

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**



СВЯТНЕНКО РОМАН СЕРГІЙОВИЧ

УДК 66 - 932.42:537.312.7'8]:637.1

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ОБРОБЛЕННЯ РІДКИХ
МОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ ІМПУЛЬСНИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМИ
ПОЛЯМИ**

05.18.12 – процеси та обладнання харчових мікробіологічних та
фармацевтичних виробництв

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті харчових технологій Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, доцент
Маринін Андрій Іванович,
Національний університет харчових технологій МОН України, завідувач Проблемної науково-дослідної лабораторії

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сухенко Владислав Юрійович,
Національний університет біоресурсів і природокористування України МОН України, завідувач кафедри стандартизації та сертифікації сільськогосподарської продукції

кандидат технічних наук, доцент
Шевченко Андрій Олександрович,
Харківський державний університет харчування та торгівлі МОН України, доцент кафедри процесів та устаткування харчової і готельно-ресторанної індустрії ім. М.І. Беляєва

Захист відбудеться «13» травня 2021 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02 Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68 в ауд. А-311.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий «09» квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент



С.І. Літвинчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Відповідно до сучасних вимог, які висуваються до якості і безпечності харчових продуктів, в регламентованих термінах придатності до споживання продукти повинні зберігати високі якісні показники і бути безпечними для споживання. Однак у процесі зберігання продуктів, що не містять заборонених законодавством України консервантів, під дією природних чинників, а також технологічного впливу, відбувається часткове окиснення жирів, розвиток патогенної і умовно патогенної мікрофлори. Це знижує якість та конкурентоспроможність продукції вітчизняних підприємств на ринку.

В сучасних технологіях харчової промисловості все більшу роль відіграють нетеплові методи оброблення харчових продуктів, що сприяють впровадженню ресурсо- та енергозберігаючих технологій, інтенсифікації виробничих процесів, покращенню харчової і біологічної цінності. До них відносять високий гідростатичний тиск, імпульсні електричні поля (ІЕП), ультразвук високої інтенсивності, ультрафіолетове та іонізуюче опромінення тощо.

Актуальним є розроблення інноваційних методів, спрямованих на інтенсифікацію процесів оброблення рідких продуктів енергоефективними електрофізичними методами.

Даній проблематиці присвячені численні наукові роботи, зокрема: М.І. Бойка, А.І. Українця, А.І. Мариніна, В.В. Олішевського, Л.Т. Хименка, М.І. Лебовки, G.A. Gulyi, G.V. Barbosa - Canovas, L. Barsottii, J.C. Cheftel, Н.Е. Vorobiev, T.R. Bajgai and F. Hashinaga та багато інших. Поряд з цим, в даних наукових працях недостатньо повно висвітлені питання енергоощадних методів оброблення рідких молочних продуктів з метою подовження їх терміну зберігання.

Ці проблеми можна вирішити шляхом прийняття технологічних рішень на етапі виробництва продуктів з використанням імпульсних електричних полів, які позитивно впливають на мікробіологічні, фізико-хімічні показники зі збереженням харчової і біологічної цінності, та подовження термінів їх зберігання.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню зменшення енерговитрат при обробленні рідких продуктів у харчовій промисловості для подовження їх терміну зберігання, на прикладі рідких молочних продуктів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Національному університеті харчових технологій (НУХТ), а саме в Проблемній науково-дослідній лабораторії, за участі кафедри інженерної електрофізики і Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (ХПІ), в межах держбюджетних тем «Інноваційна технологія обробки харчових середовищ високоенергетичним дискретним впливом» (номер державної реєстрації 0115U003196С, 2015-2016 рр.), «Реалізації ресурсозберігаючих методів модифікації функціонально-технологічних характеристик молочної сироватки в технологіях харчових

продуктів цільового призначення» (номер державної реєстрації 0120U100868, 2020-2022 рр.), «Наукове обґрунтування ресурсоефективних технологій харчових продуктів, збагачених полі функціональними інгредієнтами», (номер державної реєстрації 0120U102556, 2020-2022 рр.), що виконувались за рахунок коштів державного бюджету Міністерства освіти і науки України.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є обґрунтування параметрів оброблення рідких молочних продуктів імпульсними електричними полями для впровадження ресурсо- та енергозберігаючих технологій інтенсифікації виробничих процесів покращення харчової і біологічної цінності.

Відповідно до мети наукової роботи поставлено такі **завдання**:

- обґрунтувати доцільність використання запропонованого методу для оброблення рідких харчових продуктів, в тому числі і молочних;
- дослідити основні фактори, що впливають на процес інактивації мікроорганізмів під дією імпульсних електричних полів;
- провести моделювання процесу інактивації мікроорганізмів в молоці імпульсними електричними полями в камерах періодичної дії;
- розробити математичний опис процесів дії імпульсних електричних полів в камерах проточного типу з максимальною енергоефективністю;
- встановити вплив імпульсних електричних полів на фізико–хімічні та мікробіологічні показники залежно від параметрів оброблення;
- визначити параметри електроімпульсного оброблення незбираного молока, молочної сироватки та води;
- провести математичне моделювання фізико–хімічних показників незбираного молока до та після оброблення ІЕП за різних режимів;
- розробити апаратурно-технологічну схему оброблення молока з використанням імпульсних електричних полів та провести її апаратурно-технологічне оформлення з розробленням нормативного документу.

Об'єкт дослідження – процеси оброблення рідких молочних продуктів імпульсними електричними полями.

Предмет дослідження – раціональні параметри процесу оброблення рідких молочних продуктів імпульсними електричними полями.

Методи досліджень. При проведенні досліджень використовували комплексні методи теоретичних, аналітичних та експериментальних досліджень. Математичне моделювання процесів оброблення імпульсними електричними полями в камерах періодичної та безперервної дії базується на теоріях тепломасообміну, положення теорії електромагнітного поля, статистичної обробки результатів досліджень, побудови математичної моделі та комплексної оцінки якості обробленого продукту. Фізичне моделювання побудоване на математичній теорії планування експерименту та оброблення результатів. Для аналізу фізико-хімічних показників використовувались загальноприйняті сучасні методики та відповідне лабораторне обладнання. В роботі використовували сучасні пакети програм Microsoft Office 2012, Mathcad 15, КОМПАС-3D V16, Original 8.6 та ін.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше виконано математичне моделювання процесів оброблення молока імпульсними електричними полями в камерах безперервної та періодичної дії;
- встановлено механізм процесів на підставі експериментальних досліджень та шляхом математичного моделювання встановлено механізм процесів інактивації мікроорганізмів в молоці в камерах проточного типу;
- науково обґрунтовано та експериментально підтверджено динаміку сквашування молока, обробленого імпульсними електричними полями за напруженості електричного поля 30 кВ/см та часу оброблення 30 с;
- встановлено перебіг процесу пастеризації молока під дією імпульсних електричних полів, при якому відсутні в молоці фосфатаза та пероксидаза;
- експериментально встановлено, що оброблення незбираного молока імпульсними електричними полями в діапазоні напруженості 15...30 кВ/см та тривалості 10...30 с приводить до зростання його температури в інтервалі 45...85 °С за рахунок перерозподілу енергії імпульсних електричних полів в теплову. При цьому приріст температури корелюється з напруженістю і тривалістю оброблення.

Практичне значення отриманих результатів. Практичні результати роботи, їх рівень і ступінь використання наступні:

- на основі ймовірно-статистичних моделей визначено раціональні параметри процесу оброблення молока імпульсними електричними полями;
- з урахуванням результатів виконаних наукових досліджень запропоновано нову схему оброблення рідких молочних продуктів з використанням енергії імпульсних електричних полів, яка у поєднанні з тепловим обладнанням для рекуперації тепла забезпечує високоефективне оброблення молока шляхом зменшення тривалості його перебування в зоні критичних температур;
- результати досліджень впроваджені на підприємстві ТЗОВ «Теребовлянський молочний завод» (акт від 18.10.2018 р.), розроблено технічні умови (ТУ У 10.8-02070938-228:2017 «Продукти молоковісні отримані з використанням електромагнітної обробки»), а також впроваджено у навчальний процес Національного університету харчових технологій при вивченні фахових дисциплін та при виконанні курсових та дипломних проєктів (акт від 15.03.2018 р.).

Особистий внесок здобувача. Полягає в аналізі вітчизняної і зарубіжної літератури за темою дисертаційної роботи. Постановка завдань, планування експериментальних досліджень, обговорення висновків дисертаційної роботи проводилися спільно з науковим керівником - завідувачем Проблемної науково-дослідної лабораторії, к.т.н., с.н.с. Мариніним А.І.

Обробка дослідних зразків, підбір режимів оброблення, розшифрування осцилограм та розрахунок енергоефективності проведено спільно з співробітниками НТУ «ХПІ» д.т.н., проф. Бойко М.І. та співробітниками Макогоном А.В., Івановим В.М.

Консультативну допомогу при проведенні досліджень фізико-хімічних, органолептичних показників та динаміки сквашування молока проведено спільно з директором ННІХТ НУХТ к.т.н., доц. Кочубей-Литвиненко О.В. та к.т.н., доц. Кузьмик У.Г.; побудову та опис математичних моделей виконано спільно з к.т.н. Бреус Н.М.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на наукових конференціях молодих вчених, аспірантів і студентів, а саме на Міжнародній науково-практичній конференції «Харчові технології, хлібопродукти і комбікорми» (м. Одеса, 2015-2016 рр.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Продовольчі ресурси: Проблеми й перспективи» (м. Київ, 2016 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Продовольчі ресурси: Проблеми й перспективи» (м. Київ, 2016 р.); V та VI Міжнародних спеціалізованих науково-практичних конференціях «Ресурсо - та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції - основні засади її конкурентоздатності» (м. Київ, 2016-2017 рр.); II міжнародній конференції студентів та аспірантів «Сучасні технології харчових виробництв» (м. Дніпро, 2018 р.); П'ятій міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи розвитку м'ясної, молочної та олієжирової галузей у контексті євроінтеграції», (м. Київ, 2016 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених (м. Чернігів, 2016 р.); VII Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції (м. Кривий Ріг, 2016 р.); 8th Central European Congress on Food (Kyiv, 2016); Науково-практичній конференції «Удосконалення процесів і обладнання — запорука інноваційного розвитку харчової промисловості» (м. Київ, 2016 р.); Міжнародній науково-технічній конференції (м. Київ, 2017 р.); Четвертому студентському конгресі «Захист навколишнього середовища. Збалансоване природокористування» (м. Львів, 2017 р.); 83 та 84 International scientific conference of young scientist and students «Youth scientific achievements to the 21st century nutrition problem solution» (Kyiv, 2017-2018); II міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки» (м. Київ, 2018 р.); VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції» (м. Київ, 2019 р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 32 наукові праці, у тому числі 11 статей у фахових виданнях, 1 публікація у міжнародних виданнях, 20 тез доповідей у збірниках матеріалів всеукраїнських та міжнародних наукових, науково-практичних і науково-технічних конференцій, конгресів та семінарів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційну роботу викладено на 123 сторінках основного тексту. Робота складається зі змісту, переліку умовних позначень, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури (183 найменувань) та 6 додатків. Дисертацію ілюстровано 58 рисунками та 14 таблицями. Загальний обсяг роботи становить 186 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і завдання досліджень, визначено наукову новизну і практичну цінність роботи, наведено відомості про особистий внесок автора, апробацію результатів досліджень, структуру та обсяг роботи.

У **першому розділі** «Аналіз відомих способів оброблення рідких харчових продуктів електрофізичними методами» проведено аналіз способів електрофізичного оброблення рідких харчових продуктів, наведено варіанти установок та камер періодичної та безперервної дії, для нетеплового оброблення рідких продуктів імпульсними електричними полями, описано перспективність запропонованого методу.

На підставі проведеного аналізу літературних джерел, обґрунтовано мету досліджень та відповідно до неї сформульовано основні завдання її досягнення.

У **другому розділі** «Об'єкт, предмет, матеріали, методики та методи досліджень» підібрано методики та методи виконання досліджень, описано будову та принцип дії експериментальної установки. Математичне моделювання базувалось на теорії тепломасообміну, фізичне моделювання процесу оброблення імпульсними електричними полями рідких харчових продуктів проводили на експериментальній установці, розробленій фахівцями Національного технічного університету «Харківський Політехнічний Інститут» (рис. 1). Максимальна робоча напруженість електричного поля - до 100 кВ/см, частота проходження імпульсів до 400 імпл/с.

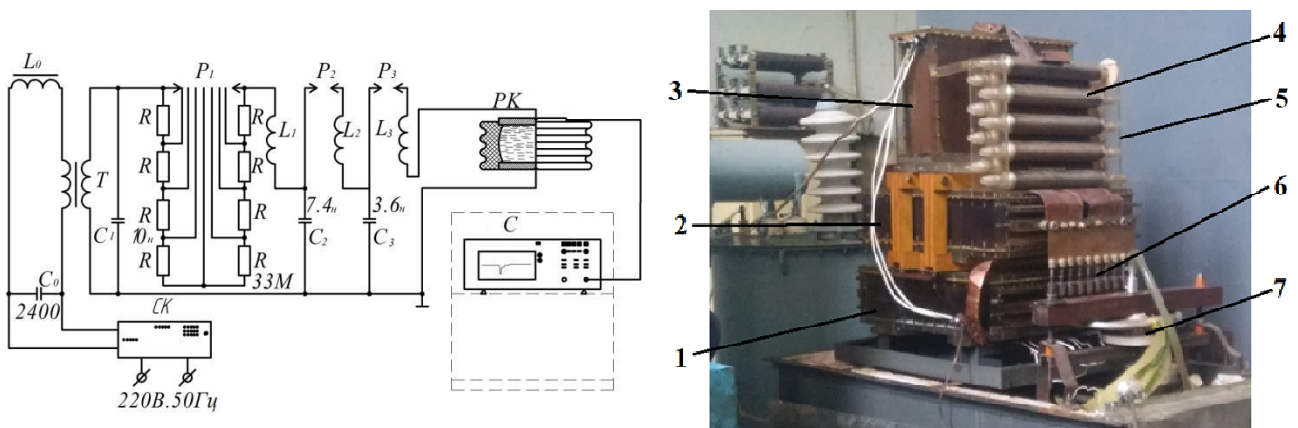


Рис. 1. Експериментальна установка для оброблення імпульсними електромагнітними полями рідких середовищ: 1, 2, 3 – високовольтні конденсатори; 4 – багатозазорний розрядник; 5 – захисний екран; 6 – металеві шпильки; 7 – робоча камера (РК); L_0 – дросель; Т – трансформатор ИОМ-100/100; L_1 - L_3 – паразитні індуктивності; P_1 - P_3 – іскрові розрядники; C_1 - C_3 – ємнісний накопичувач енергії; C_0 – батарея конденсаторів; СК – система керування; С – осцилограф

Робоча камера установки періодичної дії є циліндрична камера з фторопласту з металевими кришками-електродами об'ємом 150 см³, відстань між електродами становила 0,022 м. В камерах проточного типу в кришках

електрода розташовані отвори для перекачування продукту. Методика проведення експерименту була адаптована до рідких молочних продуктів.

Визначення фізико-хімічних та мікробіологічних показників проводились за загальноновживаними сучасними методиками досліджень.

Третій розділ «Математичне моделювання процесу оброблення молоковмісних продуктів імпульсними електричними полями» присвячений моделюванню впливу режимів оброблення імпульсними електричними полями на рідкі молоковмісні продукти.

Визначено витрати енергії, яка виділяється в робочій камері за час оброблення в камерах періодичної дії:

$$E = n T \int i u dt = n T i_{av} u_{av} t, \quad (1)$$

де i – струм як функція часу, А; u – напруга як функція часу, В; i_{av} – середній струм, А; u_{av} – середня напруга, В; t – тривалість одного імпульсу по напіввисоті – відрізок часу, впродовж якого енергія імпульсу виділяється в робочій камері, с; n – частота слідування імпульсів, імп/с; T – час оброблення, с.

На підставі виконаного моделювання процесу виділення енергії в робочій камері при обробленні молока ІЕП, була створена модель, яка дозволяє спрогнозувати виділення енергії при різних режимах при обробленні молока. Приймали припущення, що молоко в робочій камері є винятково резистивним навантаженням. Тривалість імпульсів визначали за осцилограмами.

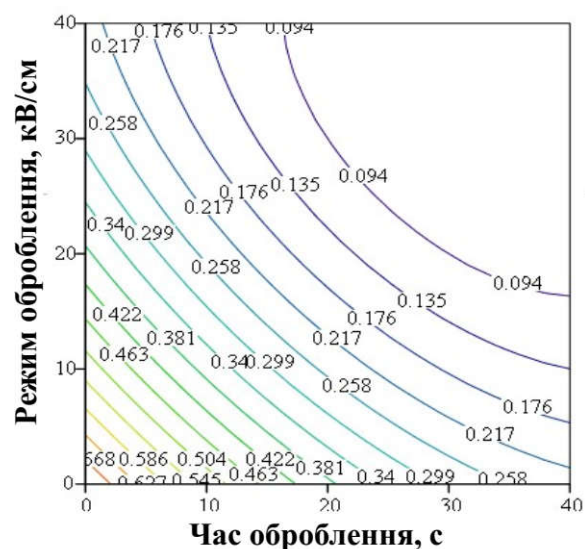
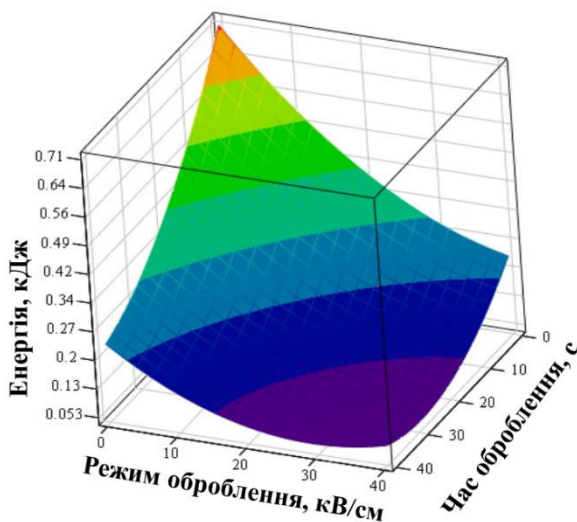


Рис. 2. Енергія що виділяється в робочій камері при обробленні молока ІЕП

Рис. 3. Двовимірний переріз трифакторної моделі процесу виділення енергії при різних режимах та часу оброблення молока

Отриманий результат вказує на те, що практично вся електромагнітна енергія, що надійшла до робочої камери, виділяється в ній у вигляді теплової. Це є принципово важливим фактором, оскільки, як електромагнітні складові (напруженість електричного і магнітного поля, напруга і струм в робочій камері), та тепла енергія є синергетично спрямованими чинниками. Така однонаправлена дія приводить до збільшення ступеня інактивації

мікроорганізмів в оброблених рідких харчових продуктах. Якщо теплова енергія, що виділилася в камері, за допомогою теплообмінника передається в необроблений продукт, який не пройшов ще через робочу камеру, то коефіцієнт корисної дії енергії η_e для цього технологічного процесу становить $\eta_e \approx 85 \dots 99,5 \%$.

За допомогою математичного моделювання процесів дії імпульсних електричних полів в камерах проточного типу встановлено вплив параметрів оброблення молока в установці на властивості отриманого продукту з заданими показниками якості, що дозволяє оцінити основні фізичні закономірності даного процесу.

Згідно з існуючою теорією, пастеризація молока в установках проточного типу є результатом дії інтегрального теплового ефекту незалежно від способу теплопередачі. Математична модель процесу пастеризації в загальному вигляді описується рівнянням:

$$Pa_{\text{паст.}} + Pa_{\text{витр.}} + Pa_{\text{рег.}} \geq 1, \quad (2)$$

де $Pa_{\text{паст.}}$ – критерій Пастера, що вказує на завершення процесу пастеризації в камері пастеризації, $Pa_{\text{витр.}}$ – витримувачі, $Pa_{\text{рег.}}$ – регенераторі.

З урахуванням особливостей впливу імпульсних електричних полів, завдяки яким можна забезпечити рівномірне нагрівання молока в потоці, процес є завершеним при виконанні умови:

$$Pa_{\text{ІЕП}} + Pa_{\text{рег.}} \geq 1, \quad (3)$$

де $Pa_{\text{ІЕП}}$ – критерій Пастера, що вказує на завершення процесу пастеризації в робочій камері при обробці молока ІЕП.

За таких умов пастеризація у витримувачі недоцільна.

Інтегральний ефект дії неоднорідного теплового поля пастеризатора на мікроорганізми лежить у межах від 79°C до $\theta_{\text{кін}}$, що відповідає температурі 84°C виражається:

$$Pa = \int_{79}^{\theta_{\text{кін}}} \frac{\partial t}{z}, \quad (4)$$

де t – час дії теплової енергії, с; z – час дії, достатній для знешкодження мікроорганізмів, с.

Час дії на молоко має відповідати режиму пастеризації, що визначається відомою логарифмічною залежністю та рівнянням:

$$\ln t = \alpha - \beta \theta, \quad (5)$$

де α, β – сталі коефіцієнти, що залежать від мікробіологічних показників продукту; θ – температура пастеризації.

Щоб визначити необхідний час комбінованої дії імпульсних електричних полів та теплової енергії, слід скористатися рівнянням теплового балансу:

$$G \cdot c \cdot \rho \cdot K_{\text{геом.}} \cdot t_e \cdot \partial \theta = U^2 \cdot h_e \cdot \gamma [1 + \psi(\theta_e - \theta_{\text{рег}})] \partial t, \quad (6)$$

де G – продуктивність установки, л/год.; c – середня питома теплоємність молока, Дж/кг °C; ρ – густина молока, кг/м³; $K_{\text{геом.}}$ – геометричний коефіцієнт електродної системи; t_e – час пастеризації під дією ІЕП, с; $\partial\theta$ – зміна температури молока °C в робочій камері нагрівання за час ∂t , с; U^2 – напруга між електродами, В; h_e – відстань між електродами, мм; γ – питома електропровідність молока (при температурі 84 °C), Вт/(м·K); ψ – температурний коефіцієнт електропровідності молока, 1/°C.

$$K_{\text{геом.}} = \frac{I}{(n-1) b}, \quad (7)$$

де I – відстань між електродами; n – кількість електродів; b – ширина електродів.

Якщо процес пастеризації завершено повністю, то підставляючи замість часу t час z , отримаємо: $z = e^{(\alpha-\beta)}$, або $1/z = e^{(\alpha-\beta)}$ Критерій Пастера для секції нагрівання:

$$Pa = \frac{Gc\rho K_{\text{геом.}}}{U^2 h_e \gamma} t_e \int_{\theta_{\text{пер}}}^{\theta_e} \frac{\partial\theta}{[1+\psi(\theta_e - \theta_{\text{пер}})] e^{(\alpha-\beta\theta)}}, \quad (8)$$

Відповідно, час пастеризації визначається:

$$t_e = \frac{U^2 h_e \gamma}{Gc\rho K_{\text{геом.}} \int_{\theta_{\text{пер}}}^{\theta_e} \frac{\partial\theta}{[1+\psi(\theta_e - \theta_{\text{пер}})] e^{(\alpha-\beta\theta)}}}. \quad (9)$$

Зробивши аналогічні перетворення і проінтегрувавши вираз методом Сімпсона, отримаємо залежність для обчислення часу пастеризації молока в ІЕП в робочій камері:

$$t_e = \frac{H}{G\rho c [I(x)]_{\theta_{\text{пер}}}^{\theta_e}}. \quad (10)$$

де H – взаємна площа теплообміну, м²; $[I(x)]_{\theta_{\text{пер}}}^{\theta_e}$ – чисельне значення інтегралу, 1/с; t_e – час перебування молока в апараті, що потрібний для зміни температури від $\theta_{\text{пер}}$ до θ_e с.

Таким чином, отримані залежності дозволяють визначити час пастеризації при нагріванні молока ІЕП з урахуванням його характеристик та параметрів робочої камери.

Важливим показником є також питома енерговитрати E_{sp} , тобто кількість витраченої енергії на оброблення одиниці об'єму або маси продукту. При обробці в камерах проточного типу з теплообмінником, який використовується для попереднього підігріву рідини, введена в робочу камеру електромагнітна енергія E_{flow} , переходить в теплову. При цьому забезпечується нагрів Δt_{flow} продукту в проточному режимі, поки він проходить через робочу камеру, на декілька градусів, та відбувається перехід від докритичної температури до надкритичної температури продукту, яка гарантує інактивацію мікроорганізмів при дії імпульсного електричного поля.

Електромагнітна енергія E_{flow} введена в робочу камеру та питомі енерговитрати E_{sp} визначаються як:

$$E_{flow} \approx c V \gamma \Delta t_{flow}; \quad (11)$$

$$E_{sp} = E_{flow}/V = c \gamma \Delta t_{flow}. \quad (12)$$

На основі розрахункових даних встановлено, що величина питомих енерговитрат в проточному режимі при обробці молока складає $E_{sp}=5,83$ кВт·год./м³.

Для моделювання процесу інактивації мікроорганізмів у молоці під дією імпульсних електричних полів в камерах проточного типу була розроблена програма в середовищі Mathcad, за допомогою якої отримана графічна модель процесу оброблення молока при змінній напруженості ІЕП від часу оброблення (рис. 4).

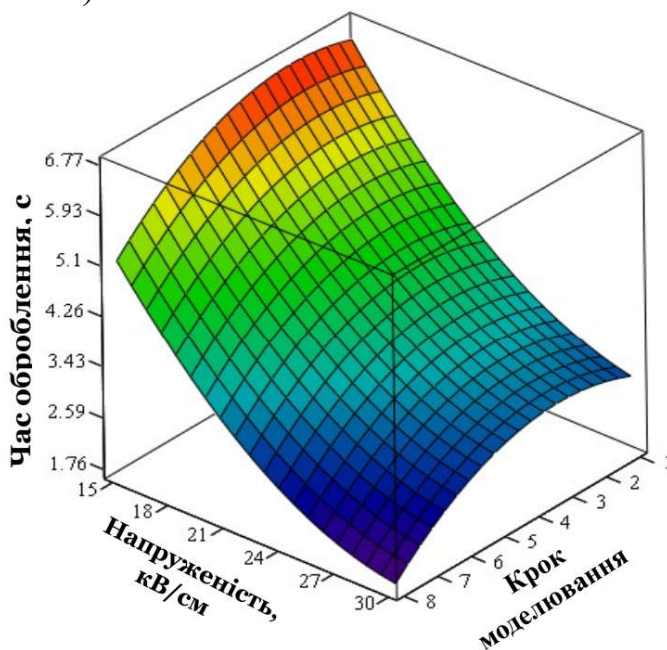


Рис. 4. Графічна модель процесу інактивації мікроорганізмів в молоці під дією ІЕП

Отримані результати вказують на те, що при напруженості електричного поля 15 кВ/см процес інактивації мікроорганізмів в молоці буде завершеним через 7 с, при напрузі 20 кВ/см - через 5 с, при напрузі 25 кВ/см - через 3 с, напрузі 30 кВ/см - через 2 с. При використанні режиму 30 кВ середня швидкість зростання температури в продукті, що при перетіканні його в робочу камеру складає 2,7 °С/с. Дана модель дозволяє проводити моделювання в зоні зміни незалежних змінних, де можна варіювати значення при різних кроках. Подальше збільшення

часу оброблення є недоцільним через значне підвищення температури. Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок про те, що для значного зменшення енерговитрат процесу, рекомендується використовувати теплообмінник для попереднього підігріву молока до температури на 5 °С нижче критичної температури, шляхом рекуперації в ньому тепла.

Четвертий розділ «Дослідження впливу імпульсних електричних полів на органолептичні, фізико-хімічні та мікробіологічні показники рідких харчових продуктів» присвячений дослідженню органолептичних, фізико-хімічних та мікробіологічних показників води, молока, молочної сироватки, оброблених імпульсними електричними полями.

При обробленні ІЕП молока в діапазоні напруженостей поля 15...30 кВ/см його температура лежить в області температур термізації і пастеризації (рис. 5).

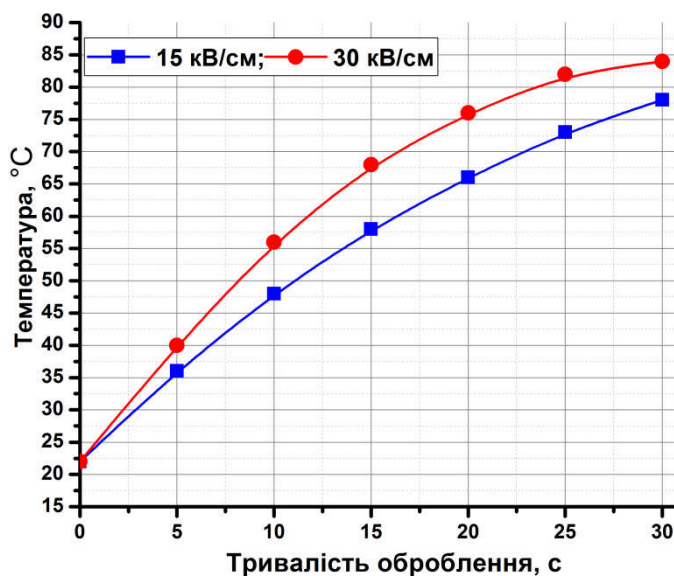


Рис. 5. Вплив напруженості ЕП і тривалості оброблення на температуру незбираного молока

електричного поля 30 кВ/см і експозиції 30 с, пов'язано, ймовірно, із видаленням летких компонентів (кисню, вуглекислоти) та зростанням температури молока.

При цьому приріст температури корелювався з напруженістю і тривалістю оброблення.

Аналіз отриманих результатів при обробленні ІЕП в порівняно із необробленим молоком (табл. 1), вказує на те, що суттєвих змін складу і основних фізико-хімічних показників молока не відбувалось за усіх режимів оброблення, а різниця в отриманих величинах дослідних показників знаходилась в межах похибки.

Незначне підвищення активної кислотності в зразках, оброблених за напруженості

Таблиця 1

Фізико-хімічні показники незбираного молока до та після оброблення ІЕП за різних режимів

Показник	Незбиране молоко	Режим оброблення					
		15 кВ/см			30 кВ/см		
		$\tau \approx 10$ с	$\tau \approx 20$ с	$\tau \approx 30$ с	$\tau \approx 10$ с	$\tau \approx 20$ с	$\tau \approx 30$ с
Масова частка %:							
Жир	3,68	3,67	3,56	3,66	3,65	3,70	3,69
СЗМЗ	8,01	7,93	7,95	7,98	8,01	7,98	8,06
Білок	2,91	2,90	2,88	2,87	2,84	2,88	2,92
Лактоза	4,49	4,42	4,37	4,39	4,43	4,42	4,53
Густина, кг/м ³	1028,0	1027,7	1027,5	1028,5	1028,6	1027,9	1028,2
Температура замерзання, °C	-0,531	-0,526	-0,524	-0,523	-0,528	-0,524	-0,534
pH	6,692	6,691	6,684	6,694	6,672	6,674	6,669
Термостійкість за алкогольною пробою, група	IV	IV	IV	IV	IV	IV	III
Ефективність пастеризації за фосфатазою	+	+	+	-	+	-	-
Ефективність пастеризації за пероксидазою	+	+	+	+	+	+	-

Позитивним наслідком дії ІЕП за раціональних параметрах напруженості (30 кВ/см) та тривалості оброблення ($\tau=30$ с) є підвищення термостійкості незбираного молока на 1 групу за алкогольною пробою.

Слід зазначити, що при проведенні проби на ефективність термічного оброблення в зразках незбираного молока після дії ІЕП за напруженості 15 кВ/см протягом 30 с і напруженості 30 кВ/см протягом 20...30 с виявлено відсутність фосфатази та пероксидази. Цей факт дає підстави стверджувати, що за ІЕП-обробкою досягається ефект пастеризації. Підтвердженням даного припущення є результати наростання кислотності в дослідних зразках протягом зберігання. Контрольним зразком вибрано коров'яче молоко, охолоджене до температури $(6 \pm 2)^\circ\text{C}$. Зразки зберігали протягом 72 годин за температури $(6 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Встановлено, що в зразках молока, обробленого за напруженості 15 кВ/см впродовж 30 с і за напруженості 30 кВ/см впродовж 20...30 с характер наростання титрованої кислотності був подібним.

Дія ІЕП на вітамін С показала найбільше зниження при обробленні 30 кВ/см протягом 30 с (0,34 млн./100 г). Найменшого впливу вміст вітаміну С зазнав при 15 кВ/см протягом 10 с (0,90 млн./100 г).

Вплив ІЕП на життєздатність культур *Staphylococcus aureus* та *Escherichia coli* в модельних розчинах молока, сироватки та води показують, що із збільшенням напруги та тривалості оброблення відбувається істотне зниження кількості мікроорганізмів в усіх зразках. Найбільш інтенсивний вплив ІЕП на зразки спостерігається під час оброблення протягом 30 с з напруженістю 30 кВ/см³, про що свідчить відсутність патогенних мікроорганізмів. Дослідження проводились спільно з комунальним підприємством «Санепідсервіс» м. Харків.

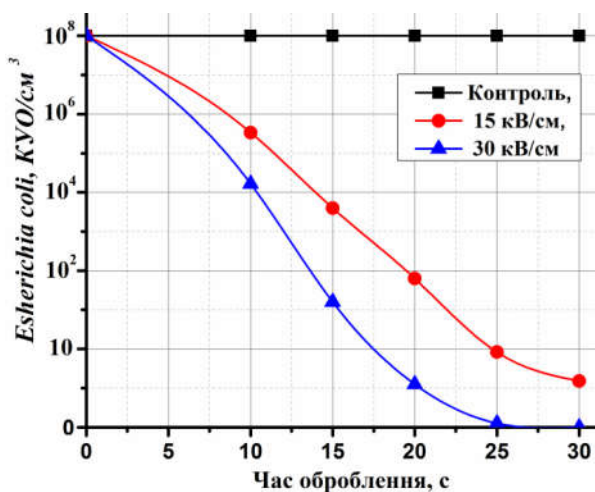


Рис. 6. Вплив ІЕП на культуру *E. coli* в модельному розчині молока з розведенням 10^8 КУО/см³

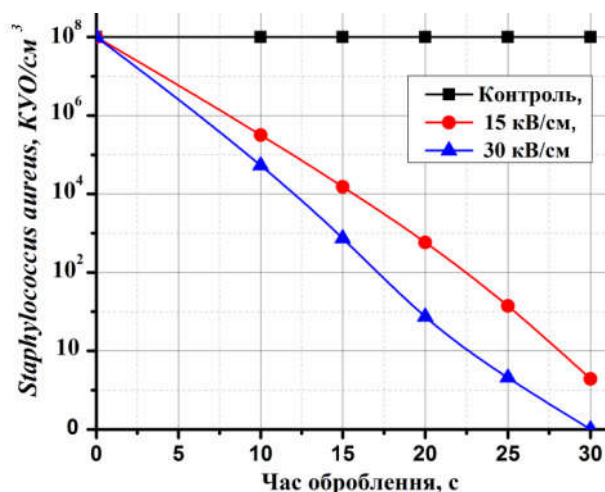


Рис. 7. Вплив ІЕП на культуру *Staphylococcus aureus* в молоці з розведенням 10^8 КУО/см³

Ефект інактивації досягається за рахунок синергізму дії факторів ІЕП оброблення: напруженості електричного поля, напруги, струму (провідності і зміщення), швидкого наростання температури до максимальних значень, менших, ніж при тепловій пастеризації.

Встановлено, що при зберіганні молока, обробленого традиційними методами, та за допомогою ІЕП (рис. 8) на 8 добу пастеризоване традиційним методом молоко перевищило допустиму похибку титрованої кислотності, яка продовжувала зростати; молоко, оброблене ІЕП, лише на 11 добу досягло критичного значення титрованої кислотності.

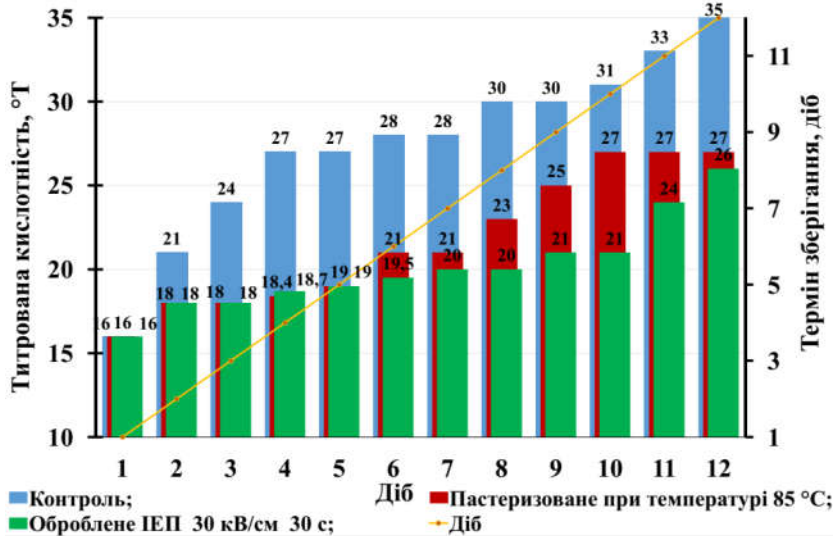


Рис. 8. Залежність терміну зберігання обробленого ІЕП молока порівняно з пастеризованим при температурі 85°C

нормалізованого молока, попередньо оброблених ЕІП, була дещо вищою за контроль, що пояснюється відсутністю впливу на нативні властивості молока, структуру білка, сольовий баланс. В усіх дослідних зразках через 6 годин ферментування утворювався щільний кисломолочний згусток.

Підтверджено, молоко оброблене ІЕП та традиційним методом, не відрізняється за фізико-хімічними показниками. Дослідження впливу ІЕП на динаміку сквашування йогурту, отриманого з обробленого молока (рис. 9, 10) показали, що динаміка наростання активної кислотності в досліджуваних зразках мала подібну тенденцію. Швидкість наростання кислотності в зразках

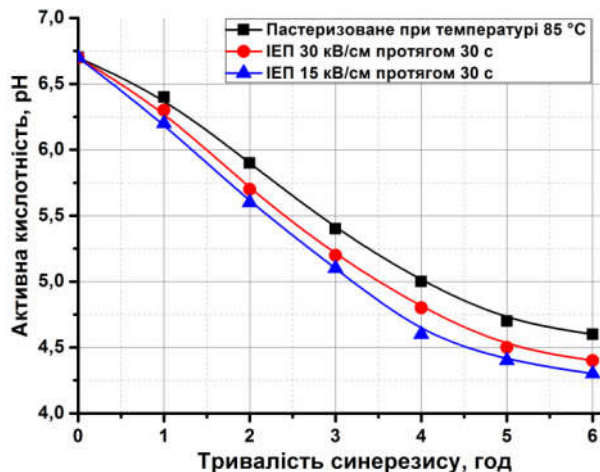


Рис. 9. Динаміка ферментування дослідних зразків молока в оброблених зразках порівняно з традиційною технологією

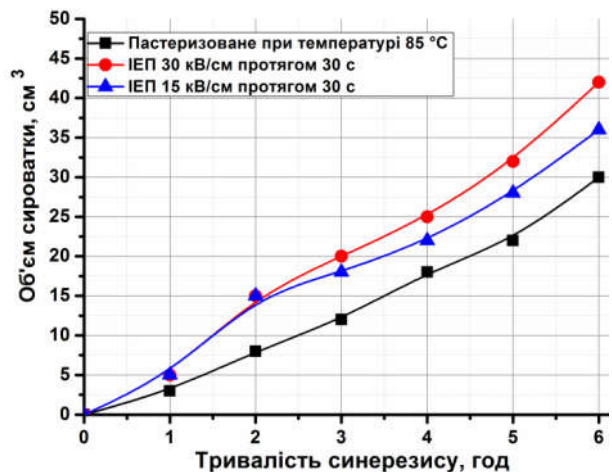


Рис. 10. Тривалість синерезису в оброблених зразках

Встановлено, що оброблення ІЕП не впливає негативно на динаміку сквашування йогурту, оскільки процес молочнокислого бродіння не сповільнюється.

На основі отриманих експериментальних даних було визначено функції відгуку фізико-хімічних показників незбираного молока до та після оброблення ІЕП з використанням методології поверхні відгуку (рис. 11), яка є сукупністю математичних і статистичних прийомів, спрямованих на моделювання процесів та знаходження комбінацій експериментальних рядів предикторів.

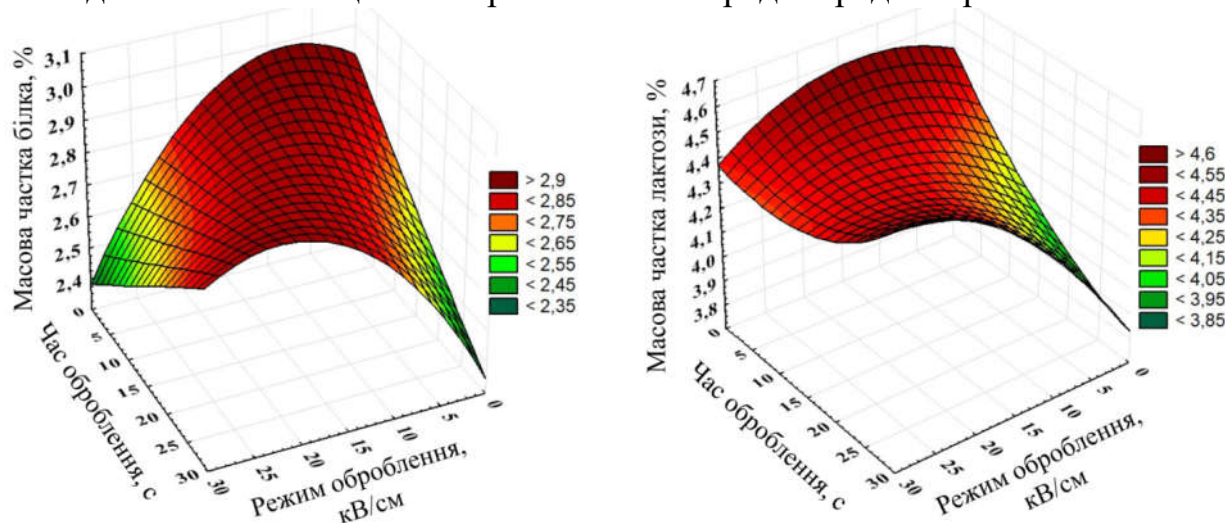


Рис. 11. Графічна модель залежності масової частки білка, лактози, від режиму та тривалості оброблення ІЕП

Рівняння регресії (7) кількісно описує масову частку білку до та після оброблення ІЕП за різних режимів, рівняння (8) – масову частку лактози:

$$Y_3 = 2,91 - 0,0068x_1 + 0,004x_1^2 - 0,0003x_2 - 0,018x_2^2 - 0,0004x_1x_2$$

$$f_3(x, y): 2,91 + 0,00494x - 0,00028x^2 - 0,008y + 0,00003y^2 + 0,00037xy; \quad (7)$$

$$Y_4 = 4,49 + 0,193x_1 - 0,0041x_1^2 - 0,031x_2 + 0,078x_2^2 + 0,0009x_1x_2$$

$$f_4(x, y) := 4,49 + 0,1335x - 0,00257x^2 - 0,227y + 0,00547y^2 + 0,00043xy. \quad (8)$$

Результати експериментальних досліджень по вивченню впливу ІЕП на основні мікробіологічні показники обробленого молока показують тенденцію до їх зменшення зі збільшенням тривалості оброблення та напруженості електричного поля (рис. 12-13).

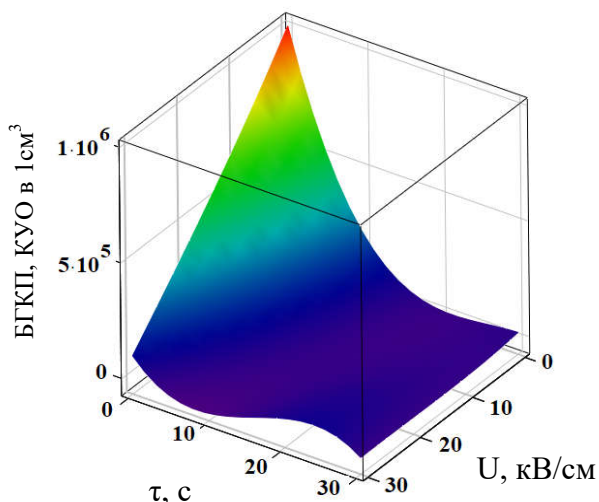


Рис. 12. Графічна модель залежності впливу параметрів ІЕП на кількість БГКП

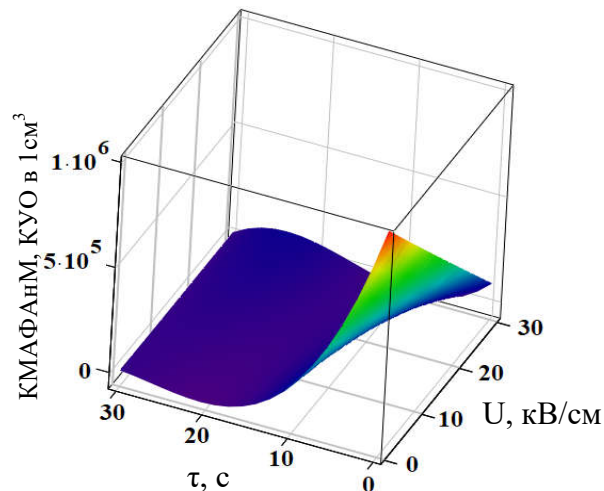


Рис. 13. Графічна модель залежності впливу параметрів ІЕП на кількість КМАФАнМ

У п'ятому розділі «Реалізація результатів досліджень» представлені рекомендації щодо практичної реалізації результатів наукових досліджень.

Розроблено машинно-апаратну схему (рис. 14), яка передбачає встановлення в технологічну лінію теплового оброблення молока установки для оброблення імпульсними електричними полями.

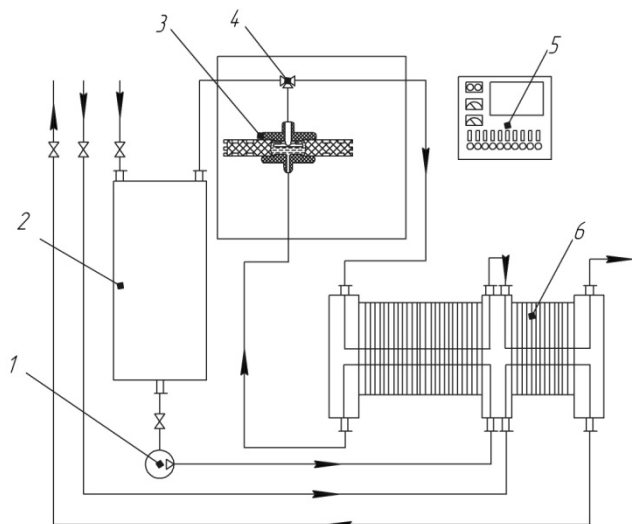


Рис. 14. Машинно-апаратна схема комплексу пастеризації молока з використанням установки оброблення ІЕП: 1 – насос; 2 – зрівноважувальний бачок; 3 – робоча камера; 4 – перепускнув клапан; 5 – блок керування; 6 – теплообмінник

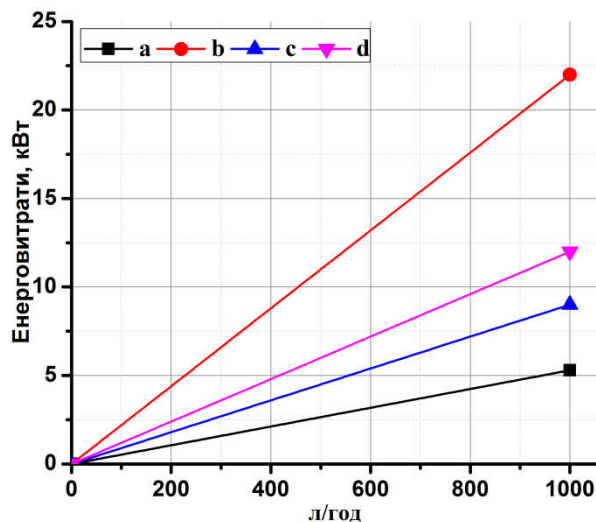


Рис. 15. Питомі енерговитрати пастеризації молока в потоці при різному тепловому обладнанні:

a – оброблення ІЕП,
b – пастеризатор ОКЛ-1-4,
c – пастеризатор ПТ-1000,
d – пастеризатор ПМР-0,2-1

Розроблено нормативну документацію на виробництво продуктів молоковісних, отриманих з використанням електромагнітного оброблення (ТУ У 10.8-02070938-228:2017 «Продукти молоковісні отримані з використанням електромагнітної обробки»), яка забезпечує подовження термінів зберігання оброблених продуктів без зниження їхніх якісних показників, та зменшення питомих енергетичних затрат.

Дана технологія передбачає попередній підігрів молока в магістралях теплообмінника 6 шляхом перекачування його через робочу камеру 3. Після досягнення критичної температури молока в теплообміннику в нього подається необроблене молоко, яке спочатку нагрівається в теплообміннику, а далі пастеризується в робочій камері 3 завдяки енергії імпульсних електричних полів. Оброблюване молоко лише один раз проходить через робочу камеру. На основі отриманих експериментальних даних було зроблено порівняльну оцінку питомих енергозатрат пастеризації молока в потоці при різному тепловому обладнанні (рис. 15).

Показано, що впровадження цієї технології на молокопереробному підприємстві ТзОВ «Теребовлянський молочний завод» (акт від 18.10.2018 р.) дозволило подовжити термін зберігання молока до 10 діб та зменшити енерговитрати при його обробленні до 6 кВт/год при переробці 1000 л/год.

Отримані результати науково-дослідної роботи впроваджено у навчальний процес Національного університету харчових технологій на кафедрі ТОКТП при проведенні лабораторних, практичних та лекційних занять, при виконанні курсових та дипломних проєктів здобувачів вищої освіти (акт від 15.03.2018 р.)

Зроблено порівняльну оцінку енерговитрат при пастеризації молока в потоці з використанням теплообмінників різного типу, показано зменшення питомих енерговитрат при ІЕП молока у 4 рази порівняно з традиційними.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вперше запропоновано рішення науково-технічної задачі використання енергії імпульсних електричних полів та обґрунтовано параметри процесу оброблення рідких молочних продуктів імпульсними електричними полями.

Отримані результати дають можливість зробити такі висновки:

1. На основі аналізу основних електрофізичних методів оброблення рідких продуктів встановлено, що оброблення імпульсними електричними полями є найбільш енергоефективним методом для інтенсифікації масообмінних процесів та подовження терміну зберігання продуктів.

2. Доведено, що оброблення ІЕП молока в камері закритого типу протягом 10 с нагрівається на 56 °С за рахунок енергії, що виділяється в камері 56 кДж, та середній споживаній енергії 3,8 кВт. Оцінено основні фактори, що впливають на процес інактивації мікроорганізмів.

3. Розроблено математичну модель процесів інактивації мікроорганізмів в молоці. Встановлено, що оброблення ІЕП молока при напруженості 15 кВ/см приводить до незворотної інактивації мікроорганізмів при тривалості оброблення 7 с, при напрузі 20 кВ/см – 5 с, при напрузі 25 кВ/см – 3 с, при напрузі 30 кВ/см – 2 с.

4. Розроблено математичний опис процесів дії імпульсних електричних полів в камері проточного типу з максимальною енергоефективністю. Встановлено величину раціональних питомих енерговитрат у проточному режимі при обробці, що складає $E_{sp}=5,83 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$, що майже в 4 рази менше від енерговитрат при тепловій пастеризації.

5. Експериментально доведено відсутність негативного впливу ІЕП на фізико-хімічні та мікробіологічні показники молока, в межах раціональних параметрів процесу оброблення.

6. Для забезпечення оброблення незбираного молока, молочної сироватки та води з раціональними параметрами, визначено режими електроімпульсного оброблення.

7. Зроблено аналітичний опис зміни фізико-хімічних показників незбираного молока до та після оброблення ІЕП за різних параметрів, підтверджений отриманими експериментальними даними.

8. Розроблена апаратурно-технологічна схема оброблення молока ІЕП. Результати виконання наукових досліджень впроваджено у виробництво на молокопереробному підприємстві ТзОВ «Теребовлянський молочний завод» (акт від 18.10.2018 р.), а також розроблено технічні умови (ТУ У 10.8-02070938-

228:2017 «Продукти молоковмісні отримані з використанням електромагнітної обробки»). Також результати досліджень упроваджено у навчальний процес Національного університету харчових технологій при вивченні фахових дисциплін, при виконанні курсових та дипломних проєктів (акт від 15.03.2018 р.).

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у міжнародних виданнях

1. R. Svyatnenko, A. Marynin, and D. Shtepa, «Milk processing using pulsed electric fields», *Chemical technologies & Biotechnologies and food technologies proceedings*, Vol. 57, Book 10.3, Ruse, p. 64-66, 2018.

Особистий внесок: підготовка зразків, проведення досліджень, узагальнення отриманих даних в результаті дослідження та підготовка матеріалів до друку.

Статті у періодичних фахових виданнях

2. Р.С. Святненко, О.В. Кочубей-Литвиненко, та А.І. Маринін, «Вплив імпульсних електричних полів на склад і властивості незбираного молока», *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, т. 22, № 4, с. 241-247, 2016.

Особистий внесок: підготовка дослідних зразків, проведення органолептичних та фізико-хімічних досліджень, аналіз результатів, підготовка матеріалу до друку.

3. Р.С. Святненко, А.І. Маринін, та О.В. Кочубей-Литвиненко, «Вивчення впливу електрофізичних методів обробки на мікробіологічні показники харчових продуктів», *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, т. 1, №96, с. 125-130, 2017.

4. Р.С. Святненко, А.І. Маринін, А.І. Українець, та О.В. Кочубей-Литвиненко, «Вплив імпульсного електромагнітного поля на життєздатність культури *Escherichia coli* в модельному розчині води», *Техніка та енергетика Machinery & Energetics*, №252, с. 185-191, 2016.

5. Р.С. Святненко, А.І. Маринін, О.В. Кочубей-Литвиненко, та В.Б. Захаревич, «Вплив імпульсного електромагнітного поля на життєздатність культури *Escherichia coli* в модельному розчині молочної сироватки», *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького. Серія: Харчові технології*, т. 18, №2 (68), с. 92-94, 2016.

6. А.І. Українець, А.І. Маринін, Р.С. Святненко, О.В. Кочубей-Литвиненко, та М.І. Бойко, «Дослідження впливу електромагнітної обробки на мікроорганізми молочної сироватки», *Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка, «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв»*, №179, с.148-151, 2016.

Особистий внесок по пп. 3-6: підготовка дослідних зразків, проведення мікробіологічних досліджень, аналіз результатів, підготовка матеріалу до друку.

7. Р.С. Святненко, А.І. Маринін, О.В. Кочубей-Литвиненко, та М.І. Бойко, «Дослідження впливу імпульсних електромагнітних полів на органолептичні показники незбираного молока», *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького. Серія: Харчові технології*, т. 19, №75, с. 157-160, 2017.

Особистий внесок: підготовка дослідних зразків, проведення органолептичних та фізико-хімічних досліджень, аналіз результатів, підготовка матеріалу до друку.

8. Р.С. Святненко, А.І. Маринін, А.В. Макогон, О.П. Фурсік, «Вплив імпульсних електричних полів на мікробіологічні показники та вміст вітаміну С в незбираному молоці», *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького. Серія: Харчові технології*, т. 19, №80, с. 29-32, 2017.

Особистий внесок: участь у підготовці та проведенні експериментів, обговорення результатів.

9. Р.С. Святненко, А.І. Українець, А.І. Маринін, О.В. Кочубей-Литвиненко, та М.І. Бойко, «Вплив імпульсних електричних полів на амінокислотний склад незбираного молока», *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, т. 24, №1, с. 119-126, 2018.

Особистий внесок: участь у проведенні експериментів, підготовка матеріалів до друку.

10. Р.С. Святненко, А.І. Маринін, О.В. Кочубей-Литвиненко, та О.П. Фурсік, «Дослідження обробки незбираного молока імпульсними електричними полями», *Техніка та енергетика Machinery & Energetics*, №268, с. 118-124, 2018.

Особистий внесок: проведення експериментів, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків та підготовка до публікації.

11. А.І. Українець, Ю.В. Большак, А.І. Маринін, В.Я. Каганов., та Р.С. Святненко, «Вода, між довкіллям і життям», *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, т. 26, №5, с. 7-16, 2020.

Особистий внесок: аналіз наукових публікацій, розроблення методики досліджень, проведення експериментів, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків та підготовка до публікації.

12. А.І. Маринін, Ю.В. Большак, Р.С. Святненко, та Д.В. Штепа, «Дослідження особливостей фізико-хімічних показників води, обробленої безреагентним електрохімічним методом», *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, т. №2(4), с. 103-109, 2020.

Особистий внесок: участь у проведенні експериментів, підготовка матеріалів до публікації.

Тези доповідей

13. А.І. Українець, А.І. Маринін, Р.С. Святненко, та В.Б. Захаревич, «Нетеплові методи в процесах харчових виробництв», на *Міжнар. наук. - практ. конф. Харчові технології, хлібопродукти і комбікорми*, Одеса, 2015, с. 157.

14. А.І. Українець, А.І. Маринін, Ю.О. Дашковський, Р.С. Святненко, та О.В. Кочубей-Литвиненко, «Нетеплові технології в харчовій промисловості», на *IV Міжнар. наук.-практ. конф. Продовольчі ресурси. Проблеми й перспективи*, Київ, 2016, с. 19.

15. А.І. Ukrainets, A.I. Marinin, R.C. Svyatnenko, V. M. Pasichniy, and O.V. Kochubey-Litvinenko, «Non-thermal methods for whole milk treatment», на *Міжнар. наук.-практ. конф. Перспективи розвитку м'ясної, молочної та олієжирової галузей у контексті євроінтеграції*, Київ, 2016, с. 200.

16. Р.С. Святненко, «Обробка незбираного молока імпульсними електромагнітними полями», на *Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених*, Чернігів, 2016, с. 314.

Особистий внесок по пп. 13-16: проведення експериментів, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків.

17. А.І. Українець, А.І. Маринін, О.В. Кочубей-Литвиненко, Р.С. Святненко, та В.Б. Захаревич, «Вплив імпульсного електромагнітного поля на життєздатність культури *Escherichia coli* в модельному розчині молочної сироватки», на *Міжнар. наук.-практ. конф. Харчові технології, хлібопродукти і комбікорми*, Одеса, 2016, с. 133.

18. Р.С. Святненко, А.І. Маринін, «Дослідження впливу імпульсних електричних полів на зміну фосфатази незбираного коров'ячого молока», на *VII Міжнар. наук.-практ., інтернет-конф. Харчові добавки харчування здорової та хворої людини*, Кривий Ріг, Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2016, с. 188.

19. R. Svyatnenko, O. Kochubey-Litvinenko, A. Ukrainets, and A. Marynin, «Pulsed electric field impact on composition and properties of whole milk», in *8th Central European Congress on Food 2016 - Food Science for Well-being (CEFood 2016)*, Kyiv, 2016, p. 23-26.

Особистий внесок по пп. 17-19: проведення експериментів, узагальнення отриманих результатів, формулювання висновків та підготовка до публікації.

20. R. Svyatnenko, A. Marinin, V. Pasichnyi, and O. Kochubey-Litvinenko, «The study of elektrophysical processing impact on the amino-acid composition of whole milk», на *Міжнар. наук.-техн. конф. Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції*, Київ, НУХТ, 2017, с. 156.

21. Р.С. Святненко, та А.І. Маринін, «Дослідження впливу імпульсного електромагнітного поля на *staphylococcus aureus* в воді», на *VI Міжнар. спец. наук. – практ. конф. Ресурсо-та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції - основні засади її конкурентоздатності*, Київ, 2017, с. 170.

22. Р.С. Святненко, та А.І. Маринін, «Знезаражування води електромагнітними полями», *Четвертий студентський конгрес. Захист навколишнього середовища. Збалансоване природокористування*, Львів, 2017, с. 103.

Особистий внесок по пп. 20-22: участь у проведенні експериментів, підготовка матеріалів до друку.

23. Р.С. Святненко, А.І. Маринин, та А.І. Шевченко, «Оптимизация процесса повышения микробиологической стабильности цельного молока», на *III Междунар. науч.-практ. конф. Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции*, Минск, 2017, с. 400.

24. А.І. Українець, А.І. Маринін, О.В. Кочубей-Литвиненко, та Р.С. Святненко, «Очистка воды электрофизическими методами», на *Міжнар. наук. – практ. конф. Удосконалення процесів і обладнання - запорука інноваційного розвитку харчової промисловості*, Київ, 2016, с. 120.

25. R. Svyatnenko, A. Marinin, and O. Kochubey-Litvinenko, «Research of influence of electromagnetic processing on organoleptic properties of whole milk», in *83 Intern. scient. conf. of young scientist and students Youth scientific achievements to the 21st century nutrition problem solution*, Kyiv, 2017, pp. 2.

Особистий внесок по пп. 23-25: участь у проведенні експериментів, підготовка матеріалів до публікації.

26. R. Svyatnenko, and A. Marynin «Treatment of milk by electrophysical methods», *XIX Intern. scient. conf. Theory and practice in world science Proceedings* - Morrisville, Lulu Press, 2018, pp. 126.

27. Р.С. Святненко та А.І. Маринін, «Обработка воды электрофизическими методами», на *II міжнар. наук.-практ. конф. Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водо підготовки*, Київ, 2018, с. 215.

28. Р.С. Святненко, А.І. Маринін, та Д.В. Штепа, «Застосування електрофизичних методів для очистки води», на *Студ. конф. Дні студентської науки у Львівському національному університеті ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького*, Львів, 2018, ч. 2, с. 210-211.

Особистий внесок по пп. 26-28: участь у підготовці та проведенні експериментів, обговорення результатів.

29. R. Svyatnenko, A. Marynin, and O. Kochubey-Litvinenko «Influence of strong pulsed electric fields on vitamins in milk», *84 Intern. scient. conf. of young scientist and students Youth scientific achievements to the 21st century nutrition problem solution*, Kyiv, 2018, pp. 333.

30. Р.С. Святненко, А.І. Маринін, та О.В. Кочубей-Литвиненко, «Застосування Імпульсних електричних полів для обробки незбираного молока», на *II Міжнар. наук.-техн. конф. Сучасні технології харчових виробництв*, Дніпро, 2018, с. 53.

Особистий внесок по пп. 29-30: участь у підготовці та проведенні експериментів, обговорення результатів.

31. А.І. Маринін, та Р.С. Святненко, «Застосування імпульсного електричного поля для очистки води», на *VIII Міжнар. наук.-техн. конф. Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції*, Київ, 2019, с. 173.

Особистий внесок: підготовка дослідних зразків, проведення органолептичних та фізико-хімічних досліджень, аналіз результатів, підготовка матеріалу до друку.

32. Ю.В. Большак, А.І. Маринін, Д.В. Штепа, та Р.С. Святненко, «Оброблення питної води безреагентним електрохімічним методом», на Міжнарод. наук.-практ. конф. Інноваційні технології та перспективи розвитку м'ясопереробної галузі, Київ, 2020, с. 57.

Особистий внесок: підготовка дослідних зразків, проведення мікробіологічних досліджень, аналіз результатів, підготовка матеріалу до друку.

АНОТАЦІЯ

Святненко Р.С. Обґрунтування параметрів процесу оброблення рідких та молочних продуктів імпульсними електричними полями. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Національний університет харчових технологій, Київ, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної проблеми молочної галузі використання енергії імпульсних електричних полів для подовження терміну зберігання молочних продуктів з обґрунтуванням параметрів процесу.

На основі математичного моделювання процесів обробки молока імпульсними електричними полями була розроблена модель процесу виділення енергії в робочій камері, встановлено механізм процесів інактивації мікроорганізмів в молоці в камерах проточного типу. Встановлено відсутність негативних наслідків на фізико-хімічні показники молока після оброблення ІЕП.

Запропоновано енергоощадну технологію оброблення рідких молочних продуктів з використанням енергії імпульсних магнітних полів, яка у поєднанні з тепловим обладнанням для рекуперації тепла забезпечує високоефективне оброблення молока шляхом зменшення тривалості його перебування в зоні критичних температур. Результати досліджень впроваджені у виробництво на підприємстві молочної галузі, та у навчальний процес Національного університету харчових технологій.

Ключові слова: процеси оброблення молока, пастеризація молока, імпульсні електричні поля, інактивація мікроорганізмів.

ABSTRACT

Svyatnenko R. Substantiation of the parameters of the process of processing liquid and dairy products by pulsed electric fields. – Manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.18.12 – processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical industries. – National University of Food Technologies, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the solving an actual problem of dairy branch of use of energy of pulsed electric fields for prolongation of expiration date of liquid dairy products with the substantiation of process parameters, for introduction of resource and energy saving technologies of intensification of industrial processes of food and biological value improvement.

It was established that pulsed electric field treatment is the most energy efficient method for intensification of mass transfer processes and extension of the expiration date based on the analysis of the main electrophysical methods of liquid products processing.

It was proved that the processing of milk by PEF in a closed chamber during 10 s heats it by 56°C, with the energy released in the chamber 56 kJ and the average energy consumption – 3.8 kW. It was experimentally established that the processing of whole milk by pulsed electric fields in the range of intensity 15... 30 kV/cm and duration 10 ... 30 s led to an increase in its temperature in the range of 45 ... 85°C due to redistribution of energy of pulsed electric fields into thermal energy. The increase in temperature correlates with the intensity and duration of processing.

A mathematical model was developed for modeling the processes of inactivation of microorganisms in milk. It was established that the processing of milk by PEF at a voltage of 15 kV/cm led to irreversible inactivation of microorganisms at a processing time – 7 s, at a voltage of 20 kV/cm – 5 s, at a voltage of 25 kV/cm – 3 s, a voltage of 30 kV/cm – 2 s.

A mathematical description of the processes of action of pulsed electric fields in a flow-type chamber with maximum energy efficiency was developed. The value of rational specific energy consumption in the flow mode during processing was set, which is $E_{sp} = 5.83 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3$, which is almost 4 times less than energy consumption during thermal pasteurization.

The obtained result indicates that almost all the electromagnetic energy which reached the working chamber is released in it in the form of thermal energy. This is a fundamentally important factor, because both the electromagnetic components (electric and magnetic field strength, voltage and current in the working chamber) and thermal energy are synergistically directed factors. This unidirectional action leads to an increase in the degree of inactivation of microorganisms in processed liquid products. If the thermal energy released in the chamber is transferred by the heat exchanger to the untreated product that has not yet passed through the working chamber, the efficiency of energy η_e for this process is $\eta_e \approx 85 \dots 99.5\%$.

The absence of a negative effect of PEF on the physicochemical and microbiological parameters of milk, within the rational parameters of the processing, was experimentally proved.

The parameters of electropulse processing were determined to ensure processing of whole milk, whey and water with rational parameters.

An analytical description of the change in physicochemical parameters of whole milk before and after processing by PEF for different processing parameters was made, which was confirmed by the obtained experimental data.

Taking into account the results of scientific research, a new hardware-technological scheme of processing of liquid dairy products by PEF using pulsed magnetic field energy was developed, which in combination with thermal equipment for heat recovery provides highly efficient processing by reducing milk residence time at critical temperatures. The results of scientific research were introduced into production at the dairy plant LLC "Terebovlya Dairy Plant", technological requirements (TU U 10.8-02070938-228: 2017 "Milk-containing products obtained

using electromagnetic processing") were developed, they were also introduced to the educational process of the National University of Food Technologies when teaching professional disciplines as well as in the implementation of course projects and diploma projects.

Key words: milk processing, milk pasteurization, pulsed electric fields, inactivation of microorganisms.