55^\circ\text{C}$  і вище, тому зроблено висновок, що доцільним є проводити додаткову електричну обробку при температурах до  $55^\circ\text{C}$ .

**В підрозділі 5.2** представлено результати досліджень різних методів комбінованої теплової та електричної обробки для температур  $40^\circ\text{C}$  і  $55^\circ\text{C}$ . Отримані результати показали, що для обох температурних режимів збільшення тривалості теплової обробки посилювало ступінь плазмолізу зразків, причому чітко визначилася залежність ефективності застосування спільної обробки від способу

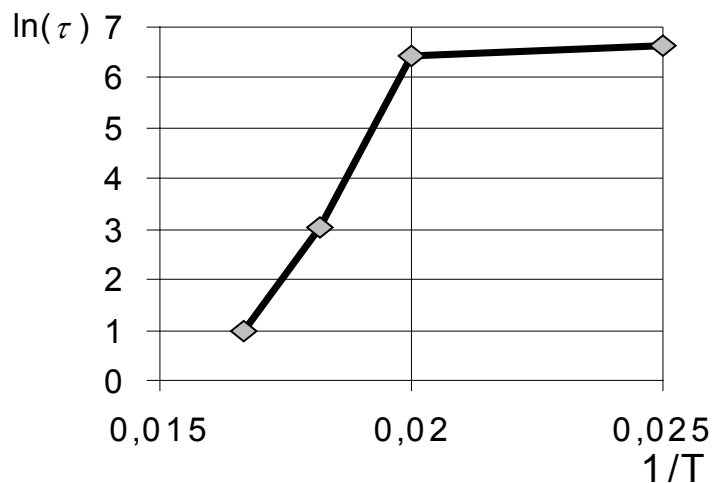
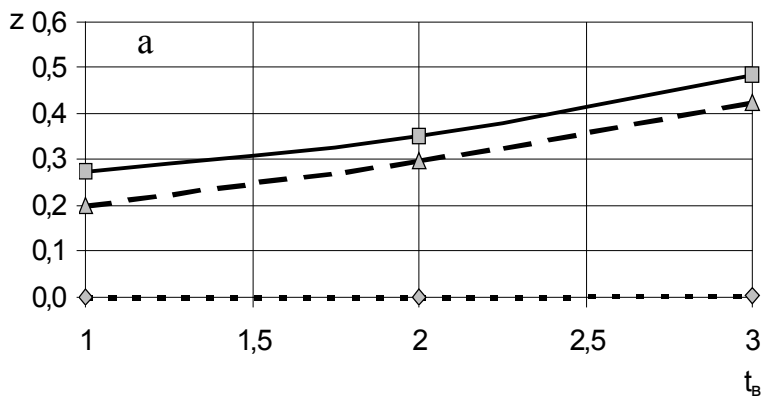
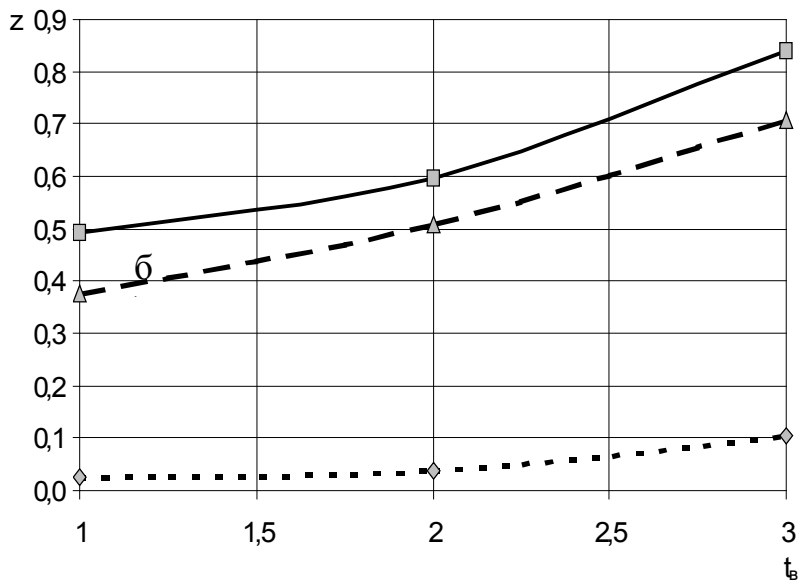


Рис.9 Залежність  $\ln(\tau)$  від  $1/T$



■ ♦ — тепл. 40°C    ■ — теплова+електр.    —▲— теплова+електр.



■ ♦ — тепл. 50°C    ■ — теплова+електр.    —▲— теплова+електр.

Рис.10 Залежності кінцевого значення індексу дезінтеграції від часу теплової обробки для температур: а) 40°C і б) 55°C при використанні різних методів обробки

імпульсної електричної обробки.

На основі проведених експериментальних та математичних досліджень запропонована технологічна схема і обладнання для проведення комбінованої теплової та електричної обробки стружки цукрового буряку.

Промислові випробування проводили на ВАТ “Старосинявський цукровий завод” (м. Стара Синява, Хмельницької області) та на ВАТ “Октябрський цукровий завод” (м.Карлівка, Полтавської області).

Аналіз роботи дифузійного відділення цукрового заводу показав, що застосування комбінованого плазмолізу порівняно з традиційною тепловою обробкою збільшує чистоту дифузійного соку на 1,6% і зменшує втрати цукру в жомі в середньому на 0,13%.

комбінування теплового та електричного впливу. Вищі значення індексу дезінтеграції тканини досягли саме для способу попередньої теплової обробки з додатковим електроплазмолізом (рис.10). А після електро теплового плазмолізу зразків значення  $z$  були завжди меншими. Ця різниця складала 6-7% при використанні температури теплової обробки  $T=40^{\circ}\text{C}$  і збільшувалася до 8-10% при  $T=55^{\circ}\text{C}$ . Було зроблено висновок про високу ефективність використання способу комбінованої обробки з попереднім тепловим та наступним електроплазмолізом, оскільки тільки за таких умов відбувається спільний вплив температурного і електричного факторів, внаслідок чого, згідно рівняння (2), спостерігається більш повне руйнування тканини, ніж при окремому застосуванні двох методів обробки.

В **РОЗДІЛІ 6** наведено результати дослідно-промислових випробувань комбінованої теплової та

Крім того, промисловими випробуваннями було встановлено, що при умові використання комбінованої теплової та електричної обробки зменшення температурного режиму дифузійного відділення заводу на 5–6°C не призводить до погіршення технологічних показників. Це свідчить про необхідність здійснення подальших спеціальних досліджень можливостей комбінованого методу електрообробки бурякової сировини та оптимізації умов його проведення.

За результатами проведених промислових досліджень на цукрових заводах, працюючих за технологічними схемами отримання дифузійного соку в колонних та похилих дифузійних апаратах для визначення ефективності різних способів комбінованої теплової та електричної обробки (теплоелектричної та електротеплової) бурякової стружки в промислових умовах був проведений порівняльний аналіз роботи дифузійного відділення цукрових заводів з використанням імпульсного електроплазмолізу.

В технологічній схемі заводів, працюючих з колонною дифузією, електричній обробці піддавалася стружка цукрового буряку, що була попередньо нагріта в ошпарювачі до температури близько 70°C.

У випадку використання технологічної схеми з похилим дифузійним апаратом обробці піддавалася стружка цукрового буряку без попереднього нагріву. Електроплазмолізована стружка нагрівалася в самому дифузійному апараті, тобто в цьому випадку здійснювався режим електротеплової обробки.

Експериментальні результати, отримані в ході промислових випробувань термоелектричного плазмолізу сировини на цукрових заводах з колонним дифузійним апаратом, були порівняні з результатами, отриманими іншими авторами після випробувань електротеплової обробки стружки на заводах з похилою дифузією.

Аналіз брався за умови нормального температурного режиму дифузійного відділення заводу, відхилення дигестії сировини в порівняльних варіантах складало не більше 1,1%, параметри імпульсного електричного поля (напруженість, тривалість обробки, тривалість імпульсів та пауз, форма імпульсів) були ідентичними в обох випадках. Для порівняння бралися основні показники ефективності роботи дифузійного відділення заводу: чистота дифузійного соку, втрати цукру в жомі, віднесені до маси буряку, та результати техніко-економічних розрахунків прогнозованої ефективності застосування комбінованої обробки. Результати порівняльного аналізу роботи дифузійних відділень заводів представлені в табл. 1.

В залежності від обраного способу комбінованої обробки, чистота дифузійного соку збільшувалася на 0,5% після застосування електротеплового плазмолізу (похила дифузія) і на 0,8 % після застосування теплоелектричної обробки (колонна дифузія). Втрати цукру в жомі при цьому зменшувалися на 0,06% і на 0,08%, відповідно. Прогнозований річний економічний ефект від впровадження комбінованої обробки на цукрових заводах продуктивністю 2400 т буряку на добу складає 116 730 для електротеплового способу плазмолізу та 177 190 грн для теплоелектричного методу обробки.

**Результати порівняльного аналізу роботи дифузійного відділення заводів, працюючих за різними схемами комбінованої теплової та електричної обробки**

Технологічні показники роботи дифузійного відділення	Режими роботи дифузійного відділення цукрових заводів			
	Колонна дифузія		Пожила дифузія	
	Теплова Обробка	Теплова з наступною електричною	Теплова Обробка	Електрична з наступною тепловою
Дигестія сировини, %	17,3	17,25	16,4	16,5
$\chi_{\text{диф.соку}}$ , %	86,9	88,5	82,6	83,1
Втрати цукру в жомі, % до маси буряку	0,56	0,43	0,53	0,52

Наведений вище порівняльний аналіз підтвердив результати модельних та експериментальних досліджень щодо більшої ефективності використання спільного теплоелектричного плазмолізу. Результати промислових випробувань і розрахунку прогнозованої економічної ефективності використання способів комбінованої теплової та електричної обробки показали, що застосування комбінованої обробки, порівняно з традиційною тепловою, призводить до покращення загальних показників роботи дифузійного відділення цукрового заводу.

#### Висновки та рекомендації

Аналіз впливу параметрів теплової обробки та імпульсного електроплазмолізу на ступінь плазмолізу бурякової тканини та ефективність енерговитрат дозволяє зробити наступні висновки:

1. Процес електроплазмолізу бурякової тканини складається з двох етапів: встановлення струму в системі з початковим ініціалізуючим пробом клітинних мембран і активної фази пробом з ростом сили струму через систему.

2. Зростання ступеня пробом на початковому етапі електрообробки сприяє збільшенню загального ступеня плазмолізу бурякової тканини. Причому ця залежність посилюється з підвищенням електричної напруженості імпульсного поля.

3. Граничне питоме значення енергії, що може бути підведена до системи, зростає з підвищенням напруженості імпульсного електричного поля, при цьому зростає і ефективність енерговитрат. Таким чином, підвищення напруженості плазмолізуючого поля сприяє економічності процесу електрообробки.

4. Ступінь пробом і ефективність електроплазмолізу підвищується при використанні біполярних імпульсів замість монополярних.

5. Дія процесів дифузійної міграції вологи є негативним фактором, що призводить до недостатньої та нерівномірної електрообробки, при цьому збільшується струм через тканину і відповідно енерговитрати.

6. Встановлено, що ефективність процесу електроплазмолізу залежить від загальної тривалості процесу електроплазмолізу, який повинен бути менше характеристичного часу прояву процесів дифузійної міграції вологи (близько 1с для бурякової тканини).

7. Сформульовано і розв'язано теплофізичну задачу для випадку проходження електричного струму через біологічну мембрану в оточенні внутрішньоклітинного соку.

8. Показано, що в зовнішньому електричному полі спочатку відбувається локальне омичне нагрівання клітинних мембран, а потім завдяки процесам теплообміну між мембраною та соком спостерігається нагрівання всієї тканини, що є небажаним з точки зору термічного розкладу компонентів та зниження харчової цінності соків.

9. Розрахована тривалість періоду селективного нагрівання мембран складає близько 0,1 с. За цей час температура мембрани при використанні електричного поля напруженістю  $E=500$  В/см підвищується на 10–20 °С.

10. Запропоновано на практиці використовувати комбіновану теплоелектричну обробку рослинної сировини з попереднім тепловим нагрівом загальної температури середовища до 40–50°С. Лише за таких умов локальний омичний нагрів може призводити до підвищення температури мембран до 60–70°С і викликати інтенсифікацію процесів плазмолізу.

11. Досліджено два методи комбінованого плазмолізу бурякової стружки: теплової обробки з додатковою електричною та попередній електроплазмоліз за наступною тепловою обробкою. В обох випадках встановлено суттєве збільшення загальної ефективності плазмолізу бурякової тканини порівняно з простою тепловою обробкою. Проте комбінована теплоелектрична обробка виявилася найефективнішою внаслідок спільної дії теплового та електричного факторів.

12. Розроблено промисловий спосіб комбінованої теплової та електричної обробки рослинної сировини і показано, що використання комбінованої теплової та електрообробки покращує технологічні показники та призводить до збільшення продуктивності роботи колонного дифузійного апарату.

### ***Список опублікованих робіт:***

1. Локальна генерація омичного тепла на мембранах клітин при електрообробці біологічних тканин / М.І.Лебовка, Р.М.Мельник, М.П.Купчик, М.І.Бажал, Р.А.Серебряков // Наукові записки Національного університету “Києво-могилянська академія”, т.18, 2000р, с. 51

Особистий внесок – безпосередня участь в розробці математичної моделі рослинної тканини та проведення чисельних експериментів, участь в підготовці матеріалу до опублікування.

2. Електроплазмоліз харчових продуктів: від моделей до практичного застосування / І.С.Гулий, М.І.Лебовка, М.П.Купчик, М.І.Бажал, Р.А.Серебряков, Р.М.Мельник // Наукові праці УДУХТ, №8, 2000р., с.37.

Особистий внесок: узагальнення теоретичних положень, обговорення результатів, підготовка до опублікування.

3. Механизм омического нагревания клеточных биосистем / Н.И.Лебовка, Р.М.Мельник, М.П.Купчик, М.И.Бажал, Р.А.Серебряков // Обработка дисперсных материалов и сред, Периодический сборник научных трудов, выпуск 10, сентябрь 2000 г. г.Одесса, с.38.

Особистий внесок – безпосередня участь в проведенні математичних розрахунків та аналізі отриманих результатів, участь у підготовці до опублікування.

4. Оптимизация процессов электрообработки сокоотружечной смеси / Н.И.Лебовка, М.П.Купчик, М.И.Бажал, В.М.Фалес, Р.А.Серебряков // Электронная обработка материалов, 2000 р., №1 стр.58-64.

Особистий внесок – безпосередня участь в аналізі отриманих результатів, участь в підготовці до опублікування

5. Импульсный электроплазмоліз рослинної тканини: оцінка ефективності енерговитрат// Бажал М.І., Серебряков Р.А., Гулий І.С., Купчик М.П., Московец О.М., Редчик В.М.// Наукові праці УДУХТ, 2001р, №9 стр.21-23

Особистий внесок: безпосереднє виконання експериментів і отримання експериментальних даних, участь в обговоренні і узагальненні результатів, підготовка до опублікування.

6. Вплив характеристик імпульсного електричного поля на ефект електроплазмолізу // Серебряков Р.А., Бажал М.І., Купчик М.П., Сидорченко О.І.// Вісник ДонДУЕТ (технічні науки) 2001, №1(9) стр.195-199

Особистий внесок – безпосередня участь в розробці лабораторної установки і методики досліджень, проведення експериментів, аналізування та систематизування їх результатів, участь в підготовці до опублікування.

7. Патент України № 36942 А 6 А23 N1/00 Спосіб електроплазмолізу подрібненої рослиної сировини /Гулий І.С., Купчик М.П., Бажал М.І., Лебовка М.І., Серебряков Р.А., Фалес В.М. – Опубл. 16.04.2001. Бюл.№3.

Особистий внесок: проведення аналітичного огляду способів електроплазмолізу, виконання експериментів і отриманні експериментальних даних, узагальнення результатів, підготовка матеріалу.

8. Вплив електрооброблення яблучної сировини на вихід і якість пектину / М.І.Бажал, Є.С.Богданов, І.С.Гулий, М.П.Купчик, Р.А.Серебряков, О.В.Ювченко// Матеріали 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції, Київ УДУХТ 2000р., ч.1, стр. 42

Особистий внесок: безпосередня участь в розробці лабораторної установки і методики досліджень, аналізі та систематизації отриманих результатів, участь в підготовці до опублікування.

9. Импульсное электрооброблення рослинної сировини / М.І.Бажал, Р.А.Серебряков, І.С.Гулий, М.П.Купчик, С.А.Керцман, Н.М.Махлін // Матеріали 6-ї Міжнародної науково-технічної конференції, Київ УДУХТ 2000р., ч.2, стр.124-125

Особистий внесок – безпосередня участь в розробці лабораторної установки і методики досліджень, проаналізував та систематизував їх результати, участь в підготовці до опублікування.

## **Анотація.**

### **Серебряков Р.А. Розробка процесу імпульсного електроплазмолізу бурякової сировини та удосконалення способу її теплової обробки. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12– процеси та обладнання харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв - Національний університет харчових технологій, Київ, 2002.

Дисертацію присвячено експериментальним та модельним дослідженням з розробки процесу імпульсного електроплазмолізу та використання його в поєднанні з попередньою тепловою обробкою. Встановлено, що ефективність електроплазмолізу тканини цукрового буряку залежить як від напруженості електричного поля, так і від тривалості імпульсів та міжімпульсних пауз імпульсного електричного поля. Доведено, що зростання напруженості електричного поля підвищує ефективність електрообробки, оптимальна тривалість якої не повинна перевищувати характеристичний час прояву процесів дифузійної міграції вологи (близько 1 с для бурякової тканини). За допомогою математичного моделювання та експериментальних досліджень показано, що доцільним уявляється проводити комбіновану термічно-електричну обробку з попереднім нагрівом сировини до температури близько 50-55<sup>0</sup>С, що забезпечує умови мінімізації енерговитрат на процес електроплазмолізу. Основні результати праці апробовані на ВАТ “Старосинявський цукровий завод” (м.Стара Синява, Хмельницької області) та на ВАТ “Цукровий завод Октябрського цукрокомбінату” (м.Карлівка, Полтавської області).

*Ключові слова:* імпульсне електричне поле, електроплазмоліз, комбінована обробка, цукровий буряк.

## **Аннотация**

### **Серебряков Р.А. Разработка процесса импульсного электроплазмоллиза сахарной свеклы и усовершенствование способа ее тепловой обработки.– Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств– Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2002.

Диссертация посвящена экспериментальным и модельным исследованием по разработке процесса импульсного электроплазмоллиза, а также использованию его совместно с тепловой обработкой свекловичного сырья. На основании экспериментальных исследований установлено, что процесс электроплазмоллиза свекловичной ткани состоит из двух этапов: установление электрического тока в системе (начальным инициализирующим пробоем клеточных мембран) и активной фазы пробоя с ростом силы тока через систему. Возрастание степени пробоя на начальном этапе электрообработки благоприятствует увеличению общей степени плазмоллиза свекловичной ткани, причем эта зависимость усиливается с увеличением электрической напряженности импульсного поля. Предельное удельное значение энергии,

которое может быть подведена к системе, повышается с увеличением напряженности импульсного поля, при этом увеличивается и эффективность энергозатрат.

Установлено, что во время процесса электрической обработки на разрушение мембран растительной ткани действуют факторы, которые можно условно разделить на две группы: электрическое воздействие и процессы неэлектрического воздействия (например процессы диффузионной миграции влаги из разрушенных клеток). Действие диффузионных процессов является негативным фактором, поскольку приводит к неравномерности обработки, что обусловлено образованием неоднородного перколяционного кластера, при этом увеличивается сила тока через ткань и соответственно энергозатраты. Рекомендовано использовать импульсы такой длины и частоты, чтобы продолжительность процесса электроплазмолиза не превышала характеристического времени проявления процессов диффузионной миграции влаги (около 1 с для свекловичной ткани).

Установлено, что степень пробоя электроплазмолиза повышается при использовании биполярных импульсов по сравнению с монополярными импульсами.

С помощью математического моделирования сформулирована и решена теплофизическая задача для случая прохождения электрического тока через биологическую мембрану в окружении внутриклеточного сока.

Показано, что во внешнем электрическом поле сначала происходит селективное нагревание мембран, а затем, благодаря процессам теплообмена между мембраной и соком, наблюдается нагревание всей системы, что нежелательно с точки зрения термического распада компонентов и снижения пищевой ценности соков.

Рассчитанная длительность периода селективного нагревания мембран составляет приблизительно 0,1с. За это время температура мембран при использовании электрического поля напряженностью  $E=500$  В/см повышается на 10-20 °С. При увеличении времени теплового воздействия начинается нежелательный омический нагрев общей массы образца. Поэтому на практике предложено использовать комбинированную термоэлектрическую обработку с предварительным тепловым нагревом общей массы до температур 40–50°С. Только при таких условиях локальный омический нагрев может произвести к повышению температуры мембран до 60–70°С, что достаточно для прохождения процессов термоплазмолиза.

На базе экспериментальных исследований показано, что интенсивность процессов термоплазмолиза быстро нарастает после нагревания образцов до 55°С, то есть когда обеспечиваются условия минимизации энергозатрат на процесс электроплазмолиза.

Показано, что использование предварительной электрической обработки приводит к увеличению начальной степени плазмолиза перед использованием тепловой обработки, которая благоприятствует дальнейшему повышению степени плазмолиза, в результате чего наблюдается увеличение общей эффективности обработки по сравнению с простой электрической или тепловой обработкой.

Установлено, что комбинированная тепловая обработка с дальнейшей электрической эффективна по сравнению с электротепловой обработкой, вследствие совместного воздействия температурного и электрического факторов.

Разработан промышленный способ комбинированной тепловой и электрической обработки растительной ткани.

Экспериментально доказано, что использование комбинированной тепловой и электрической обработки улучшает технологические показатели работы диффузионного отделения сахарного завода и приводит к увеличению продуктивности его работы.

Основные результаты работы апробированы на АО «Сахарный завод Октябрьского сахарокомбината» (пгт. Карловка, Полтавской области), и на АО «Старосинявский сахарный завод» (пгт. Старая Синява, Хмельницкой области).

*Ключевые слова:* импульсное электрическое поле, электроплазмолиз, комбинированная обработка, сахарная свекла.

### **Annotation**

**Serebryakov R.A. Development of pulsed electroplasmolysis and improvement of heat treatment of sugarbeet.– Manuscript.**

Candidate of technical science thesis, speciality 05.18.12-Food Microbiologic and Pharmaceutical Engineering, National University of Food Technologies, Kiev, Ukraine, 2002.

Simultaneous pulsed electroplasmolysis and heat treatment of sugar beet has been investigated. Electroplasmolysis efficiency can be influenced by electric field strength and pulse width and pulse frequency. Electrical treatment time no more than characteristic time of moisture migration in the tissue has been recommended (about 1 s for sugar beet tissue). It was concluded that the optimal conditions of combined treatment require pulsed electric field plasmolysis of beetroot stuff heated up to about 50-55°C in order to minimize the energy consumption. The main results of the present study have been successfully valorized at two sugar plants.

*Keywords:* pulsed electric field, electroplasmolysis, combined treatment, sugar beet