

**Берник І. М.**

д.т.н., професор

Драчук І. О.здобувач освітнього ступеня
доктора філософії**Національний
університет біоресурсів
і природокористування
України****Bernyk I.**Doctor of Technical Sciences,
senior researcher, professor**Drachyk I.**

recipient of the PhD degree

**National University of Life
and Environmental
Sciences of Ukraine****УДК 663.8 : 66.084.8 : 633.522 : 519.87**
DOI: 10.37128/2306-8744-2026-1-17**МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ
РЕЖИМІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ
КАВІТАЦІЇ НА ЯКІСТЬ ЖИРОВОЇ
ФАЗИ У ТЕХНОЛОГІЇ
РОСЛИННОГО НАПОЮ З
НАСІННЯ КОНОПЕЛЬ**

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю контролю сонохімічних процесів з метою запобігання надмірним окисним перетворенням у жировій фазі під час ультразвукової стабілізації дисперсних систем на основі насіння конопель. Відомо, що інтенсифікація ультразвукових впливів може одночасно покращувати диспергування та активізувати окисні процеси, що негативно позначається на якості кінцевого продукту. Хімічна стабільність жирової фази є одним із ключових показників якості рослинних напоїв, зокрема за критерієм загального окиснення.

Метою роботи є математичне моделювання впливу основних параметрів ультразвукової обробки на показник загального окиснення жирової фази емульсії, отриманої з насіння конопель сорту Глесія. Для досягнення поставленої мети застосовано метод планування багатofакторного експерименту типу 2^3 за методом Бокса–Вілсона, що дозволило сформулювати повний факторний план і отримати квадратичні рівняння регресії. У якості факторів дослідження розглядалися потужність ультразвуку, питома енергія та температура середовища. Адекватність отриманої математичної моделі перевірено за критерієм Фішера, що підтвердило її статистичну надійність та придатність для прогнозування.

У результаті встановлено, що найбільш значущим чинником, який визначає інтенсивність окиснення, є температура середовища, тоді як потужність ультразвуку має найменший відносний вплив у дослідженому діапазоні. Проведений аналіз показав, що значення показника загального окиснення не перевищує 10 одиниць, що відповідає вимогам високої якості жирової фази та свідчить про відсутність критичних деградаційних змін.

Визначено раціональні діапазони параметрів ультразвукової обробки, які забезпечують оптимальне поєднання стабільності дисперсної системи та збереження якості жирової фази, зокрема температуру 26–35 °C та питому енергію 200–350 кДж/кг. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування технологічних режимів виробництва рослинних напоїв із насіння конопель, прогнозування термінів їх зберігання та підвищення ефективності харчових технологій.

Ключові слова: насіння конопель, математичне моделювання, ультразвукова кавітація, якість, жирова фаза, рослинний напій.

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ
УЛЬТРАЗВУКОВОЇ КАВІТАЦІЇ НА ЯКІСТЬ
ЖИРОВОЇ ФАЗИ У ТЕХНОЛОГІЇ
РОСЛИННОГО НАПОЮ З НАСІННЯ
КОНОПЕЛЬ © 2026 by Берник І.М., Драчук
І.О. is licensed under CC BY 4.0



Вступ. Сучасні тенденції світового ринку харчових продуктів демонструють стрімке зростання попиту на рослинні альтернативи молока, що зумовлює активний пошук нових джерел повноцінного білка та функціональних жирів. Насіння технічних конопель, зокрема вітчизняного сорту Глесія, є перспективною сировиною у зв'язку нутрієнтним складом, зокрема, вмістом та співвідношенням поліненасичених жирних кислот. Проте лабільність цих сполук до зовнішніх чинників створює виклики щодо промислової переробки.

Ультразвукова кавітаційна технологія - це ефективний метод диспергування жирових емульсій, який забезпечує високу кінетичну стабільність рослинних напоїв без використання стабілізаторів. При цьому, фізичні умови в зоні сплескування кавітаційних бульбашок, зокрема, локально високі значення тиску та температури - можуть ініціювати вільнорадикальне окиснення ліпідів. Традиційний підхід до контролю якості, що базується переважно на визначенні пероксидного числа, не дозволяє повною мірою оцінити зміни у жировій фазі оброблюваного середовища. Застосування інтегрального показника загального окиснення дає можливість комплексно врахувати як початкові стадії окиснення, так і накопичення вторинних продуктів, які мають безпосередній вплив на терміни зберігання, органолептичні властивості та показники безпеки рослинного напою.

Математичне моделювання за використання багатофакторного експерименту дозволяє кількісно встановити вплив факторів впливу та виявити їх синергетичні ефекти. Побудова моделей у вигляді поверхонь відгуку дає змогу математично визначити раціональний діапазон параметрів, за яких енергія ультразвукової кавітації є достатньою для стабілізації емульсії за умови отримання високоякісного рослинного напою.

Тому розроблення математичної моделі залежності показника загального окиснення від енергетичних характеристик ультразвуку є актуальним науковим завданням. Його вирішення дозволить забезпечити високу якість та біологічну цінність рослинних напоїв з насіння конопель за оптимізації питомих витрат енергії та збереженні нативної структури жирової фази дисперсної системи.

Аналіз останніх досліджень. У сучасному світі індустрія рослинних напоїв має суттєві зміни, що пов'язані з спрямування вектора сложивчих пріоритетів у бік сталого розвитку, етичного споживання та превентивної нутриціології [1-3]. Виробництво рослинного аналога молока з насіння конопель, зокрема сорту Глесія, є актуальним напрямком у зв'язку з винятковим хімічним складом сировини. Зокрема, воно має високий вміст білку, оптимальне співвідношення

поліненасичених жирних кислот та відсутні антипоживні чинники, що властиво для інших культур [4, 5].

Однак, проблемою виробництва рослинного аналога молока та промислового виробництва залишається низька агрегативна стійкість конопляних емульсій. Тому, актуальною є задача пошуку та розробки інноваційних підходів до їх стабілізації без використання стабілізаторів. Одним із напрямків рішення задачі є застосування ультразвукової кавітації, яка відкриває можливість цілеспрямовано модифікувати функціональні властивості білків та жирів, забезпечуючи при цьому високу кінетичну стабільність продуктів [6, 7]. Для цього необхідно здійснити моделювання та дослідження режимів ультразвукової обробки, що дозволить створити високоякісний продукт, який би відповідав вимогам сучасного ринку щодо функціональності та біологічної цінності.

Акустична кавітація є складним фізико-хімічним явищем, що виникає при поширенні ультразвукових хвиль високої інтенсивності в рідкому середовищі. Сплескування кавітаційної бульбашки супроводжується наявністю високої енергії, внаслідок чого значно змінюється структура дисперсних систем. Дослідження цих механізмів дозволяє розглядати ультразвукову кавітацію, як інструмент молекулярної інженерії, здатний змінювати енергетичний стан системи та її фазовий склад без значного макроскопічного нагрівання [6].

У харчових системах жирова фаза зазвичай представлена у вигляді емульсій типу «олія у воді». Основним завданням гомогенізації є максимальне зменшення розміру жирових кульок для запобігання їх коалесценції та кремації. Ультразвукова кавітація реалізує механізм руйнування жирових кульок, який відрізняється від традиційного механічного зсуву [8]. Внаслідок цього є можливим отримати розміри жирових кульок у діапазоні 200-400 нм, що значно нижче за розміри за використання традиційної гомогенізації (1,0-1,2 мкм) [9, 10].

Ультразвук демонструє значні переваги у збереженні термолабільних компонентів [11, 12]. Разом з тим, використання високоінтенсивного ультразвуку може привести до хімічної деградації компонентів харчових системах, серед яких найбільш вразливими є ліпіди, зокрема поліненасичені жирні кислоти [13-15].

Основний механізм впливу ультразвуку на рідкі середовища базується на явищі акустичної кавітації - циклічного формування, росту та швидкого сплескування мікробульбашок газу або пари під дією зміни акустичного тиску [16]. Внаслідок цього виникають локальні зони з надвисокими температурами та тиском. Такі умови стимулюють перебіг механохімічних реакцій, що неможливі за звичайних умов обробки, зокрема соноліз молекул води та органічних розчинників з утворенням вільних радикалів [13, 17, 18].



Для ліпідних систем, що характеризуються високим ступенем ненасиченості, ці радикали призводять до ланцюгових реакцій автоокиснення. Процеси деградації призводять до накопичення первинних та вторинних продуктів окиснення. Їх наявність погіршує органолептичні показники харчових олій, спричиняючи появу сторонніх запахів та смаків, а також є потенційною загрозою для здоров'я споживачів [19]. Хоча більшість радикалів генерується у водній фазі, високоенергетичний ультразвук здатний викликати пряму деградацію молекул жиру. Механічні сили зсуву здатні розривати С-С зв'язки в молекулах з високою молекулярною масою, що призводить до зниження в'язкості та утворення фрагментів з меншою довжиною ланцюга [20, 21].

Пероксидне число є ключовим індикатором початкових стадій окиснення, що відображає накопичення гідрпероксидів. В роботі [22] зазначається залежність величини пероксидного числа від тривалості та потужності ультразвукового впливу. Анізидинове число використовують для визначення вмісту вторинних продуктів окиснення, які утворюються при розпаді гідрпероксидів. Анізидинове число є надійнішим маркером глибокого псування олії та появи прогірклого смаку [23]. За ультразвукового кавітаційного впливу, особливо високих потужностей, відбувається швидкий перехід від первинних до вторинних продуктів окиснення. Дослідженнями встановлено, що для стабільних олій за наявності природних антиоксидантів ультразвук практично не змінює пероксидне число та жирнокислотний склад навіть за тривалої обробки [24].

Тому визначення показника загального окиснення дозволяє відійти від обмежень традиційних методів контролю, які зосереджені лише на початковому етапі деградації ліпідів, що в умовах сучасного складного виробництва може призводити до хибних висновків щодо якості продукції. Для конопляного напою дослідження показника загального окиснення є особливо критичним через домінування лінолевої та ліноленової кислот. Окиснення лінолевої кислоти призводить до утворення гексаналю та 2-гептеналю, тоді як ліноленова кислота продукує значну кількість 2,4-гептадієналю [25]. Ультразвук може прискорювати ці реакції через локальне підвищення температури та через генерацію вільних радикалів у результаті розпаду молекул води або інших розчинників [19]. Проте, дослідженнями встановлено [26], що за встановлення раціональних параметрів обробки спостерігалось уповільнення окиснення в емульсіях та формування компактних білкових шарів навколо крапель олії, що обмежує доступ кисню та прооксидантів.

Незважаючи на значні успіхи в оптимізації процесів емульгування за допомогою методу поверхні віддуку, існує критична прогалина в

розумінні хімічної стабільності конопляних емульсій, більшість існуючих моделей фокусуються на фізичних параметрах (розмір часток, в'язкість, дзета-потенціал), ігноруючи комплексну динаміку окиснення, яку описує показник загального окиснення [7]. Основною проблемою є відсутність математичних моделей, які б пов'язували специфічні енергетичні параметри ультразвуку зі станом окиснення жирової емульсії з насіння конопель. Більшість дослідників використовують лише номінальну потужність апарата або час обробки як вхідні змінні [27]. Проте, оскільки кавітація є енергетично залежним процесом, саме щільність енергії визначає ймовірність ініціації радикальних ланцюгів окиснення.

Мета та завдання дослідження Метою роботи є математичне моделювання впливу на показники якості жирової фази рослинного напою з насіння конопель сорту Глесія ультразвуковою кавітацією та встановлення на цій основі раціональних параметрів і режимів оброблення.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання:

1. Розробити адекватну математичну модель процесу зміни показника загального окиснення в залежності від режимів ультразвукового впливу на основі багатофакторного експерименту.

2. Дослідити характер взаємодії факторів та встановити їх вплив на інтенсивність формування продуктів окиснення в жировій фазі емульсії.

Матеріали і методи досліджень. Об'єкт дослідження - процес формування стабільної жирової емульсії в технології виробництва рослинного напою з ядра насіння конопель сорту Глесія. Стабілізацію дисперсної системи проводили за використання ультразвукової кавітаційної технології. Для цього використовували експериментальну установку з занурювальним високоамплітудним кавітатором на резонансній частоті 22 кГц та можливістю регулювання основних параметрів процесу. Контроль температури здійснювали за допомогою системи охолодження для компенсації нагрівання об'єму під впливом кавітації.

Якість жирової фази оцінювали за показником загального окиснення (ТOTOХ), який розраховували за формулою:

$$TOTOX = 2PC + AC,$$

де PC – пероксидне число, AC - анізидинове число.

Пероксидне число визначали згідно з ДСТУ EN ISO 3960:2019. Метод полягає у йодометричному титруванні вільного йоду, вивільненого в еквівалентній до вмісту пероксидів кількості внаслідок реакції наважки жиру з йодидом калію, стандартним розчином тіосульфату натрію за присутності крохмалю. Цей показник є критичним для оцінки свіжості та ступеня окиснювального



псування олії на початкових стадіях зберігання або переробки.

Анізидинове число визначали спектрофотометрично згідно з ДСТУ EN ISO 6885:2019. Анізидинове число вказує на нагромадження стійких вторинних продуктів, які зазвичай мають неприємний запах і смак.

Для встановлення взаємодії факторів використано планування багатофакторного експерименту виду 2^3 за методом Бокса-Уілсона. Обробку результатів проводили за допомогою методу найменших квадратів. Перевірку статистичної значущості коефіцієнтів регресії здійснювали за t -критерієм Стюдента, а адекватність побудованих моделей - за критерієм Фішера. Розрахунки та візуалізації поверхонь відгуку проводили за використання пакету прикладних програм MathCAD. Довірча ймовірність при аналізі результатів становила 0,95.

Виклад основного матеріалу. В результаті досліджень було встановлено, що формування стабільної жирової емульсії з насіння конопель сорту Глесія під дією ультразвукової кавітації супроводжується складними сонохімічними процесами. Висока енергоємність процесу диспергування та локальне вивільнення енергії в кавітаційних мікронах формують передумови для окисних реакцій у ліпідній фракції. У зв'язку з цим, виникла необхідність комплексного дослідження впливу фізичних параметрів ультразвукового оброблення на хімічну стабільність отриманого напою, критерієм якої було обрано показник загального окиснення.

Для побудови математичної моделі процесу було обрано три ключові фактори впливу: потужність ультразвукового випромінювання (W , Вт), температура системи (T , °C) та питома енергія оброблення ($E_{\text{пит}}$, кДж/кг). Вибір цих параметрів обумовлений їх роллю у формуванні дисперсного складу системи. Оскільки, потужність та енергія прямо корелюють зі ступенем подрібнення жирових кульок, температурний режим визначає кінетику розпаду первинних продуктів окиснення до вторинних.

Математичне моделювання проводили з метою встановлення функціональної залежності:

$$TOTOX = f(W, E_{\text{пит}}, T_{\text{CT}}) \quad (1)$$

При цьому встановлено наступну область визначення факторів:

$$\begin{aligned} 50 &\leq W \leq 100 (\%); \\ 100 &\leq E_{\text{пит}} \leq 600 (\text{кДж/кг}); \\ 20 &\leq T \leq 50 (\text{°C}). \end{aligned}$$

Функція таких основних параметрів дозволяє описати не лише характер взаємодії факторів, а й визначити критичні зони параметрів, за яких фізична стабільність емульсії досягається без суттєвої втрати біологічної цінності та органолептичних показників жирової фази.

Внаслідок складного впливу перерахованих вище факторів на характеристики та якісні показники ліпідної фази емульсії у технології виробництва рослинного аналога молока з насіння конопель сорту Глесія застосовано планування багатофакторного експерименту. Для отримання рівнянь регресії для функцій відгуку – характеристики окисних реакцій у ліпідній фракції у технології виробництва рослинного аналога молока з насіння конопель сорту Глесія використано планування багатофакторного експерименту виду 2^3 методом Бокса-Уілсона.

Вибір діапазонів варіювання факторів функції (1) проводився за умови, що будь-яка їхня сукупність в передбачених планом експерименту діапазонах могла бути реалізована і не приводила до протиріч. Для цього здійснено пошукові експерименти для визначення області, в якій необхідні нам сполучення рівнів факторів були б стійко реалізовані.

Всі відзначені фактори, які належать до функції (1), є величинами, що мають різну розмірність, а значення величин цих факторів мають різні порядки. Тому для отримання поверхонь відгуку цих функції було проведено операцію кодування факторів, що являє собою лінійне перетворення факторного простору за формулою:

$$x_j = \frac{(\tilde{X}_j - \tilde{X}_{j0})}{I_j} \quad (2)$$

У результаті проведених пошукових експериментів для кожного фактору встановлені такі значення: X_{j0} – основний рівень фактора; $X_{j\text{max}}$, $X_{j\text{min}}$ – верхній та нижній рівні фактора; $\alpha X_{j\text{max}}$, $\alpha X_{j\text{min}}$ – максимальний та мінімальний рівні фактора; α – зіркове плече; I_j – інтервал варіювання.

А також, встановлено наступні значення рівнів факторів в умовному масштабі: мінімальний –1, середній 0, максимальний +1 та зіркові значення –1,681, +1,681.

Істинні значення факторів, встановлені на основі проведення пошукових експериментів, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	-1,681	-1	0	+1	+1,681	
x_1 – потужність, %	50	60	75	90	100	15
x_2 – питома енергія, кДж/л	100	200	350	500	600	150
x_3 – температура, °C.	20	26	35	44	50	9



Для проведення ротатбельного центрального композиційного планування другого порядку на основі повнофакторного експерименту виду 2^3 було складено матрицю планування експерименту.

$$y = 5,47 + 0,3539x_1 + 1,455x_2 + 1,655x_3 + 0,07875x_1x_2 + 0,08875x_1x_3 + 0,2788x_2x_3 + 0,02256x_1^2 + 0,08084x_2^2 + 0,3334x_3^2 \quad (3)$$

За критерієм Стьюдента виявились значимими усі фактори, ефекти взаємодії 1-го порядку та квадратичні ефекти.

$$\text{ТОТОХ} = 5,383 - 0,0302P - 0,002866E_v - 0,2353T_{CT} + 3,517 \cdot 10^{-5}PE_v(4) + 0,0006574 + PT_{CT} + 0,0002067E_vT_{CT} + 0,0001236P^2 + 3,9 \cdot 10^{-6}E_v^2 + 0,00426T_{CT}^2 \quad (4)$$

При цьому $S_{\text{відг}}^2 = 0,0002$; $S_{\text{ад}}^2 = 0,0008356$; $F = 4,178 < [F] = 4,784$, отже за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність регресійної моделі (3) можна вважати правильною з 95%-ю достовірністю. Коефіцієнт кореляції склав $R=0,9930$, що свідчить про високу точність одержаних результатів.

Реалізація ротатбельного центрального композиційного планування другого порядку дозволила отримати адекватні математичні моделі у вигляді рівнянь регресії для кодovаних (3) та дійсних (4) значень факторів. Статистична оцінка отриманих результатів за допомогою критерію Стьюдента підтвердила значущість усіх коефіцієнтів моделі, включаючи лінійні фактори, ефекти взаємодії першого порядку та квадратичні доданки. Висока прогностична здатність та точність отриманих моделей підтверджується коефіцієнтом кореляції $R = 0,9930$. Крім того, розрахункове значення критерію Фішера $F=4,178$ виявилось меншим за критичне $[F]=4,784$, що з 95%-ю достовірністю свідчить про адекватність

Для функції відгуку – показник загального окиснення рівняння регресії згідно проведеного багатофакторного експерименту для кодovаних значень має вигляд:

Для дійсних значень факторів рівняння регресії для функції відгуку – показник загального окиснення (ТОТОХ) має вигляд:

розробленої моделі реальним умовам процесу стабілізації конопляної емульсії.

Аналіз структури отриманих моделей дозволив встановити вплив досліджуваних фізичних параметрів на інтенсивність окисних реакцій у жировій фазі. Виявлено, що серед усіх чинників найбільший деструктивний вплив на стан жирової фази насіння конопель сорту Глесія має температура середовища, тоді як вплив потужності ультразвуку виявився найменш вираженим. Такий розподіл факторів пояснюється тим, що температурний режим безпосередньо визначає кінетику розпаду первинних продуктів окиснення пероксидів до вторинних, зокрема, альдегідів та кетонів, що безпосередньо визначає рівень показника ТОТОХ. Питома енергія оброблення впливає на протікання радикальних ланцюгових реакцій через кавітаційний вплив на молекулярну структуру ліпідів.

За допомогою пакету прикладних програм MathCAD було проведено оптимізацію функції відгуку – показник загального окиснення шляхом її максимізації (рис. 1).

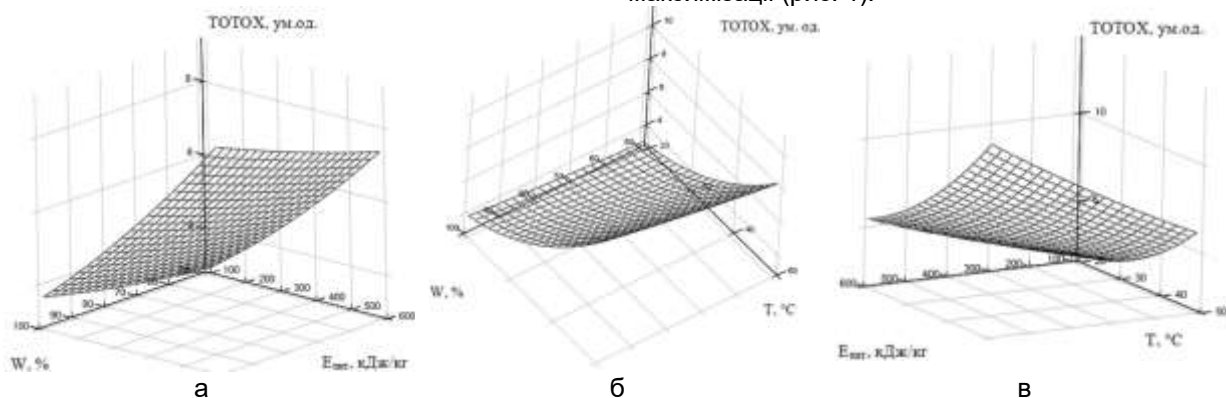


Рис. 1. Поверхні відгуку та їхні двомірні перерізи для цільової функції (показник ТОТОХ) залежно від параметрів ультразвукової обробки: а) залежність від потужності ультразвуку (W) та питомої енергії оброблення (E_{num}); б) залежність від потужності ультразвуку (W) та температури середовища (T); в) залежність від питомої енергії обробки (E_{num}) та температури середовища (T).



Найбільш інтенсивне зростання показника загального окиснення спостерігається в зоні одночасного підвищення температури та питомої енергії оброблення. Зокрема, показник загального окиснення досягає своїх пікових значень у діапазоні від 8,13 до 9,84 при зростанні температури до 44-50 °С та питомої енергії до 500-600 кДж/кг. Це свідчить про необхідність дотримуватися меж енергетичного навантаження на середовище, а недостатнє відведення теплоти сприяє деструкції жирової фази. Натомість зміна потужності в межах від 60% до 90% призводить до менш відчутних коливань цільової функції, що вказує на можливість варіювання інтенсивності диспергування за умови суворого температурного контролю.

Порівняння отриманих експериментальних даних із нормативними вимогами дозволяє визначити межі оптимального технологічного процесу. Для отримання продукту високої якості з показником загального окиснення у межах 2,88-3,64 необхідно дотримуватися нижніх рівнів варіювання температури в межах 20-26 °С. Оскільки навіть за максимально жорстких режимів обробки (верхні рівні варіювання) значення ТОТОХ не перевищило критичної позначки 10, обрані діапазони параметрів ультразвуку можна вважати технологічно допустимими для виробництва стабільного рослинного аналога молока з насіння конопель.

Використання отриманої математичної моделі дозволяє прогнозувати стан системи в широкому діапазоні значень. Одночасне зростання температури та питомої енергії є найбільш небезпечним для якості жирової фази продукту. Навіть за відносно низької потужності ($P \approx 50-60\%$), перегрів системи вище 44-50 °С призводить до різкого зростання показника загального окиснення (до значень 8,13–9,18). Оптимальними значеннями для технологічного процесу є нижні рівні варіювання факторів (від -1,681 до -1 в кодіваних одиницях). Завдяки високому коефіцієнту кореляції ($R=0,9930$) та адекватності моделі за критерієм Фішера ($F < [F]$), розраховані режими гарантують стабільну якість жирової фази з імовірністю 95%. Для впровадження результатів у виробництво рекомендуємо використовувати обладнання з активною системою охолодження, що дозволить компенсувати дисипативне нагрівання та дотримання температурного режиму.

Отримані дані дозволяють стверджувати, що при проектуванні промислової лінії виробництва рослинного молока з насіння конопель необхідно закладати технічні рішення для стабілізації температури в межах 26–35 °С, оскільки саме цей фактор має найбільш

виражений вплив на зростання показника загального окиснення.

Висновки: Використання планування багатофакторного експерименту виду 23 методом Бокса-Вілсона дало можливість отримати адекватне рівняння квадратичної регресії, яке описує зміну показника загального окиснення залежно від потужності, питомої енергії та температури. Коефіцієнт кореляції отриманої моделі склав $R=0,9930$, що свідчить про високу достовірність результатів, а перевірка за критерієм Фішера підтвердила адекватність моделі з 95%-ю ймовірністю.

Встановлено, що серед досліджуваних параметрів найбільший вплив на інтенсифікацію окисних процесів у ліпідній фракції має температура середовища, тоді як вплив потужності ультразвуку виявився найменш значущим.

Аналіз поверхонь відгуку показав, що синергічна дія високої температури та питомої енергії оброблення є визначальною для зростання показника загального окиснення. Найвищі значення показника (до 9,84) зафіксовані при поєднанні температури 44-50 °С та питомої енергії понад 500 кДж/л. Попри інтенсивне оброблення, у всіх дослідах показник загального окиснення не перевищив значення 10, що відповідає вимогам якості та свідчить про високу природну стабільність ліпідного комплексу насіння конопель сорту Глєсія.

Список використаних джерел

1. Review of plant-based milk analogue: its preparation, nutritional, physicochemical, and organoleptic properties / D. Daryani, K. Pegua, S. S. Aryaa. *Food Science and Biotechnology*. 2024. Vol. 33, №5. P. 1059–1073. DOI: 10.1007/s10068-023-01482-z.
2. The rise of plant-based milk alternatives: exploring nutritional, health, and sustainability impacts / N. Asif, O. Anwar, S. Arif et al. *Food Chemistry*: X. 2026. Vol. 34. Art. 103528. DOI: 10.1016/j.fochx.2026.103528.
3. The impact of the COVID-19 pandemic on global food system resilience / O. Kubatko, R. Merritt, S. Duane, V. Piven. *Mechanisms of Economic Regulation*. 2023. No. 1 (99). P. 144–148. DOI: 10.32782/mer.2023.99.22.
4. Берник І. М., Драчук І. О. Оцінка та аналіз методів отримання рослинного аналога молока. *Здоров'я людини і нації*. 2025. № 3 (3). С. 137–148. DOI: 10.31548/humanhealth.3.2025.137.
5. Esposito M., Piazza L. Ultrasound-assisted extraction of oil from hempseed (*Cannabis sativa* L.): Part 1. *J Sci Food Agric*. 2022. Vol. 102, No. 2. P. 732–739. DOI: 10.1002/jsfa.11404.



6. Берник І. М., Драчук І. О. Фізична модель формування стабільної харчової матриці конопляної емульсії за ультразвукового кавітаційного впливу. *Здоров'я людини і нації*. 2026. № 4 (1). С. 139–153. DOI: 10.31548/humanhealth.1.2026.139.
7. Effect of high-intensity ultrasonic treatment on the emulsion of hemp seed oil stabilized with hemp seed protein / N. Li, T. Wang, X. Yang et al. *Ultrason Sonochem.* 2022. Vol. 86. Art. 106021. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.106021.
8. Effect of the Application of Ultrasound to Homogenize Milk and the Subsequent Pasteurization by Pulsed Electric Field, High Hydrostatic Pressure, and Microwaves / L. Astráin-Redín, D. Skipnes, G. Cebrián et al. *Foods*. 2023. Vol. 12, No. 7. Art. 1457. DOI: 10.3390/foods12071457.
9. Stepišnik Perdih T., Zupanc M., Dular M. Revision of the mechanisms behind oil-water (O/W) emulsion preparation by ultrasound and cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019. Vol. 51. P. 298–304. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.10.003.
10. Дослідження ультразвукової кавітаційної обробки молока. Експериментальний підхід / О. Луговський, Т. Желяскова, А. Зілінський, В. Желясков. *Mech. Adv. Technol.* 2024. Vol. 8, No. 1 (100). P. 108–114. DOI: 10.20535/2521-1943.2024.8.1(100).298105.
11. Non-Thermal Hydrodynamic Cavitation for Surplus Fruits and Vegetables: Improved Vitamin C and Bioactive Preservation / J. Quintero-Quiroz, N. Zuluaga-Arroyave, A. Valencia-Naranajo et al. *Foods*. 2026. Vol. 15, No. 2. Art. 268. DOI: 10.3390/foods15020268.
12. Ultrasonication retains more milk fat globule membrane proteins compared to equivalent shear-homogenization / Y. Liu, S. Boeren, L. Zhang et al. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2021. Vol. 70. Art. 102703. DOI: 10.1016/j.ifset.2021.102703.
13. Ultrasound in the Food Industry: Mechanisms and Applications for Non-Invasive Texture and Quality Analysis / N. Y. A. Prempeh, X. Nunekpeku, A. Murugesan, H. Li. *Foods*. 2025. Vol. 14, No. 12. Art. 2057. DOI: 10.3390/foods14122057.
14. Overview and Toxicity Assessment of Ultrasound-Assisted Extraction of Natural Ingredients from Plants / A. G. Demesa, S. Saavala, M. Pöysä, T. Koiranen. *Foods*. 2024. Vol. 13, No. 19. Art. 3066. DOI: 10.3390/foods13193066.
15. The ultrasonic processing of dairy products: An overview / M. Ashokkumar, R. Bhaskaracharya, S. Kentish et al. *Dairy Sci. Technol.* 2010. Vol. 90. P. 147–168. DOI: 10.1051/dst/2009044.
16. Апаратне забезпечення ультразвукових кавітаційних технологій: монографія / О. Ф. Луговський, А. В. Мовчанюк, І. М. Берник та ін. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 213 с.
17. Ultrasound triggered organic mechanoluminescence materials / W. Wang, A. Tasset, I. Pyatnitskiy et al. *Adv Drug Deliv Rev.* 2022. Vol. 186. Art. 114343. DOI: 10.1016/j.addr.2022.114343.
18. Берник І. М., Назаренко І. І., Луговський О. Ф. Дослідження хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2021. Vol. 5, No. 3. P. 351–358. DOI: 10.20535/2521-1943.2021.5.3.250180.
19. Impact of Ultrasonication on the Oxidative Stability of Oil-in-Water Nanoemulsions: Investigations into Kinetics and Strategies to Control Lipid Oxidation/ M. Ganguly, D. Debraj, N. Mazumder et al. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2024. Vol. 63, No. 23. P. 10212–10225. DOI: 10.1021/acs.iecr.4c00506.
20. Recent advances of ultrasound applications in the oil and gas industry / J. Mierez, M. J. Altammar, K. M. Alruwaili, R. T. Alfaraj. *Ultrason Sonochem.* 2024. Vol. 103. Art. 106767. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2024.106767.
21. Kinetic study of triolein oxidation to generate α -dicarbonyl compounds promoted by high-intensity ultrasound using multi-response kinetic models / L. Jiang, L. Gao, W. Wang et al. *Food Chemistry*. 2025. Vol. 496, Pt. 2. Art. 146786. DOI: 10.1016/j.foodchem.2025.146786.
22. Halim H. H., Thoo Y. Y. Effect of ultrasound treatment on oxidative stability of sunflower oil and palm oil. *International Food Research Journal*. 2018. Vol. 25, No. 5. P. 1959–1967.
23. Halvorsen B. L., Blomhoff R. Determination of lipid oxidation products in vegetable oils and marine omega-3 supplements. *Food Nutr Res*. 2011. Vol. 55. DOI: 10.3402/fnr.v55i0.5792.
24. The effect of ultrasound process on the extraction yield and the quality of edible oils / B. Bahramian, Z. K. Ronizi, M. Hashemi et al. *Applied Food Research*. 2025. Vol. 5, No. 2. Art. 101268. DOI: 10.1016/j.afres.2025.101268.
25. Evaluation of hemp seed oils stability under accelerated storage test / M. Tura, D. Ansorena, I. Astiasarán et al. *Antioxidants*. 2022. Vol. 11, No. 3. Art. 490. DOI: 10.3390/antiox11030490.
26. Improving interfacial properties, structure and oxidative stability by ultrasound application to sodium caseinate prepared pre-emulsified soybean oil / K. Li, Y. Li, C.-L. Liu et al. *LWT*. 2020. Vol. 131. Art. 109755. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109755.



27. Ultrasound-induced changes in structural and physicochemical properties of β -lactoglobulin / S. Ma, X. Yang, C. Zhao, M. Guo. *Food Science & Nutrition*. 2018. Vol. 6 (4). P. 1053–1064. DOI: 10.1002/fsn3.646.

References

1. Daryani, D., Pegua, K., & Aryaa, S. S. (2024). Review of plant-based milk analogue: its preparation, nutritional, physicochemical, and organoleptic properties. *Food Science and Biotechnology*, 33(5), 1059–1073. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01482-z> [in English]

2. Asif, N., Anwar, O., Arif, S., et al. (2026). The rise of plant-based milk alternatives: exploring nutritional, health, and sustainability impacts. *Food Chemistry: X*, 34, Article 103528. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2026.103528> [in English]

3. Kubatko, O., Merritt, R., Duane, S., & Piven, V. (2023). The impact of the COVID-19 pandemic on global food system resilience. *Mechanisms of Economic Regulation*, 1(99), 144–148. <https://doi.org/10.32782/mer.2023.99.22> [in English]

4. Berynk, I. M., & Drachuk, I. O. (2025). Otsinka ta analiz metodiv otrymannia roslynnoho analoha moloka [Assessment and analysis of methods for obtaining a plant-based milk analogue]. *Zdorovia liudyny i natsii*, 3(3), 137–148. <https://doi.org/10.31548/humanhealth.3.2025.137> [in Ukrainian].

5. Esposito, M., & Piazza, L. (2022). Ultrasound-assisted extraction of oil from hempseed (*Cannabis sativa* L.): Part 1. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(2), 732–739. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11404> [in English]

6. Berynk, I. M., & Drachuk, I. O. (2026). Fizychna model formuvannia stabilnoi kharchovoi matrytsi konoplianoi emulsii za ultrazvukovoho kavitatsiinoho vplyvu [Physical model of forming a stable food matrix of hemp emulsion under ultrasonic cavitation]. *Zdorovia liudyny i natsii*, 4(1), 139–153. <https://doi.org/10.31548/humanhealth.1.2026.139> [in Ukrainian].

7. Li, N., Wang, T., Yang, X., Qu, J., Wang, N., Wang, L., Yu, D., & Han, C. (2022). Effect of high-intensity ultrasonic treatment on the emulsion of hemp seed oil stabilized with hemp seed protein. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86, Article 106021. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106021> [in English]

8. Astráin-Redín, L., Skipnes, D., Cebrián, G., Álvarez-Lanzarote, I., & Rode, T. M. (2023). Effect of the application of ultrasound to homogenize milk and the subsequent pasteurization by pulsed electric field, high

hydrostatic pressure, and microwaves. *Foods*, 12(7), Article 1457.

<https://doi.org/10.3390/foods12071457> [in English]

9. Stepišnik Perdih, T., Zupanc, M., & Dular, M. (2019). Revision of the mechanisms behind oil-water (O/W) emulsion preparation by ultrasound and cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 51, 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.10.003> [in English]

10. Luhovskyi, O., Zheliaskova, T., Zilinskyi, A., & Zheliaskov, V. (2024). Doslidzhennia ultrazvukovoi kavitatsiinoi obrobky moloka. Eksperymentalnyi pidkhid [Research on ultrasonic cavitation treatment of milk. Experimental approach]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 8(1), 108–114. [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.1\(100\).298105](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.1(100).298105) [in Ukrainian].

11. Quintero-Quiroz, J., Zuluaga-Arroyave, N., Valencia-Naranajo, A., Molina-Castillo, M. C., Varela-Garcia, N., Medina-Rodriguez, M., Martínez-Saldarriaga, J., & Henao-Rojas, J. C. (2026). Non-thermal hydrodynamic cavitation for surplus fruits and vegetables: Improved vitamin C and bioactive preservation. *Foods*, 15(2), Article 268. <https://doi.org/10.3390/foods15020268> [in English]

12. Liu, Y., Boeren, S., Zhang, L., Zhou, P., & Hettinga, K. (2021). Ultrasonication retains more milk fat globule membrane proteins compared to equivalent shear-homogenization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 70, Article 102703. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102703> [in English]

13. Prempeh, N. Y. A., Nunekpeku, X., Murugesan, A., & Li, H. (2025). Ultrasound in the food industry: Mechanisms and applications for non-invasive texture and quality analysis. *Foods*, 14(12), Article 2057. <https://doi.org/10.3390/foods14122057> [in English]

14. Demesa, A. G., Saavala, S., Pöysä, M., & Koironen, T. (2024). Overview and toxicity assessment of ultrasound-assisted extraction of natural ingredients from plants. *Foods*, 13(19), Article 3066. <https://doi.org/10.3390/foods13193066> [in English]

15. Ashokkumar, M., Bhaskaracharya, R., Kentish, S., Lee, J., Palmer, M., & Zisu, B. (2010). The ultrasonic processing of dairy products: An overview. *Dairy Science & Technology*, 90, 147–168. <https://doi.org/10.1051/dst/2009044> [in English]

16. Luhovskyi, O. F., Movchaniuk, A. V., Berynk, I. M., Shulha, A. V., & Hryshko, I. A. (2021). *Aparatne zabezpechennia ultrazvukovykh kavitatsiinykh tekhnolohii: monohrafiia* [Hardware support for ultrasonic cavitation technologies: a monograph]. KPI im. Ihorii Sikorskoho. [in Ukrainian].



17. Wang, W., Tasset, A., Pyatnitskiy, I., Mohamed, H. G., Taniguchi, R., Zhou, R., Rana, M., Lin, P., Capocyan, S. L. C., Bellamkonda, A., Chase Sanders, W., & Wang, H. (2022). Ultrasound triggered organic mechanoluminescence materials. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 186, Article 114343.

<https://doi.org/10.1016/j.addr.2022.114343> [in English]

18. Beryk, I. M., Nazarenko, I. I., & Luhovskyi, O. F. (2021). Doslidzhennia khvylovoho oporu ridynno-dispersnykh seredovysch v umovakh ultrazvukovoi kavitatsiinoi obrobky [Investigation of the wave resistance of liquid-dispersed media under conditions of ultrasonic cavitation treatment]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 351–358.

<https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250180> [in Ukrainian].

19. Ganguly, M., Debraj, D., Mazumder, N., et al. (2024). Impact of ultrasonication on the oxidative stability of oil-in-water nanoemulsions: Investigations into kinetics and strategies to control lipid oxidation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(23), 10212–10225.

<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c00506> [in English]

20. Mierez, J., AlTammar, M. J., Alruwaili, K. M., & Alfaraj, R. T. (2024). Recent advances of ultrasound applications in the oil and gas industry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 103, Article 106767.

<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106767> [in English]

21. Jiang, L., Gao, L., Wang, W., et al. (2025). Kinetic study of triolein oxidation to generate α -dicarbonyl compounds promoted by high-intensity ultrasound using multi-response kinetic models. *Food Chemistry*, 496(2), Article 146786.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146786> [in English]

22. Halim, H. H., & Thoo, Y. Y. (2018). Effect of ultrasound treatment on oxidative stability of sunflower oil and palm oil. *International Food Research Journal*, 25(5), 1959–1967. [in English]

23. Halvorsen, B. L., & Blomhoff, R. (2011). Determination of lipid oxidation products in vegetable oils and marine omega-3 supplements. *Food & Nutrition Research*, 55.

<https://doi.org/10.3402/fnr.v55i0.5792> [in English]

24. Bahramian, B., Ronizi, Z. K., Hashemi, M., et al. (2025). The effect of ultrasound process on the extraction yield and the quality of edible oils. *Applied Food Research*, 5(2), Article 101268.

<https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101268> [in English]

25. Tura, M., Ansorena, D., Astiasarán, I., Mandrioli, M., & Toschi, T. G. (2022). Evaluation of hemp seed oils stability under accelerated storage

test. *Antioxidants*, 11(3), Article 490.

<https://doi.org/10.3390/antiox11030490> [in English]

26. Li, K., Li, Y., Liu, C.-L., Fu, L., Zhao, Y.-Y., Zhang, Y.-Y., Wang, Y.-T., & Bai, Y.-H. (2020). Improving interfacial properties, structure and oxidative stability by ultrasound application to sodium caseinate prepared pre-emulsified soybean oil. *LWT*, 131, Article 109755.

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109755> [in English]

27. Ma, S., Yang, X., Zhao, C., & Guo, M. (2018). Ultrasound-induced changes in structural and physicochemical properties of β -lactoglobulin. *Food Science & Nutrition*, 6(4), 1053–1064.

<https://doi.org/10.1002/fsn3.646> [in English]

MODELING THE INFLUENCE OF ULTRASONIC CAVITATION MODES ON THE QUALITY OF THE FAT PHASE IN HEMP-BASED BEVERAGE TECHNOLOGY

The relevance of this study is determined by the need to control sonochemical processes in order to prevent excessive oxidative reactions in the lipid phase during ultrasonic stabilization of dispersed systems based on hemp seeds. It is well known that ultrasonic treatment can simultaneously enhance dispersion and intensify oxidation processes, which may negatively affect the quality of the final product. The chemical stability of the lipid phase is one of the key indicators of the quality of plant-based beverages, particularly in terms of total oxidation.

The aim of the study is to develop a mathematical model describing the influence of ultrasonic processing parameters on the total oxidation index of the lipid phase of an emulsion obtained from hemp seeds of the Glesia variety. To achieve this objective, a full-factorial experimental design of the 2³ type based on the Box–Wilson method was applied, which enabled the derivation of quadratic regression equations. The main factors considered in the study were ultrasonic power, specific energy input, and medium temperature. The adequacy of the developed model was verified using the Fisher criterion, confirming its statistical reliability and predictive capability.

The results indicate that temperature is the most significant factor affecting the oxidation intensity, while ultrasonic power has the least relative influence within the studied parameter range. It was established that the total oxidation index does not exceed 10 units, which meets the requirements for high-quality lipid phases and indicates the absence of critical degradation processes.

Rational ranges of ultrasonic processing parameters were determined, ensuring an optimal balance between the stability of the dispersed system and the preservation of lipid phase quality,



namely a temperature range of 26–35 °C and a specific energy input of 200–350 kJ/kg. The obtained results can be used to substantiate technological regimes for the production of plant-based beverages from hemp seeds, predict their

shelf life, and improve the efficiency of food processing technologies.

Keywords: hemp seeds, ultrasonic cavitation, TOTOX value, modeling, lipid complex quality, plant-based beverage.

Відомості про авторів

Берник Ірина Миколаївна - доктор технічних наук, професор кафедри процесів та обладнання переробки продукції АПК Національного університету біоресурсів і природокористування України (вул. Героїв Оборони, 12 В, м. Київ, Україна, 03040, e-mail: iryna_bernyk@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-1367-3058>

Драчук Ігор Олегович - здобувач ступеня доктора філософії за спеціальністю 181 Харчові технології кафедри процесів та обладнання переробки продукції АПК Національного університету біоресурсів і природокористування України (вул. Героїв Оборони, 12 В, м. Київ, Україна, 03040, e-mail: igor_drachuk000@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-0018-2871>

Bernyk Iryna – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Processes and Equipment for Processing of Agricultural Products, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (12-B Heroiv Oborony St., Kyiv, 03040, Ukraine, e-mail: iryna_bernyk@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-1367-3058>

Drachuk Ihor – PhD Student in Food Technology (Specialty 181), Department of Processes and Equipment for Processing of Agricultural Products, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (12-B Heroiv Oborony St., Kyiv, 03040, Ukraine, e-mail: igor_drachuk000@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-0018-2871>

Стаття надійшла 10.03.2026

Стаття прийнята 15.03.2026

Опубліковано 17.04.2026