

THE EFFECT OF ELECTRIC SPARK DISCHARGES ON THE PROPERTIES OF THE JUICE–PULP MIXTURE DURING VIBROEXTRACTION FROM SUBSTANDARD BEET MASS

Yu. Zaporozhets, <https://orcid.org/0000-0003-2356-2148>

V. Zavalov, <https://orcid.org/0000-0001-9382-9050>

V. Sapiga, <https://orcid.org/0000-0001-7171-624X>

V. Shpak, <https://orcid.org/0000-0002-5312-9591>

National University of Food Technologies

Key words:

Juice-pulp mixture
Substandard beet mass
Vibroextraction
Quality indicators
Diffusion juice
Cell wall
Electric spark discharge
Shock wave

Article history:

Received 12.11.2025
Received in revised form
27.11.2025
Accepted 15.12.2025

Corresponding author:

Yu. Zaporozhets

E-mail:

zaporozhecuv@nuft.edu.ua

Citation: Запорожець Ю. В., Зав'ялов В. Л., Санига В. Я, Шпак В. В. (2025). Вплив електроіскрових розрядів на властивості сокоотружкової суміші при віброекстрагуванні з некондиційної бурякомаси. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 147—160,
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-12

ABSTRACT

The results of a study of the influence of electric spark discharges on the properties and quality indicators of the juice chip mixture during vibration extraction of target components from substandard beet pulp are presented in the article.

For the study, sugar beet fragments were selected, which constitute up to 3% of the total mass of beets in the washing departments of beet-sugar production.

Microphotographs of sugar beet tissue before and after the corresponding regime of electric spark treatment with 5 discharges indicated the separation of protoplasm from the cell wall, while a significant number of cells remained completely undamaged. When treated with 7—10 discharges, the cytoplasm disintegrated into small clots, the cell itself lost its vital functions, and the nucleus began to stand out. Increasing the number of discharges to 12—15 led to denaturation of the cytoplasm and decomposed it into particles, while the cell membrane became thinner in some places. Thus, the use of more than 10 discharges was not advisable, because the thickness of the cell membrane was significantly reduced, and in some places the boundaries were completely lost, while many cavities were formed, that is, the destruction of cell tissue occurred.

It was found that the denaturation of protoplasm during electric discharge depended to a greater extent on the number of discharges and to a lesser extent on the discharge voltage. Electrohydraulic processing in the mode with a voltage of 35 kV and a number of discharges of 7—10 allowed to increase the permeability of beet tissue and achieve a degree of plasmolysis within 53—98%.

It was found that the combined use of the effect of electric spark discharges on the internal mass transfer of the target components of the juice shaving mixture and the effect of low-frequency mechanical vibrations during vibroextraction on the external mass transfer is a significant effect of intensification of the process.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-12

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ РОЗРЯДІВ НА ВЛАСТИВОСТІ СОКОСТРУЖКОВОЇ СУМІШІ ПРИ ВІБРОЕКСТРАГУВАННІ З НЕКОНДИЦІЙНОЇ БУРЯКОМАСИ

Ю. В. Запорожець, <https://orcid.org/0000-0003-2356-2148>

В. Л. Зав'ялов, <https://orcid.org/0000-0001-9382-9050>

В. Я Сапіга, <https://orcid.org/0000-0001-7171-624X>

В.В. Шпак, <https://orcid.org/0000-0002-5312-9591>

Національний університет харчових технологій

У статті представлені результати дослідження впливу електроіскрових розрядів на властивості та якісні показники сокостружкової суміші при віброекстрагуванні цільових компонентів з некондиційної бурякомаси.

Для досліджень обрано хвостики та уламки цукрового буряка, які становлять до 3% від загальної маси буряка у мийних відділеннях бурякоцукрового виробництва.

Фотознімки тканини цукрового буряка до та після відповідного режиму електроіскрового оброблення п'ятьма розрядами свідчать про відділення протоплазми від клітинної стінки, при цьому значна кількість клітин лишаються взагалі не пошкодженими. При обробленні 7—10 розрядами спостерігається розпад цитоплазми на невеликі згустки, сама клітина втрачає свої життєві функції, починає виділятися ядро. Збільшення кількості розрядів до 12—15 призводить до денатурації цитоплазми та розкладає її на частинки, при цьому клітинна оболонка в деяких місцях тоншає. Доведено, що застосування більше 10 розрядів не є доцільним, тому що товщина клітинної оболонки значно зменшується, а в деяких місцях взагалі втрачаються межі, при цьому утворюється багато каверн, тобто відбувається руйнування тканини клітин.

Встановлено, що денатурація протоплазми під час ЕІО залежить більшою мірою від кількості розрядів і меншою — від напруги розряду. Електрогідролічне оброблення в режимі з напругою 35 кВ та кількості розрядів 7—10 дозволяє збільшити проникність тканини буряка та досягти ступеня плазмолізу в межах 53—98%.

Встановлено, що комбіноване використання впливу електроіскрових розрядів на внутрішнє масоперенесення цільових компонентів сокостружкової суміші та дія низькочастотних механічних коливань при віброекстрагуванні на зовнішній масообмін є суттєвим ефектом інтенсифікації процесу.

Ключові слова: сокостружкова суміш, некондиційна бурякомаса, віброекстрагування, якісні показники, дифузійний сік, клітинна оболонка, електроіскровий розряд, ударна хвиля.

Постановка проблеми. Ефективність вилучення цукрози на етапі дифузійного екстрагування відіграє ключову роль у забезпеченні економічної доцільності бурякоцукрового виробництва. Саме на цій стадії утворюються основні втрати сухих речовин, енергії й технологічного ресурсу. Значну складність у цьому процесі

створює частка дрібнофракційної некондиційної сировини, яка становить до 2—3% загальної маси буряка. Ця сировина, представлена хвостиками та уламками, відзначається низькою пористістю та високою схильністю до ущільнення, що перешкоджає її повноцінному залученню до масообмінних процесів у протитечійних дифузорах. Унаслідок цього погіршуються фільтраційні властивості суміші, збільшується тривалість екстрагування та виникають прямі технологічні втрати цукрози. Таким чином, постає конфлікт між необхідністю раціонального використання всієї сировини та конструктивними обмеженнями дифузійних апаратів, які не пристосовані для ефективної переробки дрібних частинок.

Звичні методи збільшення виходу, такі як механічне подрібнення, підвищення температури або продовження тривалості процесу, не вирішують основну проблему проникності клітинної тканини. Імпульсні електроіскрові розряди в рідині, відомі як електрогідралічний ефект, можуть створювати ударні хвилі, локальні кавітаційні мікропотоки та спричиняти плазмоліз клітинних структур. Це, у свою чергу, веде до зниження питомого електричного опору тканини, збільшення її проникності та прискорення внутрішніх процесів масоперенесення. Водночас вплив цих явищ на сокостружкові суміші з некондиційної бурякової маси досліджений недостатньо. Крім того, інтеграція розрядної дії з вібраційним масообміном поки що не отримала належного наукового аналізу, оптимальні параметри не визначено, а питання промислової ефективності залишається відкритим (Кондрат, & Шумілін, 2023).

Отже, актуальність наукової проблеми загального характеру обумовлена відсутністю дієвих підходів до керованої модифікації клітинної структури дрібнодисперсної бурякової сировини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток технологій, заснованих на використанні імпульсного електричного розряду в рідині, супроводжуваного явищем електрогідралічного ефекту, набуває широкого поширення у сферах хімічної (Syed, Ishaq, Rahman, Aslam, & Shukat, 2017) та харчової промисловості (Ranjha et al., 2021; Ghoshal, 2023; Alkanan et al., 2024), а також у концепціях «зеленої інтенсифікації» (Munshi, 2024) та біорефінерії сільськогосподарської сировини (Abdollahnejad, Rahimnejad, & Ezoji, 2025). Такі підходи сприяють підвищенню ефективності процесів і формують основу для сталого розвитку виробничих систем.

Фундаментом цього методу є формування імпульсного електричного розряду певних типів (іскрового, кистьового тощо) безпосередньо в об'ємі рідини. Результатом його дії є виникнення надвисоких гідравлічних тисків, здатних виконувати корисну механічну роботу, що супроводжується низькою фізичних і хімічних явищ. У сучасній науковій літературі високовольтні електричні розряди (High Voltage Electrical Discharges — HVED), визначаються як багатофункціональний інструмент, який об'єднує вплив імпульсних електричних полів, ударних хвиль, локальної кавітації, плазми та інтенсивного масообміну (Ferraz, & Silva, 2025; Jedlińska et al., 2025). Завдяки цьому HVED демонструють високу ефективність у процесах обробки систем типу «тверде тіло—рідина» і мають значний потенціал для застосування в розробці новітніх технологій (Vorobiev, & Lebovka, 2022).

Електрогідралічний ефект характеризується дією низки потужних фізичних явищ, зокрема високих і надвисоких імпульсних гідравлічних тисків, які спричи-

няють формування ударних хвиль із швидкостями на рівні звукових і надзвукових. Ці фактори супроводжуються помітним імпульсним переміщенням рідинних мас, активним розвитком кавітаційних процесів, генеруванням інфра- та ультразвукових хвиль, а також механічно-резонансними явищами. Крім того, виявляється дія потужних електромагнітних полів, інтенсивного імпульсного світлового, теплового й ультрафіолетового випромінювання, а також багатократної іонізації хімічних сполук і елементів, присутніх у рідинах. Завдяки комплексній взаємодії цих фізико-хімічних факторів досягається значний вплив на саму рідину й об'єкти, розташовані в її середовищі. Це включає руйнування або зміну клітинних структур, підвищення проникності клітинних мембран, збільшення питомої площі твердої фази й активізацію масоперенесення (Tomasevic, Heinz, Djekic, & Terjung, 2023).

У Миколаївському інституті імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України було розроблено й організовано серійне виробництво генераторів імпульсних струмів, які охоплюють широкий діапазон накопичуваної енергії — від 5 до 40 кДж за номінальної вихідної напруги до 50 кВ. Конструктивні рішення цих пристроїв відповідають сучасним стандартам техніки безпеки, що забезпечує можливість їх ефективного використання безпосередньо у виробничих умовах. Подібні установки, призначені для лабораторних і напівпромислових задач, згадуються також у міжнародних дослідженнях. У таких системах використовуються коаксіальні, «кільцеві» (annular gap) та проточні розрядні камери, які застосовуються для безперервної високовольтної імпульсної (HVED) обробки рослинних суспензій (Souza, Rodrigues, & Fonteles, 2025).

Активні дослідження, як теоретичні, так і прикладні, продовжують вивчати фізико-хімічні процеси, що супроводжують електроіскровий розряд у рідкому середовищі. У ряді наукових праць доведено ефективність високовольтного електроіскрового розряду (HVED) для екстрагування поліфенолів, летких сполук та інших біологічно активних компонентів із лікарських рослин, прянощів, виноробної сировини та навіть відходів харчової промисловості (Nutrizio et al., 2020).

Зокрема, було виявлено значний вихід фенольних і летких речовин із чебрецю (*Thymus serpyllum* L.) при використанні HVED у поєднанні з екологічно безпечними розчинниками. Дослідження також підтвердили посилену ефективність екстракції фенолів з орегано (Yan, Deng, Ju, Wu, & Xi, 2018) та результативне вилучення фенольних сполук зі шкірки какао-бобів (Jokić et al., 2019). Окремі праці демонструють перспективність поєднання HVED із застосуванням ультразвукових технологій, яке суттєво оптимізує процес масоперенесення та зменшує тривалість операції (Lončarić et al., 2020).

Ефективність технології HVED підтверджена також для обробки рослинної сировини, яка характеризується високим вмістом клітковини та лігніну. Для лушпиння арахісу було розроблено безперервну схему «annular gap HVED», яка дозволяє інтенсивно вилучати флавоноїди (Souza, Rodrigues, & Fonteles, 2025). У випадку виноградних вичавок виявлено, що поєднання HVED та ультразвукової обробки сприяє отриманню екстрактів з підвищеною антиоксидантною активністю за відносно низьких температур. Сучасні дослідження також свідчать про перспективу використання HVED у комбінації з природними евтектичними розчин-

никами (NADES), що забезпечує не лише високий вихід поліфенолів, а й покращену стабільність екстрактів під час зберігання (Abbaspour, Ghareaghajlou, Mogadam, & Ghasempour, 2024).

Для вилучення біологічно активних компонентів із рослинної сировини технологія HVED розглядається як серйозна альтернатива більш відомому методу пульсованих електричних полів (PEF). Згідно з низкою оглядових досліджень, PEF сприяє значному збільшенню виходу поліфенолів, білка, пектинів та інших цінних сполук із рослинної тканини завдяки процесу електропорації клітинних мембран (Almohammed et al., 2017). Проте при екстракції з грубодисперсної, низькопроникної та структурно складної сировини, такої як матеріали з жорсткими клітинними оболонками, високим вмістом лігніну чи полімерними структурами, HVED демонструє істотні переваги. Ця технологія забезпечує потужну механіко-гідродинамічну дію, що набуває вирішального значення для обробки таких складних систем, як некондиційна бурякова маса.

Обробка рослинної сировини імпульсним розрядом у рідкому середовищі в ряді досліджень дозволила суттєво підвищити вихід цільових компонентів та скоротити тривалість процесу. Для цибулинної шкірки (*Allium cepa* L.) встановлено, що застосування високовольтного електророзряду (HVED) у комбінації з природними евтектичними розчинниками сприяє збільшенню вмісту поліфенолів та покращенню антиоксидантних властивостей отриманих екстрактів. У дослідженнях різних рослинних матриць доведено, що оптимальний підбір складу розчинника та параметрів розряду забезпечує отримання якісних екстрактів у делікатних, майже нетермічних умовах (Foroutani et al., 2025). Інше дослідження показало, що використання HVED не лише збільшує вихід поліфенолів, але й підвищує їхню стабільність завдяки зменшенню окиснювальних процесів під час і після обробки (Li, Fan, & Xi, 2018).

Отримані експериментальні результати вітчизняних досліджень із використанням хмелевої сировини демонструють якісну відповідність світовим даним. Завдяки руйнуванню клітинної структури під впливом імпульсних розрядів забезпечується перехід альфа-кислот у рідку фазу та їх подальша ізомеризація в ізо-альфа-кислоти, що дозволяє значно скоротити тривалість процесу порівняно з традиційним методом настоювання. У результаті стає можливим отримання водно-ізомеризованого екстракту з високим виходом і широким спектром цільових компонентів, що відповідає сучасним тенденціям підвищення ефективності та селективності вилучення гірких речовин із хмелю (Nutrizio et al., 2020).

У дослідженнях, присвячених обробці бурштину, отримано цікаві результати щодо застосування імпульсних розрядів до структурно складних полімерних матеріалів. Зокрема, встановлено, що попередня HVED-обробка (високовольтні електророзряди з напругою в десятки кіловольт і серіями сотень імпульсів) суттєво покращує як внутрішнє, так і зовнішнє масоперенесення. Це сприяє підвищенню якості отриманого екстракту завдяки збільшенню площі контакту фаз та частковому руйнуванню полімерних ланцюгів. Подібні ефекти спостерігаються і для рослинних полімерних матриць, таких як пектиновмісна та лігніновмісна сировина, наприклад, у процесі вилучення пектину з жому цукрових буряків (Fernández-Delgado et al., 2023).

У цукровій промисловості звичні методи збільшення виходу бурякової сировини, такі як механічне подрібнення, підвищення температури або продовження

тривалості процесу спричиняють підвищення кольоровості, накопичення високомолекулярних сполук у дифузійному соці та призводять до зростання енергетичних витрат. Це перетворює некондиційну бурякову масу з потенційного ресурсу на фактичні відходи, що суперечить сучасним принципам енергозбереження, циркулярної економіки та безвідходного виробництва.

Значний інтерес викликають дослідження, спрямовані на оброблення бурякової сировини із застосуванням електрофізичних методів. Виявлено, що використання технології HVED для попередньої обробки жому цукрових буряків сприяє збільшенню виходу пектину, покращенню його реологічних властивостей і загалом підвищує ефективність використання побічних продуктів виробництва цукру (Yu, 2021). Паралельно дослідження впливу пульсованих електричних полів (PEF) на процес переробки цукрових буряків засвідчили можливість реалізації методу «холодної» дифузії, підвищення виходу соку й покращення його якості. Особливо помітний ефект спостерігається в разі попередньої PEF-обробки коренеплодів і бурякової стружки (Palos-Hernández, González-Paramás, & Santos-Buelga, 2025; El Kantar et al., 2018).

Важливим напрямом є застосування електрофізичних методів для модифікації допоміжних реагентів і процесів очищення соків. Зокрема, дослідження показують, що використання таких методів, як високовольтні розряди та електромагнітні поля, для обробки водно-вапняної суспензії сприяє підвищенню дисперсності твердої фази, збільшенню питомої поверхні та покращенню активності суспензії під час очищення дифузійного соку (Fernández-Delgado et al., 2023). Це відкриває можливості для підвищення ефективності процесу очищення та зменшення концентрації ВМР у дифузійному соці, що позитивно впливає на його чистоту та стабільність.

Сучасні дослідження підкреслюють перспективність використання HVED і пов'язаних електрофізичних методів у переробці жому та волокнистих компонентів буряка з метою отримання харчових волокон і комбінованих дієтичних добавок, зокрема з покращеними детоксикаційними властивостями (Fernández-Delgado et al., 2023; Yu, 2021). Водночас низка праць демонструє, що обробка буряків методом PEF перед процедурами пресування або сушіння може позитивно впливати на структурно-механічні характеристики жому, значно покращуючи його придатність для подальшої переробки (Nutrizio, Režek Jambrak, Rezić, & Djekic, 2022; Ammelt et al., 2021).

Розширений аналіз літератури переконливо демонструє значний потенціал застосування імпульсних електричних розрядів у рідкому середовищі для обробки рослинної сировини, зокрема подрібненої некондиційної бурякової маси. Це дає змогу інтенсифікувати процес екстракції цільових компонентів, підвищити ефективність очищення дифузійного соку та інтегрувати побічні продукти у біорефінерійні технології. Однак потребу подальшого дослідження викликають такі аспекти, як оптимізація параметрів розряду (напруга, міжелектродний проміжок, форма електродів, кількість розрядів, конструкція камери розряду) та їх взаємодія з посиленними гідродинамічними режимами, зокрема вібраційними. Це є одним із ключових моментів для створення високоефективних безперервних екстракційних апаратів, здатних забезпечити комплексну переробку некондиційної бурякової маси (Almohammed, Mhemdi, & Vorobiev, 2017; Raso, Heinz, Alvarez, & Toepfl, 2022).

Зважаючи на викладене вище, основним завданням досліджень є забезпечення оптимальних умов інтенсивного масоперенесення за мінімального споживання енергоресурсів і мінімізації технологічних втрат.

Мета дослідження: встановити вплив електроіскрового оброблення сокостружкової суміші з некондиційної бурякомаси на її властивості при віброекстрагуванні.

Матеріали і методи. Для досліджень обрано хвостики та уламки цукрового буряка, які становлять до 3% від загальної маси буряка у мийних відділеннях бурякоцукрового виробництва.

Для отримання бурякової стружки цукровий буряк відмивали від бруду та домішок і подрібнювали до стружки на лабораторній бурякорізці, після чого готували сокостружкову суміш у співвідношенні 1:2, нагрівали до температури 75 °С температури необхідної для проведення досліджень. Сокостружкову суміш піддавали електроіскровому обробленню на експериментальній установці при різних режимах, змінюючи при цьому напругу розряду та кількість розрядів. Шляхом екстрагування отримували дифузійний сік.

Для оброблення сировини виконували електроіскрову установку серії «СКИФ-140», розроблену фахівцями Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України (м. Миколаїв), що показана на рис. 1.



Рис. 1. Імпульсний високовольтний розрядний пристрій «СКИФ-140»

Витрати електроенергії на електроіскрове оброблення (ЕІО) певної кількості суміші в раціональному режимі оброблення визначали за формулою (1):

$$W = W_3 \cdot N, \quad (1)$$

де W_3 — запасена енергія, що виділяється в одному імпульсі, Дж; N — необхідна кількість розрядів.

Накопичена енергія, що виділяється в одному імпульсі, визначається за формулою (2):

$$W_3 = \frac{U^2 \cdot C}{2}, \quad (2)$$

де U — необхідна напруга для пробиття міжторового проміжку, В; C — ємність конденсаторів, Ф.

Вміст сухих речовин (СР) визначали рефрактометрично на рефрактометрах РПЛ-3 та РПЛ-1. Суть методу полягає у визначенні масової частки сухих речовин у буряковій сировині за коефіцієнтом переломлення його дифузійного соку. Дві краплі соку наносять на призму рефрактометра, витримують їх протягом 5 хв, пересуваючи окуляр до сполучення візира з межею темних і світлих полів. По шкалі визначають відсоток сухих речовин. Контролюють температуру визначення і якщо вона відмінна від 20 °С, застосовують температурні поправки (Dilchva, & Kipova, 2008).

Під час визначення питомої електропровідності тканин цукрового буряка до та після оброблення за допомогою прецизійного кондуктометра ОК102/1 угорської

безперервної екстракції. Результати показали, що вихід сухих речовин при попередній обробці становив від 98,5 до 99,8% (для тривалості екстракції 30 та 70 хв при 50 °С, відповідно). Це корелює з отриманими дослідними даними.

Вплив електроіскрових розрядів на тканину рослинної сировини. Аналізуючи основні положення плазмолітичної теорії соковіддачі та отримані результати експериментальних досліджень можна зробити висновок, що в структурі клітин цукрового буряка відбуваються певні зміни.

Отримані за допомогою мікроскопа знімки тканини цукрового буряка до та після відповідного режиму ЕІО при збільшенні у 660 разів (рис. 3) дозволяють візуально спостерігати процес електроіскрового гідроплазмолізу тканини стружки цукрового буряка, що характеризується структурними змінами — подрібненням та денатурацією протоплазми. Денатурація протоплазми під час ЕІО більшою мірою залежить від кількості розрядів і меншою — від напруги розряду.

У режимі оброблення з п'ятьма розрядами (рис. 3, б) спостерігається відділення протоплазми від клітинної стінки, при цьому значна кількість клітин лишаються взагалі не пошкодженими.

При збільшенні кількості розрядів до 7—10 спостерігається розпад цитоплазми на невеликі згустки, сама клітина втрачає свої життєві функції, починає виділятися ядро.

Можна стверджувати, що збільшення кількості розрядів до 12—15 призводить до денатурації цитоплазми та розкладає її на частинки, при цьому клітинна оболонка в деяких місцях тоншає.

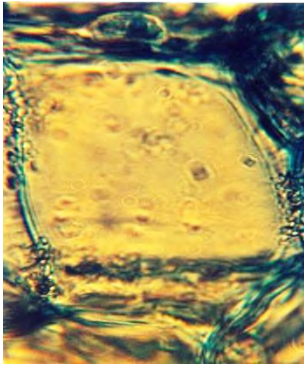
Проведені дослідження підтверджують, що в тканині цукрового буряка в процесі ЕІО відбуваються значні зміни: денатурація цитоплазми, утворюються пори в мембранах оболонок, відбувається розпад протоплазми на крупні суспендовані частинки, що важко проходять через клітинні стінки та в екстрагент.

Застосування ЕІО сокостружкової суміші з кількістю розрядів більше 10 не є доцільним, тому що клітинна оболонка значно зменшує свою товщину, а в деяких місцях взагалі втрачає свої межі, при цьому утворюється багато каверн, тобто відбувається руйнування тканини клітин.

Вплив режимів ЕІО на електричні параметри тканини цукрового буряка. Для підтвердження структурних змін у тканині рослинної сировини було досліджено вплив ЕІО на електропровідність тканини цукрового буряка, яка залежить від проникності іонів розчинних речовин. Досягнення максимальної електропровідності свідчить про завершення процесу електрогідроплазмолізу.

В оброблених шматочках цукрового буряка, розмірами 20×20×5 мм, визначали середні значення питомого опору, які наведені на рис. 4. З отриманих залежностей бачимо, що ЕІО призводить до зниження питомого опору та підвищення проникності клітини, що є підтвердженням структурних змін, яких зазнала тканина цукрового буряка.

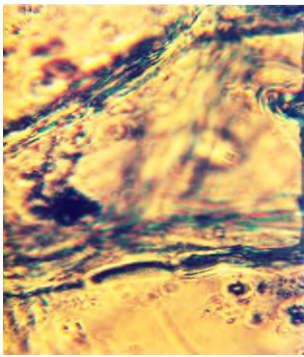
У результаті цього можна зробити висновок, що після визначення ступеня плазмолізу тканини цукрового буряка залежно від зміни питомого опору, при різних режимах ЕІО (рис. 5), електрогідролітичне оброблення в режимі з напругою 35 кВ та кількості розрядів 7—10 дозволяє збільшити проникність тканини та досягти ступеня плазмолізу в межах 53—98%.



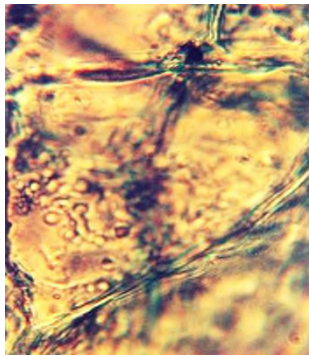
а



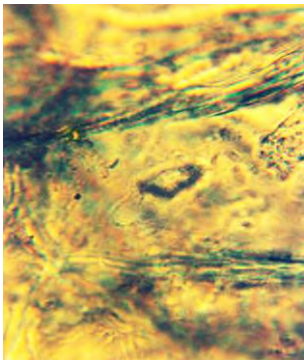
б



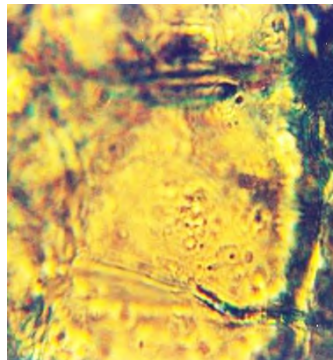
в



г



д



е

Рис. 3. Морфологія клітин цукрового буряка:

а — без оброблення; б — після ЕІО з напругою 35 кВ та кількості розрядів 5;
в — після ЕІО з напругою 35 кВ та кількості розрядів 7; г — після ЕІО з
напругою 35 кВ та кількості розрядів 10; д — після ЕІО з напругою 35 кВ та
кількості розрядів 12; е — після ЕІО з напругою 35 кВ та кількості розрядів 15

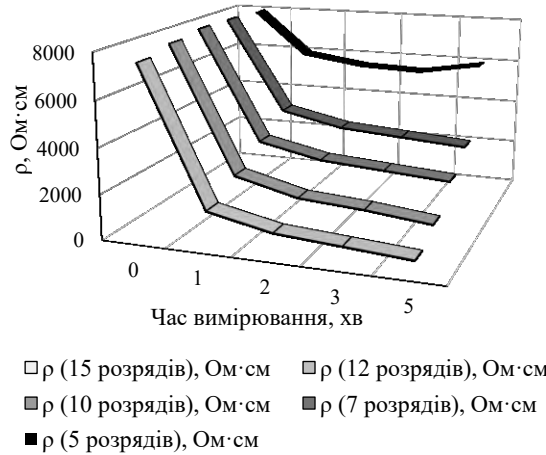


Рис. 4. Зміна питомого опору бурякової тканини залежно від часу вимірювання після ЕІО

Свідченням цього є зниження питомого опору бурякової тканини та збільшення її електропровідності. У праці (Nowaska et al., 2019) підтверджено збільшення електропровідності у випадку впливу імпульсного електричного поля за різної напругеності — 4,38 та 6,25 кВ/см та кількості імпульсів 10—30.



Рис. 5. Зміна ступеня плазмолізу тканини цукрового буряка при ЕІО залежно від кількості розрядів

Кінцеве значення ступеня плазмолізу тканини та питомого опору суттєво залежить від кількості розрядів, водночас такий ефект спостерігається до 10—12 розрядів.

Існують дослідження впливу імпульсних електричних полів на пошкодження клітин (плазмоліз) тканини цукрового буряка. Обробку застосовували з використанням біполярних імпульсів в інтервалі температур 20—70 °С. Підтверджено, що обробка помітно прискорює процес дифузії, який вимагає ≈ 1 год при м'якому нагріванні при 40 °С (Lebovka, Shynkaryk, El-Belghiti, Benjelloun, & Vorobiev, 2007).

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на поглиблення вивчення закономірностей взаємодії імпульсних електроіскрових розрядів з клітинною структурою некондиційної бурякової сировини та встановлення оптимальних режимів їх поєднання з вібраційними гідродинамічними впливами з метою інтенсифікації внутрішнього й зовнішнього масоперенесення.

Висновки

Встановлено, що використання електроіскрових розрядів для оброблення сокостружкової суміші є доцільним як метод механічної, фізичної дії, що підвищує якісні показники отриманого дифузійного соку. Концентрація вилучених речовин у дифузійному соку збільшилась на 27,5—50,0% протягом 5—30 хв віброекстрагування при застосуванні обробки електроіскровим розрядом.

Фотознімки тканини цукрового буряка до та після відповідного режиму електроіскрового оброблення п'ятьма розрядами свідчать про відділення протоплазми від клітинної стінки, при цьому значна кількість клітин лишаються взагалі не пошкодженими. При обробленні 7—10 розрядами спостерігається розпад цитоплазми на невеликі згустки, сама клітина втрачає свої життєві функції, починає виділятися ядро. Збільшення кількості розрядів до 12—15 призводить до денатурації цитоплазми та розкладає її на частинки, при цьому клітинна оболонка в деяких місцях тоншає. Отже, застосування більше 10 розрядів не є доцільним, тому що товщина клітинної оболонки значно зменшується, а в деяких місцях взагалі втрачаються межі, при цьому утворюється багато каверн, тобто відбувається руйнування тканини клітин.

Електрогідралічне оброблення в режимі з напругою 35 кВ та кількості розрядів 7—10 дозволяє збільшити проникність тканини буряка та досягти ступеня плазмолізу в межах 53—98%.

Використання впливу електроіскрових розрядів на властивості та якісні показники сокостружкової суміші в поєднанні з дією низькочастотних механічних коливань при віброекстрагуванні з некондиційної бурякомаси може бути суттєвим ефектом інтенсифікації внутрішнього та зовнішнього масоперенесення при вилученні цукрози.

Література

Кондрат, О., Шумілін, Т. (2023). Електрогідралічний ефект Юткіна та електроіскрові розряди в рідинах. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 23(3), 61—67. <https://doi.org/10.69628/pdogf/3.2023.61>.

Abbaspour, L., Ghareaghajlou, N., Mogaddam, M. R. A., & Ghasempour, Z. (2024). An innovative technique for the extraction and stability of polyphenols using high voltage electrical discharge: HVED-Assisted Extraction of Polyphenols. *Current Research in Food Science*, 9, 100928. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2024.100928>.

Abdollahnejad, M., Rahimnejad, M., & Ezoji, H. (2025). A systematic review in applications of pulsed electric field systems beyond food industry. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 110562. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2025.110562>.

Alkanan, Z. T., Altemimi, A. B., Younis, M. I., Ali, M. R., Cacciola, F., & Abdelmaksoud, T. G. (2024). Trends, recent advances, and application of pulsed electric field in food processing: A review. *ChemBioEng Reviews*, 11(4), e202300078. <https://doi.org/10.1002/cben.202300078>.

Almohammed, F., Koubaa, M., Khelfa, A., Nakaya, M., Mhemdi, H., & Vorobiev, E. (2017). Pectin recovery from sugar beet pulp enhanced by high-voltage electrical discharges. *Food and bioprocess technology*, 103, 95—103. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.03.005>.

Almohammed, F., Mhemdi, H., & Vorobiev, E. (2017). Purification of juices obtained with innovative pulsed electric field and alkaline pressing of sugar beet tissue. *Separation and Purification Technology*, 173, 156—164. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.09.026>.

Ammelt, D., Lammerskitten, A., Wiktor, A., Barba, F. J., Toepfl, S., & Parniakov, O. (2021). The impact of pulsed electric fields on quality parameters of freeze-dried red beets and pineapples. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 1777—1787. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14803>.

Dilchva, M., Kinova, V. (2008). Modeling and optimization of technological processes. *UFT*, 14—28.

El Kantar, S., Boussetta, N., Rajha, H. N., Maroun, R. G., Louka, N., & Vorobiev, E. (2018). High voltage electrical discharges combined with enzymatic hydrolysis for extraction of polyphenols and fermentable sugars from orange peels. *Food Research International*, 107, 755—762. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.070>.

Fernández-Delgado, M., del Amo-Mateos, E., Coca, M., López-Linares, J. C., García-Cubero, M. T., & Lucas, S. (2023). Enhancement of industrial pectin production from sugar beet pulp by the integration of surfactants in ultrasound-assisted extraction followed by diafiltration/ultrafiltration. *Industrial Crops and Products*, 194, 116304. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116304>.

Ferraz, L. P., & Silva, E. K. (2025). Pulsed Electric Fields and Ultrasound for Enhanced Mass Transfer: A Review of Extraction and Drying in Food Processing. *ACS Food Science & Technology*, 5(9), 3229—3253. <https://doi.org/10.1021/acscfoodscitech.5c00567>.

Foroutani, Z., Eyshi, S., Ghareaghajlou, N., Abbaspour, L., Mogaddam, M. R. A., Khorram, S., & Ghasempour, Z. (2025). High voltage electrical discharge-assisted extraction of bioactive compounds from red onion peel (*Allium cepa* L.) using natural deep eutectic solvents: Efficiency, stability, and functional properties. *Applied Food Research*, 101584. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101584>.

Ghoshal, G. (2023). Comprehensive review on pulsed electric field in food preservation: Gaps in current studies for potential future research. *Heliyon*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e117532>.

Jedlińska, A., Barańska-Dołomisiewicz, A., Samborska, K., Rybak, K., Wiktor, A., Witrowa-Rajchert, D., & Nowacka, M. (2025). The Impact of Pulsed Electric Field Treatment of Beetroots on the Physicochemical Properties of Juice, Dried Juice, and Dried Pomace. *Applied Sciences*, 15(7), 3834. <https://doi.org/10.3390/app15073834>.

Jokić, S., Pavlović, N., Jozinović, A., Ačkar, Đ., Babić, J., & Šubarić, D. (2019). High-voltage electric discharge extraction of bioactive compounds from the cocoa bean shell. *Chemical and biochemical engineering quarterly*, 33(2), 271—280. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2018.1525>.

Li, Z., Fan, Y., & Xi, J., (2018). Recent advances in high voltage electric discharge extraction of bioactive ingredients from plant materials. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.119>.

Lebovka, N. I., Shynkaryk, M. V., El-Belghiti, K., Benjelloun, H., Vorobiev, E. (2007). Plasmolysis of sugarbeet: Pulsed electric fields and thermal treatment. *Journal of Food Engineering*, 80(2), 639—644. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.06.02>.

Lončarić, A., Jozinović, A., Kovač, T., Kojić, N., Babić, J., & Šubarić, D. (2020). High voltage electrical discharges and ultrasound-assisted extraction of phenolics from indigenous fungus-resistant grape by-product. *Polish journal of food and nutrition sciences*, 70(2), 101—111. <https://doi.org/10.31883/pjfn/117716>.

Munshi, M. (2024). Review on pulsed electric fields: a new horizon in food processing health techniques. *FMDB Trans. Sustain. Health Sci. Lett*, 2, 1—9. <https://doi.org/10.69888/FTSHSL.2024.000167>.

Nakthong, N., Eshtiaghi, M. N. (2020). *Pulsed Electric Field Treatment of Sugar Beet*. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 505(1), 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/505/1/012055>

Niamat, M., Sarfraz, S., Shehab, E., Ismail, S. O., Khalid, Q. S. (2019). Experimental Characterization of Electrical Discharge Machining of Aluminum 6061 T6 Alloy using Different Dielectrics. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03987-4>.

Nowacka, M., Tappi, S., Wiktor, A., Rybak, K., Miszczykowska, A., Czyzewski, J., Drozdal, K., Witrowa-Rajchert, D., Tylewicz, U. (2019). The impact of pulsed electric field on the extraction of bioactive compounds from beetroot. *Foods*, 8(7), 244. <https://doi.org/10.3390/foods8070244>.

Nutrizio, M., Pataro, G., Carullo, D., Carpentieri, S., Mazza, L., Ferrari, G., Chemat, F., Banović, M., Jambrak, A. R. (2020). High voltage electrical discharges as an alternative extraction process of phenolic and volatile compounds from wild thyme (*Thymus serpyllum* L.): in silico and experimental approaches for solubility assessment. *Molecules*, 25(18), 4131. <https://doi.org/10.3390/molecules25184131>.

Nutrizio, M., Režek Jambrak, A., Rezić, T., Djekic, I. (2022). Extraction of phenolic compounds from oregano using high voltage electrical discharges-sustainable perspective. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(2), 1104—1113. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15476>.

Palos-Hernández, A., González-Paramás, A. M., Santos-Buelga, C. (2025). Latest Advances in Green Extraction of Polyphenols from Plants, Foods and Food By-Products. *Molecules*, 30(1), 55. <https://doi.org/10.3390/molecules30010055>.

Ranjha, M. M. A., Kanwal, R., Shafique, B., Arshad, R. N., Irfan, S., Kieliszek, M., Kowalczewski, P. L., Irfan, M., Khalid, M. Z., Roobab, U., Aadil, R. M. (2021). A critical review on pulsed electric field: A novel technology for the extraction of phytoconstituents. *Molecules*, 26(16), 4893. <https://doi.org/10.3390/molecules26164893>.

Raso, J., Heinz, V., Alvarez, I., & Toepfl, S. (2022). *Pulsed electric fields technology for the food industry*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2>.

Souza, F. E. B., Rodrigues, S., & Fonteles, T. V. (2025). Non-Thermal Technologies in Food Fermentation: Mechanisms, Benefits, and Industrial Perspectives for Sustainable Development. *Processes*, 13(9), 2988. <https://doi.org/10.3390/pr13092988>.

Syed, Q. A., Ishaq, A., Rahman, U. U., Aslam, S., & Shukat, R. (2017). Pulsed electric field technology in food preservation: a review. *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, 6(6), 168—172. <https://doi.org/10.15406/jnhfe.2017.06.00219>.

Tomasevic, I., Heinz, V., Djekic, I., & Terjung, N. (2023). Pulsed electric fields and meat processing: latest updates. *Italian Journal of Animal Science*, 22(1), 857—866. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2023.2206834>.

Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2022). Processing of sugar beets assisted by pulsed electric fields. *Research in Agricultural Engineering*, 68(2), 63—79. <https://doi.org/10.17221/91/2021-RAE>.

Yan, L. G., Deng, Y., Ju, T., Wu, K., & Xi, J. (2018). Continuous high voltage electrical discharge extraction of flavonoids from peanut shells based on "annular gap type" treatment chamber. *Food Chemistry*, 256, 350—357. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.129>.

Yu, T. M. (2021). Beet pulp dietary fiber exposed to an extremely low-frequency electromagnetic field: detoxification properties. *Foods and raw materials*, 9(1), 2—9. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-2-9>.