

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ДРАЧУК ІГОР ОЛЕГОВИЧ

УДК 663.8:664.8.039.5:633.522

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ КАВІТАЦІЙНОЇ
СТАБІЛІЗАЦІЇ РОСЛИННОГО НАПОЮ З НАСІННЯ КОНОПЕЛЬ**

181 «Харчові технології»
18 «Виробництво та технології»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____Ігор ДРАЧУК

Наукові керівники:

Слободянюк Наталія Михайлівна,
канд. с.-г. наук, професор

Берник Ірина Миколаївна,
д-р техн. наук, професор

Київ –2026

АНОТАЦІЯ

Драчук І.О. Удосконалення процесу ультразвукової кавітаційної стабілізації рослинного напою з насіння конопель. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 181 «Харчові технології». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2026 р.

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу забезпечення стійкості рослинного напою з насіння конопель без використання доданих стабілізаторів та емульгаторів. Встановлено актуальність проблеми та необхідність пошуку рішень удосконалення процесу стабілізації рослинних жирових емульсій. Визначено, що наявні методи стабілізації рослинних жирових емульсій не повною мірою відповідають сучасним вимогам щодо якості та термінів зберігання рослинних напоїв.

Сучасний стан світової харчової індустрії характеризується стрімким зростанням попиту на рослинні аналоги молока. При цьому насіння технічних конопель має вагоме значення завдяки унікальному вмісту та співвідношенню білка і жирних кислот. Однак, головною технологічною проблемою при отриманні конопляних емульсій є їхня висока схильність до швидкої агрегації та седиментації дисперсної фази. Традиційні методи вирішення цієї задачі зазвичай передбачають введення екзогенних стабілізаторів та емульгаторів, що суперечить сучасним вимогам до компонентного складу та потребує пошуку інноваційних методів фізичного впливу на систему для максимального залучення внутрішнього ресурсного потенціалу сировини з метою забезпечення стабільності емульсій.

Доведено, що одним із ефективних напрямів вирішення проблеми стабілізації є застосування технології ультразвукової кавітаційної обробки емульсії типу «олія у воді» на основі насіння конопель. Використання у технологіях рослинних напоїв такої обробки забезпечує не лише механічне

диспергування жирової фази, а й механохімічну активацію білків. Енергія кавітаційного поля зумовлює розгортання молекул едестину, що значно покращує їхню адсорбційну здатність та сприяє формуванню стійких захисних оболонки на межі поділу фаз «олія-вода».

У першому розділі здійснено оцінку сировинної бази та особливостей технологічного процесу виробництва емульсійних систем на основі огляду сучасних вітчизняних і світових досліджень. Проведений аналіз засвідчив актуальність проблеми та необхідність пошуку рішень удосконалення процесу стабілізації дисперсних систем типу «олія у воді». Така необхідність зумовлена тим, що існуючі методи стабілізації не повністю задовольняють сучасні вимоги до якості та термінів зберігання рослинних напоїв через обов'язкове використання допоміжних стабілізаторів та емульгаторів.

Здійснений системний огляд властивостей, параметрів, характеристик впливу існуючих інгредієнтів на процес виготовлення рослинних напоїв надав можливість аргументовано визначити як інгредієнт насіння конопель сорту Глесія. Обґрунтовано технологію ультразвукової кавітаційної обробки насіння конопель сорту Глесія для здійснення теоретичних та експериментальних досліджень. Сформульовано мету та завдання досліджень.

У другому розділі обґрунтовано методологію дослідження, визначено об'єкт та предмет, наведено теоретичні й експериментальні методи вивчення процесів формування та стабілізації емульсійних систем. Реалізація обраного інструментарію поєднує чотири етапи, виконання яких базується на принципах системного підходу.

На першому етапі дослідження передбачено огляд і аналіз наявних технологій виробництва рослинних напоїв із різних видів сировини з оцінюванням їхніх переваг та недоліків. Другий етап присвячено розробленню узагальненої фізичної моделі, на основі якої здійснено аналітичні дослідження морфологічної трансформації конопляної емульсії під дією ультразвуку. Ця модель дає змогу пояснити та врахувати механізми формування стійкої

дисперсної системи без використання допоміжних стабілізаторів та емульгаторів.

На третьому та четвертому етапах передбачено теоретичне й експериментальне обґрунтування використання ядра насіння технічних конопель вітчизняної селекції сорту Глесія для виробництва рослинних напоїв. Крім того, розроблення алгоритмів, застосування яких забезпечить стабільність та якість отримання рослинного напою із насіння технічних конопель вітчизняної селекції сорту Глесія без використання допоміжних добавок.

Вибір методів теоретичних досліджень процесів формування та стабілізації зумовлений розглядом конопляної емульсії як складної багатофазної системи. Під дією ультразвукової кавітаційної обробки в ній суттєво змінюється не лише дисперсний стан, а й відбуваються глибокі структурно-морфологічні перетворення.

У третьому розділі розроблено комплексний алгоритм досліджень, спрямований на забезпечення кінетичної стабільності рослинної емульсійної системи. На основі системного підходу обґрунтовано узагальнену фізичну модель морфологічної трансформації та кінетичної стійкості нанодисперсних фаз конопляної емульсії під дією ультразвукової кавітації. У рамках реалізації алгоритму проведено теоретичні дослідження процесів кавітаційного впливу на динаміку руху компонентів конопляної емульсії. Зокрема, здійснено математичне моделювання динаміки в системі «акустичний апарат – кавітаційна бульбашка» та досліджено процеси взаємодії кавітаційних бульбашок із краплями ліпідної фази. Отримані аналітичні залежності були використані для визначення раціональних режимів і параметрів ультразвукової дезінтеграції.

Встановлено, що агрегативна та кінетична стабільність емульсії досягається завдяки синергетичному поєднанню інтенсивного диспергування жирової фази та структурної модифікації білка едестину безпосередньо під дією ультразвуку. Доведено, що денатураційна активація едестину зумовлює

вивільнення сульфгідрильних груп та утворення міжмолекулярних дисульфідних містків. Це безпосередньо призводить до формування навколо жирових крапель суцільної міцної в'язко-пружної оболонки.

Здійснено фізико-математичне обґрунтування оптимального розміру крапель конопляної емульсії. На основі використання умов розширеної теорії ДЛФО встановлено аналітичну залежність для визначення агрегативної стабільності напою $V_{max} \geq 20k_B T$. Підтверджено седиментаційну стійкість системи, що зумовлена домінуванням енергії теплового броунівського руху над гравітаційними силами згідно із законом Стокса.

На завершальному етапі виконано математичне моделювання дисперсності на основі багатофакторної оптимізації показників стабільності та якості продукту. Теоретично досліджено та експериментально підтверджено, що оптимальний діапазон дисперсності жирової фази знаходиться в межах 250–350 нм. Саме в цьому інтервалі досягається найбільш раціональний баланс між фізико-хімічною стійкістю та органолептичними показниками рослинного напою.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень та науково обґрунтовано доцільність використання ядра насіння технічних конопель сорт Глесія як базисної сировини для виробництва кінетично стійких рослинних напоїв. Здійснено комплексну оцінку впливу гідромодуля на нутрієнтний склад екстрактів. Із застосуванням методу узагальненої функції бажаності Харрінгтона кваліметрично підтверджено, що використання гідромодуля 1:8, за якого $D=0,8687$, забезпечено баланс органолептичних властивостей та наближає харчову цінність дисперсної системи до показників коров'ячого молока жирністю 3,2 %.

За результатами багатофакторного експерименту розроблено математичні моделі, які адекватно описують закономірності зміни показників якості напою залежно від параметрів ультразвукового кавітаційного впливу. Встановлено, що функції відгуку для показників фізичної стабільності (I_{cm}) та хімічної безпеки ($TOTOX$) мають нелінійний характер і є результатом

синергетичної взаємодії потужності, питомої енергії та температури середовища.

Експериментально доведено, що агрегативна стійкість системи на рівні 95–97 % досягається за умов інтенсифікації акустичного впливу (потужність 85–100 %, питома енергія 450–500 кДж/кг). Саме за таких енергетичних параметрів забезпечується необхідне диспергування жирової фази та розгортання глобул білка едестину, що гарантує високу седиментаційну стійкість напою. Водночас доведено, що подальше нарощування енергетичних параметрів є технологічно недоцільним.

Особливу увагу приділено встановленню меж технологічної безпеки процесу. Аналіз показника окиснення підтвердив, що перевищення температури середовища понад 45–50 °С за умови тривалого термоакустичного впливу ініціює ланцюгові реакції автоокиснення поліненасичених жирних кислот із накопиченням продуктів окиснення понад 9–10 ум. од. Це обґрунтовує необхідність жорсткого температурного контролю для збереження біологічної цінності.

За підсумками досліджень визначено раціональні режими функціонування ультразвукової системи: потужність – 85–95 %, питома енергія – 450–500 кДж/кг, температура – 40 °С. Зазначені параметри забезпечують отримання стабільного гомогенного напою з показником окиснення не вище 6,5 ум. од., що формує надійне наукове підґрунтя для розроблення нормативної документації та впровадження технології у промислове виробництво.

Таким чином, у дисертаційній роботі науково обґрунтовано та вирішено важливу науково-практичну задачу щодо забезпечення кінетичної стійкості рослинного напою з насіння конопель сорту Глесія без використання екзогенних стабілізаторів та емульгаторів. Розроблено та теоретично підтверджено ефективність технології ультразвукової кавітаційної обробки, яка забезпечує синергетичний ефект інтенсивного диспергування жирової фази до оптимальних розмірів 250–350 нм та спрямованої структурної

модифікації білка едестину з формуванням стійких захисних міжфазних оболонок. Встановлено раціональні режими ультразвукового оброблення, що забезпечують високу якість та хімічну безпеку готового продукту. Визначені параметри є науково-практичним підґрунтям для розроблення нормативної документації та впровадження інноваційної технології у промислове виробництво рослинних напоїв.

Ключові слова: рослинний напій, насіння конопель, рослинна емульсія, ультразвукова кавітація, білок едестин, гідромодуль, фізична стабілізація, кінетична стійкість, математичне моделювання, показники якості, поліненасичені жирні кислоти, харчова цінність.

ABSTRACT

Drachuk I. O. Improvement of the ultrasonic cavitation stabilization process for a plant-based beverage made from hemp seeds. Qualification research paper (manuscript).

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 181 "Food Technologies" (18 "Production and Technologies"). National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2026.

The dissertation addresses an important scientific and practical task: ensuring the stability of a plant-based beverage made from hemp seeds without the use of added stabilizers and emulsifiers. The relevance of the problem and the need to identify solutions for improving the stabilization of plant-based oil-in-water emulsions have been established. It has been determined that existing methods for stabilizing plant-based fat emulsions do not fully meet modern requirements for the quality and shelf life of plant-based beverages.

The current state of the global food industry is characterized by a rapid increase in demand for plant-based milk alternatives. In this context, industrial hemp seeds are of considerable importance due to their distinctive protein and fatty acid

composition and ratio. However, the main technological challenge in producing hemp-based emulsions is their pronounced tendency toward rapid aggregation and sedimentation of the dispersed phase. Traditional approaches to solving this problem usually involve the addition of exogenous stabilizers and emulsifiers, which conflicts with current requirements for product composition and necessitates the search for innovative methods of physical treatment that enable the internal resource potential of the raw material to be used as fully as possible to ensure emulsion stability.

It has been proven that one effective approach to solving the stabilization problem is the application of ultrasonic cavitation treatment to a hemp-seed-based oil-in-water emulsion. The use of this treatment in plant-based beverage production provides not only mechanical dispersion of the fat phase but also initiates mechanochemical activation of proteins. The energy of the cavitation field causes edestin molecules to unfold, which significantly improves their adsorption capacity and promotes the formation of stable protective layers at the oil-water phase interface.

The first chapter evaluates the raw materials and the specific features of the technological process for producing emulsion systems based on a review of current Ukrainian and international studies. The conducted analysis confirmed the relevance of the problem and the need to identify solutions for improving the stabilization of oil-in-water dispersed systems. This need arises from the fact that existing stabilization methods do not fully meet modern requirements for the quality and shelf life of plant-based beverages, primarily because they require the use of auxiliary stabilizers and emulsifiers.

The systematic review of the properties, parameters, and characteristics of the influence of existing ingredients on the production process of a plant-based beverage made it possible to substantiate the selection of hemp seeds of the Hlesiia variety as an ingredient. The technology of ultrasonic cavitation treatment of Hlesiia hemp seeds was substantiated for theoretical and experimental studies. The aim and objectives of the research were formulated.

The second chapter substantiates the research methodology, defines the object and subject of the study, and presents theoretical and experimental methods for investigating the formation and stabilization of emulsion systems. The implementation of the selected methodological tools combines four stages, which are carried out in accordance with the principles of a systems approach.

The first stage of the research involves reviewing and analyzing existing technologies for producing plant-based beverages from various types of raw materials, with an assessment of their advantages and disadvantages. The second stage is devoted to the development of a generalized physical model, on the basis of which analytical studies of the morphological transformation of hemp emulsion under the influence of ultrasound are carried out. This model makes it possible to explain and account for the mechanisms by which a stable dispersed system is formed without the use of auxiliary stabilizers and emulsifiers.

The third and fourth stages provide theoretical and experimental substantiation for the use of industrial hemp seed kernels of the domestically bred Hlesiia variety in the production of plant-based beverages. In addition, algorithms are developed whose application ensures the stability and quality of the process of obtaining a plant-based beverage from industrial hemp seeds of the domestically bred Hlesiia variety without the use of auxiliary additives.

The choice of methods for theoretical studies of the formation and stabilization processes is determined by considering hemp emulsion as a complex multiphase system. Under the influence of ultrasonic cavitation treatment, not only does its dispersed state change significantly, but profound structural and morphological transformations also occur.

The third chapter develops a comprehensive research algorithm aimed at ensuring the kinetic stability of the plant-based emulsion system. Based on a systems approach, a generalized physical model of the morphological transformation and kinetic stability of the nanodispersed phases of hemp emulsion under ultrasonic cavitation is substantiated. Within the implementation of this algorithm, theoretical studies of the cavitation effect on the motion dynamics of hemp emulsion

components were carried out. In particular, mathematical modeling of the dynamics in the “acoustic apparatus - cavitation bubble” system was performed, and the interaction processes between cavitation bubbles and droplets of the lipid phase were investigated. The obtained analytical relationships were used to determine rational modes and parameters of ultrasonic disintegration.

It has been established that the aggregative and kinetic stability of the emulsion is achieved through the synergistic combination of intensive dispersion of the fat phase and structural modification of edestin protein directly under the influence of ultrasound. It has been proven that ultrasound-induced activation and denaturation of edestin cause the release of sulfhydryl groups and the formation of intermolecular disulfide bridges. This directly leads to the formation of a continuous, strong viscoelastic shell around the fat droplets.

A physical and mathematical justification of the optimal droplet size of hemp emulsion was carried out. Based on the conditions of the extended DLVO theory, an analytical relationship for determining the aggregative stability of the beverage, $V_{max} \geq 20k_B T$, was established. The sedimentation stability of the system was confirmed and is explained by the predominance of the energy of thermal Brownian motion over gravitational forces in accordance with Stokes' law.

At the final stage, mathematical modeling of the degree of dispersion was performed on the basis of multifactorial optimization of the product's stability and quality indicators. It was theoretically investigated and experimentally confirmed that the optimal dispersion range of the fat phase is 250-350 nm. It is within this interval that the most rational balance between the physicochemical stability and organoleptic properties of the plant-based beverage is achieved.

The fourth chapter presents the results of experimental studies and scientifically substantiates the feasibility of using industrial hemp seed kernels of the Hlesiia variety as the basic raw material for the production of kinetically stable plant-based beverages. A comprehensive assessment of the influence of the hydromodule on the nutrient composition of the extracts was carried out. Using Harrington's generalized desirability function, it was confirmed through qualimetric

assessment that a hydromodule of 1:8, at which $D = 0,8687$, ensures a balance of organoleptic properties and brings the nutritional value of the dispersed system closer to that of cow's milk with a fat content of 3,2 %.

Based on the results of the multifactorial experiment, mathematical models were developed that adequately describe the patterns of change in the beverage quality indicators depending on the parameters of ultrasonic cavitation treatment. It was established that the response functions for the indicators of physical stability (I_{st}) and chemical safety (TOTOX) are nonlinear and result from the synergistic interaction of power, specific energy, and medium temperature.

It has been experimentally proven that the aggregative stability of the system at the level of 95-97 % is achieved under intensified acoustic treatment, namely at a power of 85-100% and a specific energy of 450-500 kJ/kg. These energy parameters ensure the required dispersion of the fat phase and the unfolding of edestin protein globules, which guarantees high sedimentation stability of the beverage. At the same time, it has been proven that a further increase in energy parameters is technologically impractical.

Particular attention was paid to establishing the limits of technological safety of the process. The analysis of the oxidation index confirmed that exceeding the medium temperature above 45-50 °C under prolonged thermoacoustic treatment initiates chain reactions of auto-oxidation of polyunsaturated fatty acids, with oxidation products accumulating above 9-10 arbitrary units. This substantiates the need for strict temperature control in order to preserve biological value.

Based on the results of the studies, rational operating modes of the ultrasonic system were determined: power - 85-95 %, specific energy - 450-500 kJ/kg, and temperature - 40 °C. These parameters ensure the production of a stable homogeneous beverage with an oxidation index not exceeding 6,5 arbitrary units, thereby forming a reliable scientific basis for the development of regulatory documents and the implementation of the technology in industrial production.

Thus, the dissertation provides scientific substantiation and a solution to an important scientific and practical task: ensuring the kinetic stability of a plant-based

beverage made from hemp seeds of the Hlesiiia variety without the use of exogenous stabilizers and emulsifiers. The technology of ultrasonic cavitation treatment has been developed, and its effectiveness has been theoretically confirmed. This technology provides a synergistic effect through intensive dispersion of the fat phase to the optimal size range of 250-350 nm and targeted structural modification of edestin protein, resulting in the formation of strong protective interfacial shells. Rational modes of ultrasonic treatment have been established, ensuring the high quality and chemical safety of the finished product. The determined parameters constitute a scientific and practical basis for the development of regulatory documents and the introduction of this innovative technology into the industrial production of plant-based beverages.

Keywords: plant-based beverage, hemp seeds, plant-based emulsion, ultrasonic cavitation, edestin protein, hydromodule, physical stabilization, kinetic stability, mathematical modeling, quality indicators, polyunsaturated fatty acids, nutritional value.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України

1. Берник І. М., Драчук І. О. Оцінка та аналіз методів отримання рослинного аналога молока. Здоров'я людини та нації. 2025. Т. 3. № 3. С. 137–148. *(Берник І. М. проведено загальне наукове керівництво, вибір критеріїв оцінки ефективності існуючих технологій. Драчук І. О. проведено аналіз літературних джерел щодо світового досвіду виробництва рослинних аналогів молока, оцінки особливостей техніко-технологічних рішень).*

2. Берник І. М., Драчук І. О. Теоретичні аспекти енергетичної складової ультразвукового диспергування емульсій. Здоров'я людини та нації. 2025. Т. 3. № 4. С. 113–124. *(Берник І. М. здійснено теоретичне обґрунтування характеристик ультразвукового поля. Драчук І. О. проведено моделювання розподілу акустичного тиску та розрахунок зон максимальної інтенсивності кавітації).*

3. Берник І. М., Драчук І. О. Фізична модель формування стабільної харчової матриці конопляної емульсії за ультразвукового кавітаційного впливу. Здоров'я людини та нації. 2026. Т. 4. № 1. С. 139–153. *(Берник І. М. пропозиція наукової ідеї та мети дослідження, визначення основних напрямів роботи. Драчук І. О. розробка теоретичних положень щодо механізму механохімічної активації білка едестину, обґрунтування морфологічної трансформації компонентів під дією ультразвукової кавітаційної обробки).*

4. Берник І. М., Драчук І. О. Моделювання впливу режимів ультразвукової кавітації на якість жирової фази у технології рослинного напою з насіння конопель. Вібрації в техніці та технологіях. 2026. № 1 (120). С. 154–163. *(Берник І. М. здійснено обґрунтування параметрів та методології досліджень. Драчук І. О. проведено експериментальні дослідження та обробку отриманих даних відповідно до методики).*

5. **Драчук І. О.** Дослідження впливу гідромодуля на нутрієнтний склад та кваліметричну оцінку сенсорних властивостей конопляного напою. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 2026. Вип. 2. Ч. 2. С. 49-56.

Тези наукових доповідей

6. Берник І. М., **Драчук І. О.** Енергоефективні ультразвукові кавітаційні технології обробки технологічних середовищ. Енергоощадні машини і технології: VI Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 20–21 травня 2025 року: тези доповіді. Київ, 2025. С. 193–195. (*Берник І.М. визначено актуальність проведення досліджень. Драчук І.О. взято участь у виконанні досліджень, підготовлено матеріали до друку*).

7. **Драчук І. О.** Обґрунтування методики застосування ультразвукової кавітаційної технології для дослідження процесів диспергування емульсії. Інтеграційні та інноваційні напрямки розвитку харчової індустрії: IX Міжнародна науково-практична конференція, м. Черкаси, 18–19 листопада 2025 року: тези доповіді. Черкаси, 2025. С. 49–52.

8. **Драчук І.** Інноваційна технологія виробництва рослинного напою з ядра насіння сорту Глесія. Стратегії, інновації, проблеми підприємництва, торгівлі та маркетингу: II Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Ірпінь, 19 березня 2026 року: тези доповіді. Ірпінь, 2026. С. 153–155.

9. **Драчук І. О.** Моделювання седиментаційної стабільності конопляної емульсії за умов ультразвукової кавітаційної обробки. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: XIV Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 30 квітня – 1 травня 2026 року: тези доповіді. Київ, 2026. С. 272-273.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	18
ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1.	
АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ, ТЕХНОЛОГІЙ ОДЕРЖАННЯ ТА НАУКОВИХ ПІДХОДІВ ДО СТАБІЛІЗАЦІЇ РОСЛИННИХ НАПОЇВ	25
1.1. Сировинні джерела, біологічна цінність та антинутрієнти у виробництві рослинних напоїв	25
1.2. Технологічні аспекти виробництва та механізми стабілізації емульсійних систем рослинних напоїв	30
1.2.1. Аналіз технологічних схем виробництва напоїв із зернової, бобової та олійної сировини	30
1.2.2. Основні технологічні операції виробництва рослинних напоїв та їх вплив на формування органолептичних та фізико- хімічних властивостей	36
1.2.3. Фізико-хімічні механізми дестабілізації жирових емульсій у рослинних напоях	39
1.2.4. Сучасні технологічні підходи та способи стабілізації жирових емульсій у дисперсних системах	44
1.3. Перспективи використання технічних конопель для виробництва функціональних харчових продуктів в Україні	50
Висновки по розділу 1	58
РОЗДІЛ 2	
МЕТОДОЛОГІЯ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	60
2.1. Розробка методології теоретичних та експериментальних досліджень	60
2.2. Об'єкт та предмет дослідження	62

2.3.Методи теоретичних досліджень процесів формування і стабілізації емульсійних систем	63
2.4. Апаратурне оформлення експериментальних досліджень	66
2.5. Методи експериментальних досліджень впливу властивостей насіння конопель на процеси створення рослинного молока	70
Висновки до розділу 2	79
РОЗДІЛ 3	
ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ І ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕМУЛЬСІЙНИХ СИСТЕМ З НАСІННЯ КОНОПЕЛЬ	81
3.1. Розробка алгоритму досліджень забезпечення кінетичної стабільності емульсійної системи	81
3.2. Обґрунтування фізичної моделі морфологічної трансформації та кінетичної стійкості нанодисперсних фаз конопляної емульсії	83
3.3. Теоретичні дослідження процесів кавітаційного впливу на динаміку руху компонентів конопляної емульсії	93
3.3.1 Передумови та допущення	93
3.3.2. Дослідження динаміки системи «акустичний апарат – кавітаційна бульбашка».	94
3.3.3. Математичне моделювання та дослідження процесів взаємодії кавітаційної бульбашки із жировою кулькою	99
3.3.4. Визначення раціональних режимів та параметрів ультразвукової дезінтеграції жирових кульок	102
3.4. Фізико-математичне обґрунтування та визначення оптимального розміру жирових крапель конопляної емульсії	105
3.4.1. Теоретичне обґрунтування та дослідження седиментаційної стабільності емульсії на основі врахування геометричних розмірів жирової кульки	105
3.4.2. Дослідження впливу розмірів жирових крапель конопляної емульсії на агрегативну стійкість емульсії	112

3.5. Математичне моделювання дисперсності жирових кульок на основі багатофакторної оптимізації показників стабільності та якості	119
Висновки до розділу 3	125
РОЗДІЛ 4	
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЦЕПТУРНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЯКІСТЬ ТА СТАБІЛЬНІСТЬ НАПОЮ З НАСІННЯ КОНОПЕЛЬ	127
4.1. Обґрунтування вибору та технологічна оцінка сировини для виробництва рослинного напою	127
4.2. Дослідження впливу гідромодуля на нутрієнтний склад та кваліметричну оцінку сенсорних властивостей конопляного екстракту	129
4.3. Дослідження впливу параметрів ультразвукового оброблення на стабільність та показники якості конопляного напою	138
4.3.1. Вплив параметрів процесу на середній діаметр жирових кульок	138
4.3.2. Закономірності зміни індексу стабільності конопляної емульсії	146
4.3.3. Оцінка показників окиснення при різних режимах впливу	152
4.4. Розробка технології виробництва рослинного напою з насіння конопель сорту Глесія	159
Висновки до розділу 4	161
ВИСНОВКИ	164
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	167
ДОДАТКИ	191

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

A –амплітуда коливань;

f – частота коливань;

h - середня відстань між поверхнями часток у монодисперсній системі

$V_{\text{заг}}$ – сумарна потенційна енергія взаємодії;

V_R – енергія електростатичного відштовхування;

V_S – енергія просторового відштовхування;

V_A – енергія молекулярного притягання.

kT - одиниця енергії теплового руху (добуток константи Больцмана на температуру)

ДЛФО - теорія Дерягіна-Ландау-Фервея-Овербека (фундаментальна теорія стійкості);

ζ – електрокінетичний потенціал;

δ - товщина адсорбційного шару едестину;

d - діаметр жирових кульок;

$A(d)$ - індекс агрегативної стабільності, який враховує енергію взаємодії часток з урахуванням стеричного бар'єра активованого едестину;

$K(d)$ - індекс кінетичної стабільності, що характеризує стійкість системи до седиментаційного розшарування за законом Стокса;

$B(d)$ - індекс білизни, визначений за інтенсивністю світлорозсіювання часток жиру;

ТГК - тетрагідроканабінол.

ВСТУП

Актуальність теми. Виробництво рослинних напоїв корелює з глобальною тенденцією до скорочення споживання продуктів тваринного походження відповідно до Цілей сталого розвитку. Аналіз стійких моделей продовольчого споживання свідчить, що цей процес відбувається в єдиному векторі з трансформацією харчової індустрії. Зазначена трансформація супроводжується стійким зміщенням споживчого попиту в бік продуктів із максимально натуральним складом, що нерозривно пов'язує концепцію здорового харчування з принципами «чистої етикетки» (clean labels).

Розвиток світової індустрії напоїв на рослинній основі перебуває на етапі безперервного розширення. За прогнозами очікується, що обсяг його зросте з 36,76 млрд. дол. США у 2025 році до 117,64 млрд. дол. США до 2034 року. Для українських виробників та науковців така динаміка відкриває перспективи для розробки продуктів на основі локальної сировини, здатної конкурувати за якісними характеристиками на міжнародному рівні.

Рослинні аналоги молока зазвичай розробляються таким чином, щоб максимально відтворити зовнішній вигляд, смаковий профіль та термін зберігання традиційного коров'ячого молока. Однак, на практиці кожен з них має свої унікальні властивості, які залежать від конкретних інгредієнтів та технологічних особливостей виробництва. Разом з тим, наявні на ринку напої не повною мірою задовольняють зазначені вимоги споживачів, що потребує продовження досліджень у напрямі вдосконалення процесів стабілізації та зберігання рослинних напоїв. Одним із напрямків вирішення таких завдань є застосування ультразвукової кавітаційної технології за використання у якості сировини насіння конопель.

Ультразвукова кавітація, порівняно з традиційними фізичними способами обробки, має низку суттєвих технологічних переваг, що є результатом комплексного впливу акустичної кавітації, локального тиску та акустичних течій. Їхній комплексний вплив дозволяє значно інтенсифікувати

процеси диспергування та стабілізації рослинної емульсійної системи завдяки розкриттю нативного стабілізуючого потенціалу сировини.

Отже, дослідження і розробка високоефективних процесів формування кінетично стійких емульсій на основі лущеного насіння конопель із застосуванням ультразвукової кавітації є актуальним та перспективним напрямом для індустрії рослинних напоїв.

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

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до напрямів науково-дослідних робіт кафедри технології м'ясних, рибних та морепродуктів Національного університету біоресурсів і природокористування України в межах теми «Наукове обґрунтування створення комплексу технологій харчових продуктів та методів проектування раціонів харчування для військовослужбовців» (номер державної реєстрації 0123U101493). Внесок здобувача полягає у розробці технології та стабілізації високопоживних рослинних аналогів молока на основі конопляного насіння для їх подальшого використання у спеціалізованих раціонах.

Мета та завдання дисертаційної роботи. Метою роботи є наукове обґрунтування та удосконалення технології одержання рослинного напою з насіння конопель шляхом диспергування ліпідної фракції та механохімічної активації білкових компонентів сировини під дією ультразвукової кавітації для забезпечення тривалої кінетичної стійкості та підвищення якості готового продукту.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі **завдання**:

- здійснити огляд та аналіз існуючих технологій одержання та наукових підходів до стабілізації рослинних напоїв;
- визначити методологію та методи теоретичних та експериментальних досліджень процесів формування і стабілізації емульсійних систем;

- розробити фізичну модель морфологічної трансформації компонентів конопляної емульсії за умов високоінтенсивного ультразвукового впливу;
- виконати математичне моделювання та чисельні дослідження процесів взаємодії кавітаційної бульбашки із жировою кулькою для ідентифікації раціональних режимів ультразвукової кавітаційної обробки;
- здійснити фізико-математичне обґрунтування оптимального розміру жирових крапель конопляної емульсії для забезпечення її агрегативної та седиментаційної стабільності з використанням положень розширеної теорії ДЛФО та закону Стокса;
- провести багатофакторну оптимізацію параметрів процесу та розробити технологічні рекомендації щодо отримання стабільного напою із заданими показниками якості;
- дослідити вплив гідромодуля на нутрієнтний склад та кваліметричну оцінку сенсорних властивостей конопляного екстракту;
- застосувати методику багатофакторного експерименту та дослідити вплив параметрів ультразвукової дії на середній діаметр жирових кульок, індекс стабільності та хімічну безпеку ліпідної фази.

Об’єкт дослідження – процес ультразвукової кавітаційної стабілізації рослинного напою з лущеного насіння конопель.

Предмет дослідження – механізми морфологічної трансформації компонентів сировини, режими ультразвукової обробки та технологічні параметри забезпечення кінетичної стійкості і якості напою.

Методи дослідження - фізико-математичне моделювання процесів кавітації та стабілізації, математико-статистичний аналіз результатів експериментів, стандартизовані фізико-хімічні та кваліметричні методики оцінки якості і властивостей сировини та рослинного напою. Обробка експериментальних даних та розрахунки виконувалися із застосуванням програмних середовищ Mathcad та MS Excel.

Наукова новизна отриманих результатів.*Вперше:*

– обґрунтовано фізичну модель стабілізації рослинних напоїв на основі насіння конопель, яка базується на синергії процесів тонкого диспергування ліпідної фракції та механохімічної активації білкових компонентів під дією ультразвукової кавітації;

- одержано емпіричні математичні моделі процесу ультразвукової стабілізації у вигляді рівнянь квадратичної регресії, що пов'язують технологічні параметри з показниками фізичної стабільності та хімічної безпеки жирової фази.

Вдосконалено:

– методи оцінки процесів взаємодії кавітаційної бульбашки із жировою краплею;

- методику багатофакторної оптимізації дисперсності жирової фази шляхом застосування узагальненої цільової функції, що інтегрує індекси агрегативної та кінетичної стійкості з показником близьки.

Отримало подальшого розвитку:

– методи дослідження ефективного використання ультразвукової технології для рішення завдань стабілізації рослинного напою;

– застосування положень розширеної теорії ДЛФО та закону Стокса для опису агрегативної та кінетичної стійкості рослинних емульсій.

Практичне значення одержаних результатів:

– встановлено раціональні параметри ультразвукової кавітаційної обробки (інтенсивність - 85–95 %, питома енергія – 450-500 кДж/кг, температура - до 40 °С), що забезпечують середній діаметр жирової фази на рівні 250-350 нм та високу агрегативну стійкість рослинного напою;

– оптимізовано рецептурний склад напою на основі ядра насіння конопель сорту Глесія за гідромодуля 1:8, що забезпечує отримання екстракту з нутрієнтним профілем та органолептичними показниками, максимально наближеними до коров'ячого молока;

– розроблено алгоритми розрахунку параметрів нейтральної плавучості та агрегативної стійкості, що дозволяють прогнозувати тривалість збереження гомогенності напоїв залежно від концентрації білка та ступеня дисперсності;

– результати досліджень впроваджено в освітній процес кафедри технології м'ясних, рибних та морепродуктів Національного університету біоресурсів і природокористування України (м. Київ) та апробовано в умовах ТОВ «Брусилівський маслозавод», що підтверджено актами виробничих випробувань.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати, що відображені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто за методичної та наукової підтримки к. с.-г. н., професора Слободянюк Н. М. та д.т.н., професора Берник І.М. Автором проведено аналіз науково-технічної літератури за результатами якого обґрунтовано актуальність та визначено напрями досліджень щодо використання насіння конопель у технології рослинних напоїв. Розроблено фізичну та математичну моделі морфологічної трансформації і кінетичної стійкості конопляної емульсії під дією ультразвукової кавітації. Здобувачем проведено експериментальні дослідження, зокрема: досліджено вплив гідромодуля на нутрієнтний склад та проведено кваліметричну оцінку із використанням функції бажаності Харрінгтона; встановлено закономірності зміни індексу стабільності та середнього діаметра жирових кульок залежно від параметрів ультразвукової обробки; здійснено оцінку хімічної стабільності ліпідної фази та визначено температурно-енергетичні режими процесу. Аналіз результатів, узагальнення висновків та підготовка наукових публікацій за темою дослідження здійснені здобувачем особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на: Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні підходи до виробництва у тваринництві, харчовій галузі та ветеринарній практиці» (м. Вінниця, 2025 р., ВНАУ); IX Міжнародній

науково-практичній конференції «Інтеграційні та інноваційні напрямки розвитку харчової індустрії» (м. Черкаси, 2025 р., ЧДТУ); III Всеукраїнській науково-практичній конференції «Стратегії, інновації, проблеми підприємництва, торгівлі та маркетингу» (м. Ірпінь, 2026 р., ВСП «ІФК НУБІП України»); XIV Міжнародній науково-практичній конференції вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства» (м. Київ, 2026 р., НУБІП України).

Публікації. Основні положення дисертаційного дослідження висвітлено у 9 наукових працях, з яких 5 статей у наукових фахових виданнях України та 4 тези наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 196 сторінок. Робота містить 21 таблицю та 41 рисунок. Список використаних джерел становить 186 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ, ТЕХНОЛОГІЙ ОДЕРЖАННЯ ТА НАУКОВИХ ПІДХОДІВ ДО СТАБІЛІЗАЦІЇ РОСЛИННИХ НАПОЇВ

1.1. Сировинні джерела, біологічна цінність та антинутрієнти у виробництві рослинних напоїв

Головним завданням під час формування рецептурного складу рослинних напоїв є максимальне наближення їхнього нутрієнтного профілю та структурно-реологічних властивостей до традиційного коров'ячого молока [1, 2]. Варто зазначити, що колоїдна природа коров'ячого молока відіграє вирішальну роль у досягненні його бажаних якісних характеристик, оскільки жирові глобули та міцели казеїну забезпечують його характерний зовнішній вигляд і кремоподібну текстуру [3].

Разом з тим, продукти на рослинній основі виступають цінним джерелом макро- та мікронутрієнтів, зокрема рослинних білків, вуглеводів, харчових волокон, вітамінів, мінеральних речовин, а також ліпідів із високим вмістом незамінних ненасичених жирних кислот [4, 5]. З фізико-хімічної точки зору, формування колоїдної структури таких напоїв залежить від нативних властивостей сировини. Багато їстівних рослин формують спеціалізовані тканини для накопичення ліпідів, що слугують джерелом енергії та будівельного матеріалу для біосинтезу [6]. У клітинній структурі рослин ці ліпіди локалізовані у вигляді олеосом - природних колоїдних частинок розміром від 0,2 до 2 мкм. Вони складаються з тригліцеридного ядра вкритого фосфоліпідною оболонкою з вбудованими білками [7].

Враховуючи зазначену мікроструктуру, створення високоякісних рослинних напоїв вимагає ретельного підбору сировини та оптимізації параметрів технологічного процесу. На сьогодні ринок пропонує широкий асортимент рослинних напоїв, що відрізняються за базовим інгредієнтом [8].

Попри відсутність уніфікованої класифікації, залежно від джерела походження сировини їх умовно поділяють на 5 основних груп (рис. 1.1) [9].

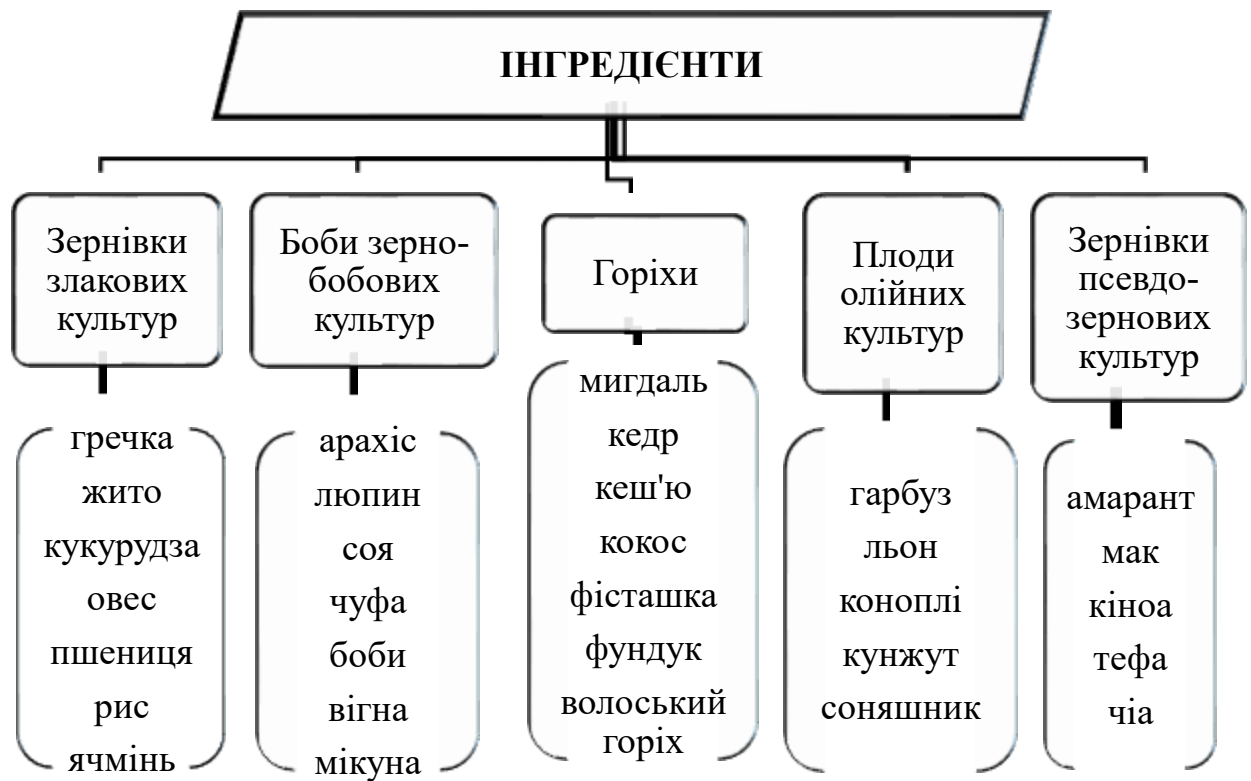


Рисунок 1.1. Класифікація рослинних напоїв за видом основної сировини

Рослинні аналоги молока характеризуються широким спектром фізико-хімічних та поживних властивостей, які безпосередньо залежать від виду використаної сировини [10-13]. Проведені систематизація та авторський перерахунок нутрієнтного складу (табл. 1.1) дозволили встановити значну гетерогенність хімічного профілю рослинних альтернатив порівняно з еталонними показниками традиційного коров'ячого молока.

Встановлено, що за вмістом білка лише бобові напої - соєвий (3,38 г/100 г) та гороховий (3,33 г/100 г) - є біологічно еквівалентними цільному молоку (3,20 г/100 г), тоді як більшість горіхових аналогів характеризуються вираженим протеїновим дефіцитом, що становить лише 0,4-0,5 г білка на 100

г продукту [14, 15]. Такий низький вміст макронутрієнтів у популярних видах молока (мигдальне, кеш'ю) обмежує їхню здатність повноцінно конкурувати з традиційними молочними продуктами за поживним профілем.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика нутрієнтного складу рослинних напоїв та коров'ячого молока

Тип напою	Калорійність (ккал)	Білок (г)	Насичені жири (г)	Цукри (г)	Натрій (мг)
Молоко коров'яче (цільне)	61,0	3,20	1,90	4,80	44,0
Гороховий	37,5	3,33	0,29	1,25	50,0
Соевий	49,2	3,38	0,33	2,13	39,6
Суміш бобові+горіхи	40,8	3,75	0,21	1,04	79,2
Вівсяний	50,0	0,83	0,21	3,33	41,7
Мигдальний	27,5	0,54	0,13	1,50	48,8
Рисовий	52,1	0,33	0,08	3,75	41,7
Кокосовий	23,8	0,04	1,67	0,75	35,4
Кеш'ю	22,9	0,46	0,29	0,33	41,7
Фундуковий	29,2	0,42	0,21	3,04	37,5

На сучасному ринку є напої з вищим або нижчим загальним вмістом жиру як для молока, так і для рослинних напоїв. Загальний вміст ліпідів має значення, як з точки зору його впливу на калорійність, так і на біологічну цінність [16, 17]. При цьому рослинні замінники мають суттєві переваги перед коров'ячим молоком за показниками ліпідного складу. Зокрема, більшість видів продукту містять у 6-10 разів менше насичених жирів порівняно з цільним коров'ячим молоком (1,90 г/100 г) та характеризуються повною відсутністю холестерину, що є дуже важливим для дієтичного харчування та

профілактики серцево-судинних захворювань [18, 19]. Винятком є кокосовий напій, де насичені жири становлять до 90% ліпідної фракції (1,67 г/100 г).

Крім того, на відміну від зернових напоїв (наприклад, з рису чи вівса), які мають підвищений вміст вуглеводів (3,33–3,75 г/100 г), напої на основі горіхів відзначаються низьким вмістом природних цукрів. Ця особливість робить їх перспективними для дієтичного харчування, зокрема для споживачів із порушеннями вуглеводного обміну [20, 21].

З погляду функціонального харчування, особливу увагу слід приділити мінорним компонентам та специфічній якості білка. Так, напої на основі льону та сої є цінними джерелами корисних для серця поліненасичених жирних кислот (ω -3) та захисних фотохімічних речовин [22, 23]. До того ж, на відміну від традиційних молочних продуктів, рослинні альтернативи переважно містять харчові волокна, а використання таких культур, як соя або кіноа, забезпечує кінцевий продукт повноцінним профілем незамінних амінокислот [24].

Загалом, рослинні напої характеризуються варіативністю за вмістом макро- та мікроелементів, а також наявністю специфічних біоактивних речовин і антиаліментарних факторів [25]. Серед цінних біоактивних сполук соєві напої містять ізофлавіони та фітостероли, мигдалеві - α -токоферол та арабінозу, а вівсяні - β -глюкан.

У рослинній сировині присутні також антинутрієнти (табл. 1.2), які в процесі переробки можуть потрапляти в готові напої. Зазначені сполуки здатні спричиняти небажані ефекти, зокрема перешкоджати належному засвоєнню макро- та мікронутрієнтів. Слід зауважити, що окремі технологічні стадії (наприклад, термічна обробка чи замочування сировини) дозволяють суттєво знизити концентрацію антиаліментарних компонентів або повністю їх інактивувати [26]. З огляду на це, актуальними є подальші дослідження, спрямовані на розробку ефективних технологічних методів для мінімізації впливу антиаліментарних факторів, підвищення біодоступності нутрієнтів та покращення загальної сенсорної прийнятності таких напоїв [27, 28].

Класифікація та фізіологічний вплив антинутриєнтів рослинної сировини [27, 28]

Група антипоживних речовин	Основні джерела сировини	Механізм впливу на організм
Мінерал-зв'язуючі сполуки (фітати, оксалати)	Горіхи, насіння, злакові культури	Зниження розчинності та біодоступності есенціальних мінералів
Інгібітори протеолізу (інгібітори трипсину та протеази)	Бобові (соє, нут), зернові культури	Порушення гідролізу білків, зниження ступеня засвоєння амінокислот
Інгібітори амілолізу (Інгібітори α -амілази)	Насіння (гарбуз, кунжут, соняшник)	Пригнічення активності ферментів слини та підшлункової залози
Глікопротеїни (лектини, гемаглютиніни)	Пшениця, бобові, кіноа, картопля	Гальмування всмоктування глюкози, зниження енергетичної цінності їжі
Глікозиди (сапоніни)	Бобові, псевдокрупи, пасльонові	Погіршення органолептики (гіркота), порушення всмоктування вітамінів і нутрієнтів у кишечнику

Поряд із цим, комбінування (купажування) різних видів сировини виступає перспективним технологічним підходом у розробці рослинних аналогів молока [29, 30]. Поєднання різноманітних рослинних джерел дозволяє моделювати нутрієнтний профіль, максимально наближений до традиційного коров'ячого молока. При цьому необхідно суворо враховувати режими застосованої обробки, масові частки кожного рецептурного компонента та внесення інгредієнтів для формування сенсорних властивостей [31].

Таким чином, проведений аналіз засвідчує, що харчова цінність та споживчий профіль рослинних напоїв безпосередньо залежать від виду базової сировини та її нативних фізико-хімічних властивостей. При цьому ефективне використання сировинного потенціалу вимагає розв'язання низки

складних технологічних завдань. Це зумовлює об'єктивну необхідність детального розгляду сучасних апаратурно-технологічних рішень у виробництві рослинних напоїв.

1.2. Технологічні аспекти виробництва та механізми стабілізації емульсійних систем рослинних напоїв

1.2.1. Аналіз технологічних схем виробництва напоїв із зернової, бобової та олійної сировини

Для аналізу технологій виготовлення рослинних аналогів молока доцільно розглянути типові апаратурно-технологічні схеми їх виробництва. На рисунку 1.2 наведено схему отримання вівсяного напою з вмістом сухих речовин на рівні 25 %.

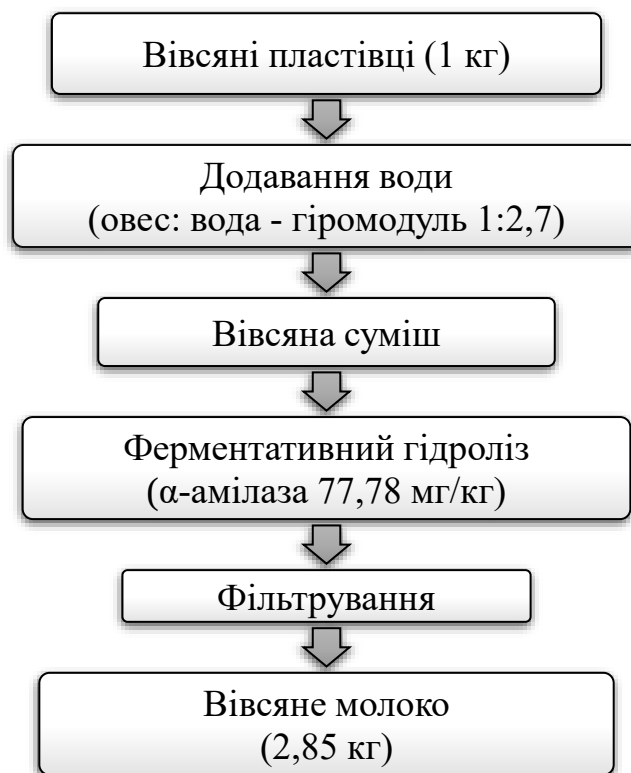


Рисунок 1.2. Блок-схема приготування вівсяного молока [32]

Як свідчать дані, технологічний процес розпочинається з підготовки основної сировини (вівсяних пластівців) та її гідратації. Додавання води

здійснюється із дотриманням гідромодуля 1:2,7. Ключовою стадією процесу є ферментативний гідроліз отриманої дисперсії за допомогою ферменту α -амілази. Застосування ферментного препарату дозволяє досягти бажаних реологічних та органолептичних характеристик шляхом розщеплення полісахаридів крохмалю. Завершальним етапом є фільтрування суспензії з вилученням нерозчинного осаду, у результаті чого з 1 кг вихідної сухої сировини отримують 2,85 кг цільового продукту.

За останні десятиліття спостерігається зростання обсягів виробництва та споживання соєвих напоїв, що зумовлено їхньою високою нутрієнтною цінністю та впливом на здоров'я людини [33]. За даними дослідників [34], окрім відсутності лактози та холестерину, амінокислотний профіль білкової фракції соєвого напою є максимально наближеним до традиційного коров'ячого молока.

З метою інактивації ферменту ліпоксигенази та мінімізації специфічного «бобового» присмаку в сучасних технологіях застосовують вакуумну дезодорацію за високих температур, метод гарячого екстрагування, лужне замочування, а також метод попереднього бланшування (метод Іллінойсу), апаратурно-технологічна схема якого наведена на рисунку 1.3.

Аналіз представленої блок-схеми свідчить, що приготування соєвого напою за методом Іллінойсу розпочинається з підготовки сухих цілих соєвих бобів. Важливим етапом є їх лужне замочування у 0,5 % розчині бікарбонату натрію 10 годин за гідромодуля 1:3. Потім проводять бланшування для інактивації антиаліментарних факторів. Після зливання зайвої води сировина піддається механічному подрібненню. Отриманий шлам проходить інтенсивну ультрависокотемпературну обробку з подальшою двоступеневою гомогенізацією. Наступні технологічні операції включають додавання води для регулювання вмісту білка та нейтралізацію середовища розчином соляної кислоти.

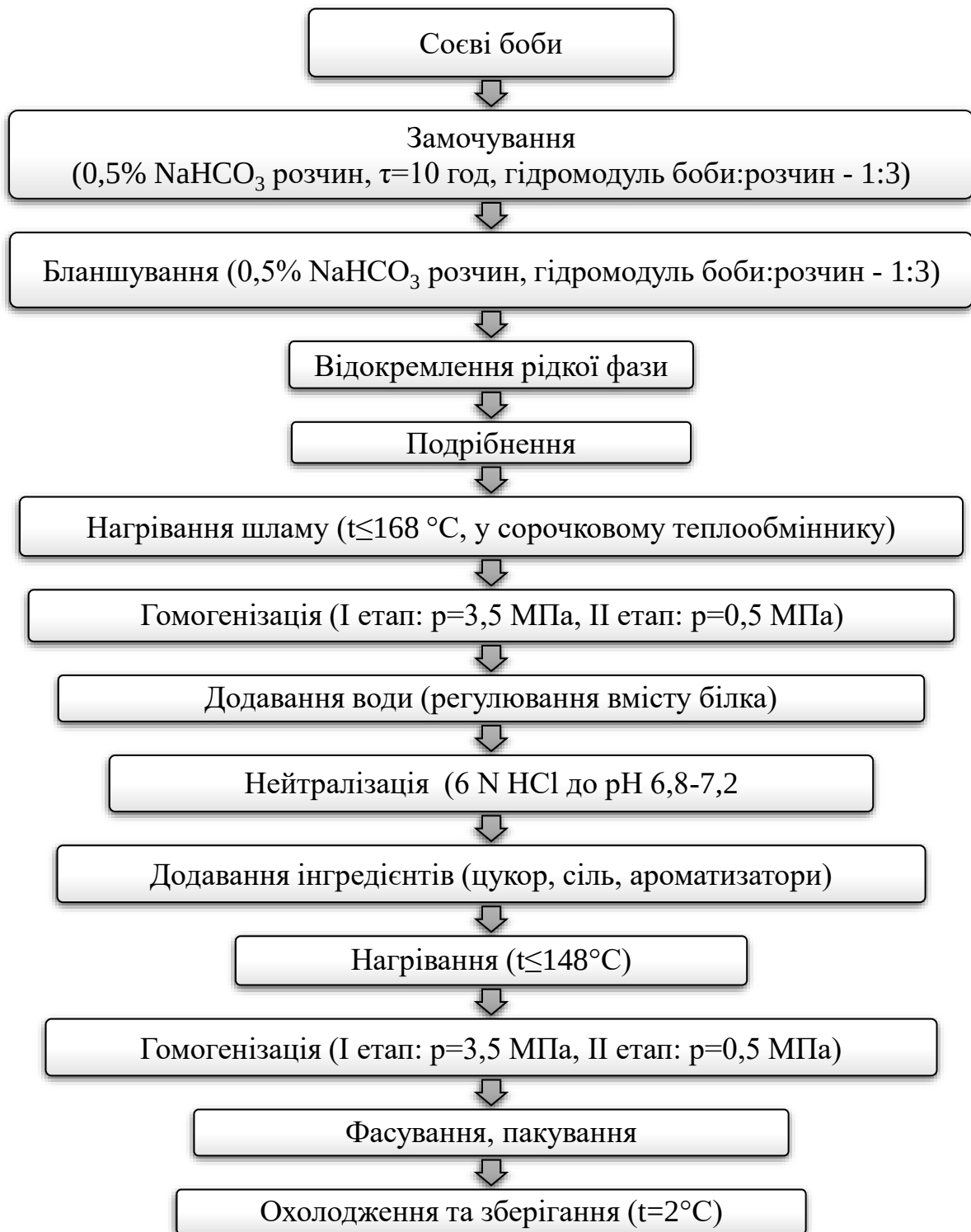


Рисунок 1.3. Блок-схема процесу приготування соєвого напою [34]

Після внесення рецептурних інгредієнтів суміш піддають термічній обробці та повторній двоступеневій гомогенізації для забезпечення агрегативної стійкості готового продукту. Завершується технологічний цикл

процесами фасування, пакування та охолодження напою до температури зберігання.

Серед олійних культур перспективною сировиною для виробництва рослинних аналогів молока є арахіс. Його харчова цінність зумовлена наявністю комплексу біологічно активних речовин. Зокрема, арахіс є цінним джерелом рослинних білків, ліпідів, харчових волокон, вітамінів, мінералів, антиоксидантів та фітостеролів. Вживання продуктів на його основі сприяє нормалізації глікемічного профілю та має загальні геропротекторні властивості. Апаратурно-технологічну схему процесу приготування арахісового напою наведено на рисунку 1.4.

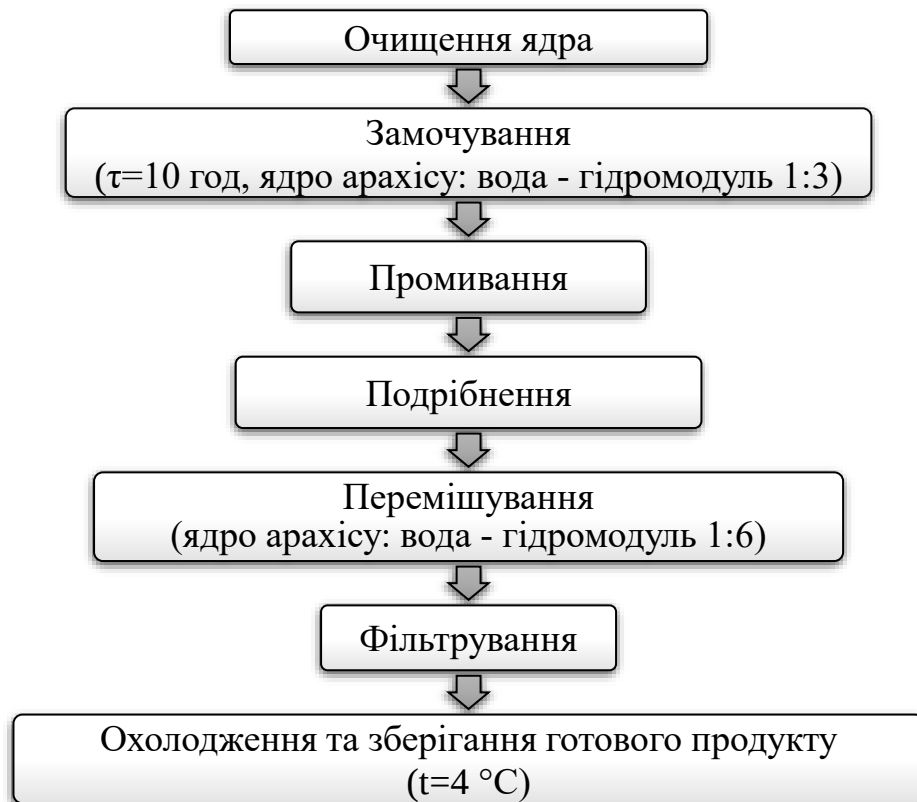


Рисунок 1.4. Блок-схема процесу приготування арахісового напою

Відповідно до рис. 1.4, технологічний процес розпочинається з очищення цілих ядер арахісу. Наступним етапом є гідратація сировини, шляхом замочування ядра у воді протягом 10 годин. Потім відокремлюють відпрацьований розчин, а сировину ретельно промивають. Після чого арахіс

подрібнюють та інтенсивно перемішують із водою (за гідромодуля 1:6) для забезпечення максимального вилучення розчинних сухих речовин та ліпідної фракції у рідке середовище. Отриману суспензію фільтрують для відокремлення нерозчинного залишку. Цільовий продукт охолоджують та зберігають у герметичному пакуванні за температури 4 °С. Розглянута технологія мокрого подрібнення є найпоширенішим та традиційним методом отримання арахісових напоїв. Водночас використовують і альтернативні технологічні підходи, зокрема з використанням арахісового борошна як базового інгредієнта.

Використання кунжуту для виробництва рослинних напоїв є ефективним напрямом раціонального використання цієї цінної харчової сировини. Апаратурно-технологічна схема отримання кунжутного напою (рис. 1.5), включає комплекс підготовчих та основних операцій, які забезпечують максимальну екстракцію цільових нутрієнтів та нейтралізацію антиаліментарних факторів.

Відповідно до наведеної блок-схеми, технологічний процес розпочинається з інспекції насіння кунжуту. Наступним етапом є обсмажування сировини, що сприяє формуванню органолептичного профілю. Потім проводять замочування насіння в лужному середовищі з дотриманням гідромодуля 3:1 для розм'якшення клітинних структур та зниження вмісту фітатів і оксалатів. Після проміжного промивання сировину піддають бланшуванню, що додатково інактивує ферменти. Відпрацьовану воду видаляють, а кунжут повторно промивають. Ключовою стадією процесу є механічне подрібнення сировини у водному середовищі із подальшим екстрагуванням сухих речовин. Отриману суспензію фільтрують для відокремлення нерозчинного залишку. Рідку фазу нагрівають до 50–55 °С для зниження кінематичної в'язкості перед етапом гомогенізації, яка проводиться за робочого тиску 6 МПа для забезпечення агрегативної стійкості дисперсії. Після фасування продукту в споживчу тару проводять пастеризацію з наступним охолодженням напою та його зберіганням за температури 4 °С.

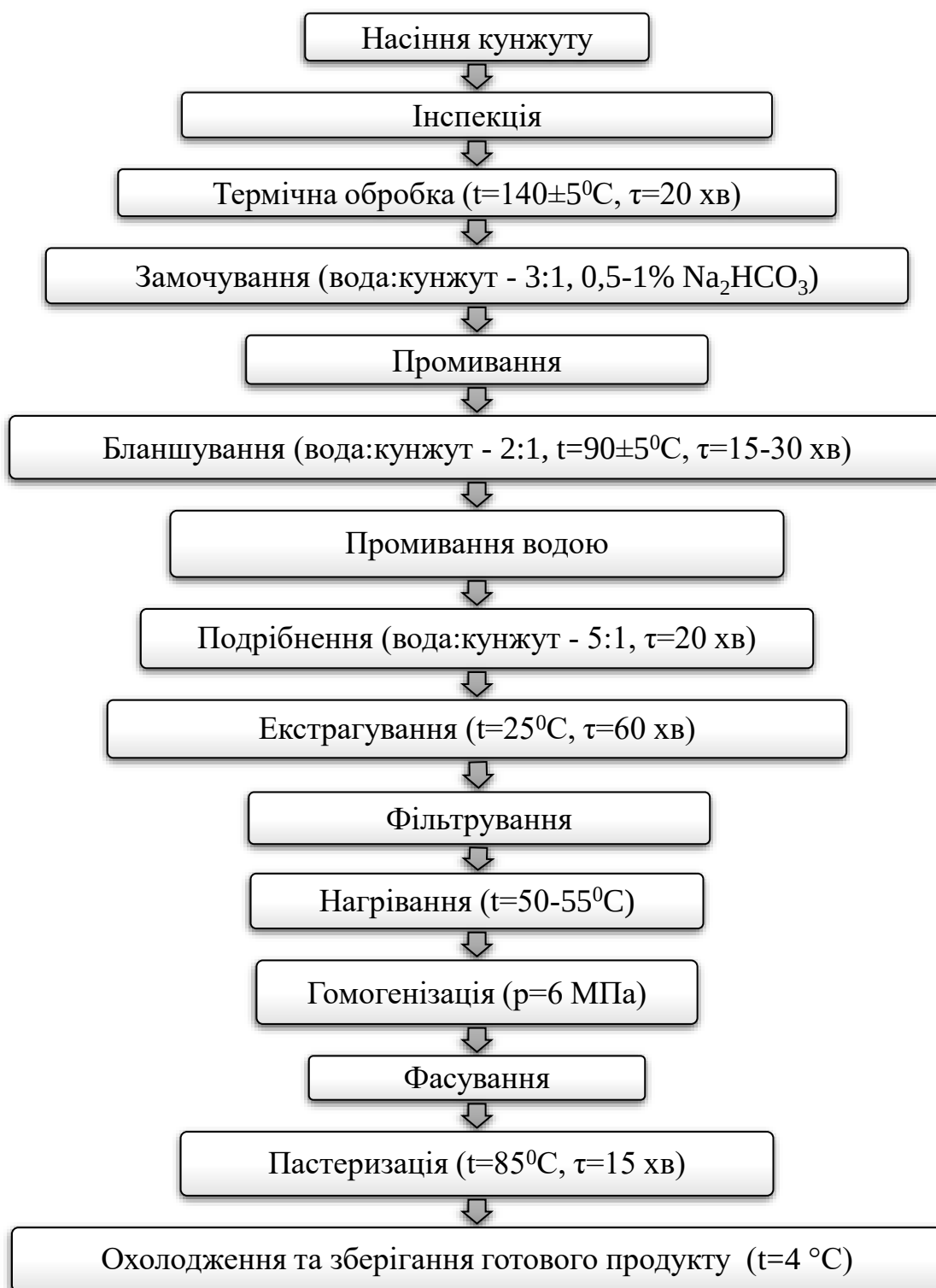


Рисунок 1.5. Блок-схема приготування кунжутного напою

Завдяки високому вмісту повноцінного білка, есенціальних ненасичених жирних кислот та комплексу мінералів, отриманий кунжутний напій є перспективною та високопоживною альтернативою на ринку рослинних аналогів молока.

Проведений аналіз технологічних схем виробництва вівсяного, соєвого, арахісового та кунжутного напоїв свідчить, що кожен вид сировини потребує індивідуального технологічного підходу та специфічних режимів підготовчої обробки. Незважаючи на відмінності реалізації підготовчих стадій для різних культур, їхня подальша переробка базується на принципі цілеспрямованого диспергування нативної структури рослинної сировини з метою формування кінетично стабільної емульсійної системи. Це зумовлює необхідність переходу від розгляду окремих схем до детального аналізу універсальних етапів виробничого процесу. Аналіз фізико-хімічних перетворень на кожній стадії переробки є необхідною умовою стабільної якості та тривалого зберігання готового продукту.

1.2.2. Основні технологічні операції виробництва рослинних напоїв та їх вплив на формування органолептичних та фізико-хімічних властивостей

Технологічні аспекти виробництва рослинних напоїв спрямовані на максимальне вилучення цільових компонентів з сировини та отримання напою, який імітує коров'яче молоко за зовнішнім виглядом, хімічним складом та консистенцією [35]. При цьому особливості технологічних рішень та параметри визначаються фізико-хімічними та біологічними властивостями сировини та мають подібність [36]. В роботі [37] встановлено, що отримання рослинного аналога молока відрізняється між собою вибором того чи іншого інгредієнта та застосуванням технологічних операцій. Однак, використовують загальні стадії, які часто використовують у виробничому процесі (рис. 1.6) [38]. До них належать: попередня обробка сировини, подрібнення та екстракція, диспергування та стабілізація, ароматизація та збагачення, пастеризація, пакування та зберігання, а також контроль якості.

Розглянемо стадії виробництва рослинних напоїв. Виробництво починають з очищення та сортування, мета яких видалення механічних домішок та некондиційних елементів.

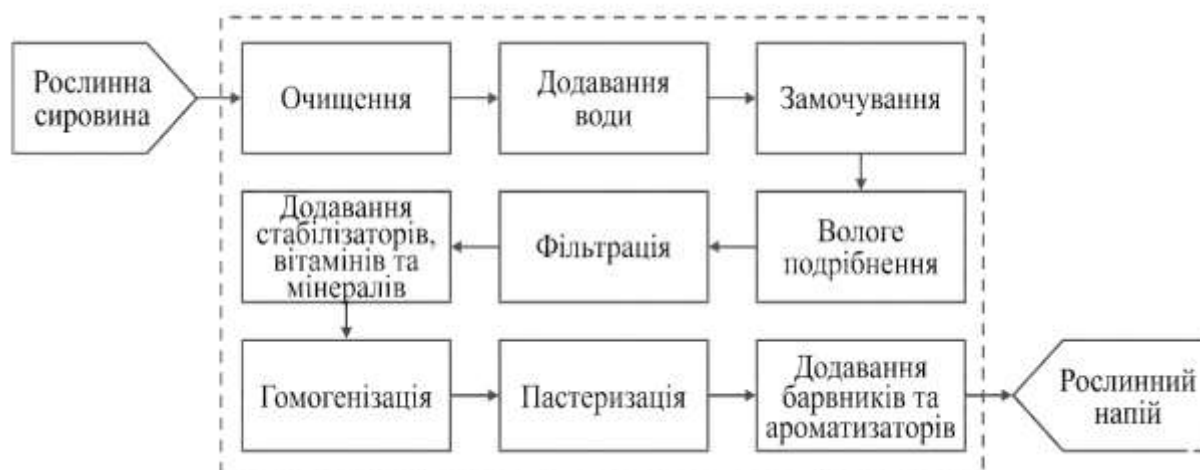


Рисунок 1.6. Стадії виробництва рослинних напоїв [38]

Після чого сировину готують до екстракції шляхом замочування та бланшування. Для замочування використовують підготовлену воду. Цей процес сприяє пом'якшенню, зволоженню та набухання сировини, а також впливає на вміст ферментів, що в цілому полегшує подальшу обробку та допомагає сформувати необхідні фізико-хімічні властивості напою. Для деяких видів сировини, особливо для насіння та горіхів, доцільною є технологічна операція бланшування. Ця операція допомагає зберегти колір, текстуру та поживні властивості сировини. Низкою досліджень також встановлено такі переваги бланшування, як інактивація ферментів, зниження контамінації мікрофлорою [39], зниження вмісту антинутрієнтів і сторонніх присмаків [40], підвищення біологічної цінності готового продукту [41].

Процес подрібнення сировини здійснюється механічними, хімічними, а також ферментативними методами [42]. Деякі новітні технології надтонкого подрібнення, включаючи струменеве, кульове та колоїдне, набувають популярності для рослинних борошняних матеріалів [43]. При цьому застосовують метод мокрого подрібнення шляхом додавання до підготовленої сировини води спочатку грубим подрібненням та наступним тонким, як наслідок, отримують суспензію.

Процес екстрагування є важливим етапом у виробництві рослинних напоїв, оскільки формує органолептичні та фізико-хімічні властивості готового продукту [44]. Ефективна реалізація процесу залежить від клітинної проникності рослинної сировини, а також її дисперсності. Доцільним є врахування дифузійного опору та гідродинамічних властивостей процесу. До техніко-технологічних рішень реалізації процесу, відносяться критерії тривалості, енерговитрат та якість отриманого екстракту [45]. Частки рослинної сировини з екстрагенту відокремлюються за допомогою седиментації, центрифугування або фільтрування. Дисперсна фаза отриманої суспензії містить різноманітні хімічні речовини (жир, білок, клітковина, крохмаль та інші), які мають різний розмір та призводять до дестабілізації системи під час зберігання.

Стабільність готового харчового продукту є обов'язковою сучасною вимогою, яку можна досягти за використання процесу гомогенізації та, за необхідності, стабілізаторів. Процес гомогенізації забезпечує зменшення ступеню неоднорідності розподілу речовин і фаз по всьому об'єму. За допомогою зсувних сил гомогенізація використовується для зменшення розмірів компонентів дисперсної фази в діапазоні від 0,5 до 30 мкм. Гомогенізація під надвисоким тиском є однією з технологій обробки, в результаті якої частинки меншого та більш однорідного розміру можуть бути ефективно використані для покращення стабільності молока. Відповідно до досліджень [46], технологічні параметри стандартні для коров'ячого молока, можуть бути неефективними для рослинного аналога молока через відмінності у мікроструктурі та складі рослинних інгредієнтів. Гетерогенність частинок дисперсної фази у рослинному молоці потребує досліджень, щодо уточнення механізмів та параметрів стабілізації.

Необхідним для гарантування безпеки продукту та подовження його терміну придатності є процеси, які забезпечують зниження мікробного та ферментного навантаження до рівнів, безпечних для споживання [47]. Традиційно набули використання термічні методи, такі як

високотемпературна короткочасна або надвисокотемпературна обробка. Як альтернатива традиційним термічним процесам, можлива обробка високоінтенсивним ультразвуком, мікрохвилями, високим тиском, імпульсним електричним полем, надкритичним вуглекислим газом, ультрафіолетовим випромінюванням та застосування омічного нагрівання [48].

Пакування та зберігання забезпечують підтримку якості та безпеки готового продукту. На цьому етапі обирають відповідні пакувальні матеріали, головне завдання яких - захистити молоко від світла та зовнішніх забруднювачів [49].

Систематизація загальних технологічних етапів дозволяє сформувати послідовність перетворення рослинної сировини на готовий продукт, де кожна стадія відіграє роль у створенні необхідної дисперсності системи. Механічне подрібнення та екстрагування не є достатньою умовою стійкості продукту. У зв'язку з колоїдною природою рослинні напої залишаються термодинамічно нестабільними та схильними до фазового розділення. Саме тому для забезпечення стабільності та якості рослинних напоїв необхідно перейти від технологічного-апаратного опису до аналізу фундаментальних фізико-хімічних закономірностей механізмів седиментації та фазового розділення.

1.2.3. Фізико-хімічні механізми дестабілізації жирових емульсій у рослинних напоях

Зберігання рослинних напоїв може супроводжуватися дестабілізацією їхньої жирової фази. Причиною цьому є процеси гравітаційної седиментації, флокуляції та коалесценції крапель, що зрештою призводить до повного руйнування системи (рис. 1.7) [50]. Ці процеси є послідовними або паралельними етапами руйнування емульсійної системи, що зрештою призводить до розшарування продукту.

Зазначені механізми втрати стійкості жирових емульсій пов'язані з порушенням фізико-хімічної рівноваги в емульсійній системі. Оскільки

жирові емульсії володіють значним запасом надлишкової вільної енергії, система постійно прагне до самочинного переходу у стан з мінімальним енергетичним рівнем [51].

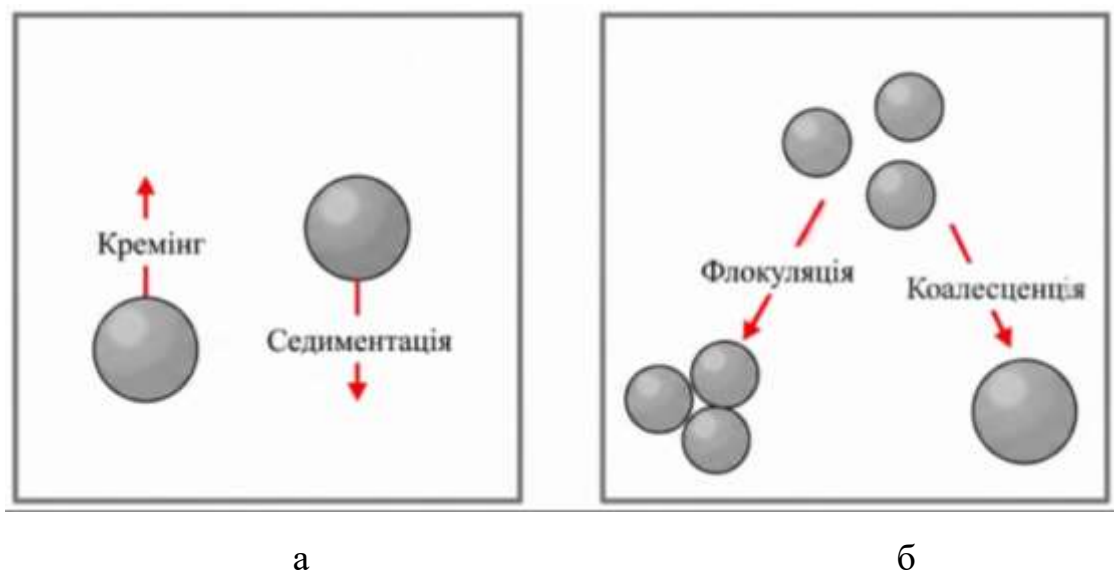


Рисунок 1.7. **Фізико-хімічні чинники порушення стабільності жирових емульсій:** а – гравітаційне розділення, б – агрегація [50]

Розробка ефективних технологічних методів здатних забезпечити тривалу кінетичну стабільність харчових систем полягає у здатності їх протистояти змінам своєї внутрішньої структури на мікро- та макрорівнях. Зокрема, агрегативна стабільність характеризує здатність системи протидіяти зміні розміру часток та їхньому злипанню, що є критично важливим для збереження однорідності продукту [52]. Процес флокуляції відбувається за умови, коли сили притягання між краплями переважають над силами відштовхування. При цьому краплі жиру формують агрегати, зберігаючи свою індивідуальність. Основним наслідком флокуляції є суттєве збільшення розміру часток, що прискорює гравітаційне розділення фаз.

Згідно з положеннями теорії Дерягіна-Ландау-Фервея-Овербека (ДЛФО), агрегативна стійкість дисперсних систем визначається енергетичним балансом міжмолекулярного притягання та відштовхування [53]. Ймовірність

та швидкість агрегації жирових кульок залежать від співвідношення сил Ван-дер-Ваальса та сил відштовхування електростатичної або стеричної природи. Величина сил притягання суттєво зростає при зменшенні відстані між жировими кульками. При цьому сили відштовхування створюють енергетичний бар'єр, який перешкоджає зближенню [54]. У харчових емульсіях цей бар'єр зазвичай формується завдяки створенню подвійного електричного шару на поверхні жирових кульок або внаслідок адсорбції макромолекул білків та полісахаридів, що забезпечують стеричний захист [55].

Відповідно до теорії ДЛФО, ключовим параметром агрегативної стійкості є висота енергетичного бар'єра, емульсійна система має високу стабільність за виконання умови [56]:

$$E_{max} \gg k_B T,$$

де E_{max} – енергетичний бар'єр, k_B – стала Больцмана, T – абсолютна температура.

Такий підхід пов'язаний з тим, що жирові частинки не володіють достатнім рівнем кінетичної енергії для подолання бар'єру. При цьому зміна фізико-хімічних умов середовища, зокрема таких, як зростання іонної сили, зміщення рН до ізоелектричної точки білків або дефіцит стабілізатора, призводить до зниження цього бар'єра. Як наслідок, сили притягання домінують та призводять до процесів агрегації в емульсії.

Таким чином, регулювання стабільності за моделлю ДЛФО полягає в оптимізації висоти енергетичного бар'єра шляхом підбору раціональної концентрації поверхнево-активних речовин та гідроколоїдів [53].

Коалесценція є незворотним процесом дестабілізації, під час якого відбувається злиття менших жирових крапель у більші. Механізм явища полягає у зменшенні загальної площі поверхні розділу фаз, що спричиняє повне руйнування емульсії [57].

Ефективна стабілізація рослинних напоїв досягається шляхом коригування колоїдних взаємодій (табл. 1.3) [57].

**Стратегії підвищення агрегативної стійкості рослинних
аналогів молока [57]**

Тип взаємодії	Стратегія
Стеричне відштовхування	Посилення відштовхування шляхом створення товстішого шару адсорбованих полімерів на поверхні частинок дисперсної фази
Електростатичне відштовхування	Збільшення заряду часток або зниження іонної сили розчину. Досягається регулюванням рівня рН, значення якого повинно бути далі від ізоелектричної точки, та контроль за вмістом солей
Гідрофобне притягання	Мінімізація кількості неполярних ділянок на поверхні часток. Контроль термічної денатурації білків або додавання ПАР для покриття гідрофобних зон
Адсорбційне місткоутворення	Уникнення присутності полімерів, здатних одночасно зв'язуватися з поверхнями кількох часток. Важливо запобігати з'єднанню протилежно заряджених часток через заряджені полімери
Деплеційне притягання	Підтримка концентрації неадсорбованих полімерів нижче критичного рівня, який визначається їхньою молекулярною масою

Таким чином, підвищення агрегативної стійкості рослинних аналогів молока реалізується через інтенсифікацію механізмів відштовхування та мінімізації сил притягання різної природи.

Седиментаційна стабільність визначає стійкість системи до розділення під дією сили тяжіння. Кремування та седиментація відбуваються за відмінності в густині фаз. Оскільки густина жиру зазвичай менша за густину

води, у харчових емульсіях частіше спостерігається кремінг [58]. Такий процес є зворотним оскільки структуру можна відновити перемішуванням.

Швидкість руху сферичної частки в рідкому середовищі описується законом Стокса. Згідно якого розмір крапель має визначальний вплив на стійкість [53]. Підвищення в'язкості зовнішньої фази дозволяє пропорційно зменшити швидкість спливання або осадження крапель [59]. У дослідженнях [58] наведено теоретичний прогноз використання закону Стокса щодо впливу розміру кульок дисперсної фази та в'язкості дисперсійного середовища на стабільність модельного рослинного напою (рис. 1.8).

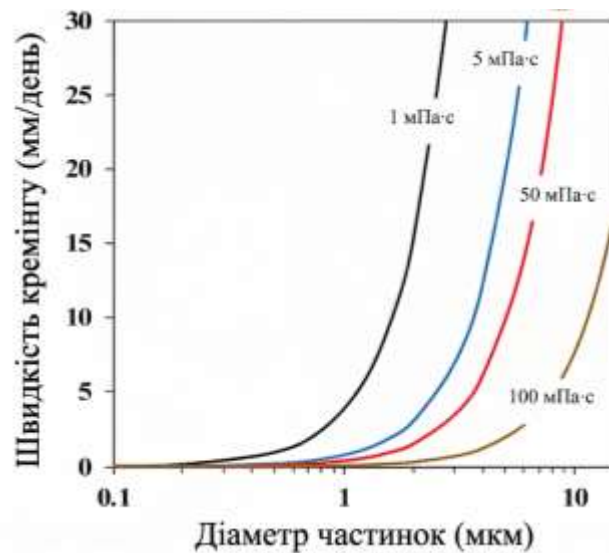


Рисунок 1.8. Кремування рослинного напою залежно від розміру частинок та в'язкості [58]

Аналіз рис. 1.8 свідчить, що швидкість кремування зростає за перевищення діаметра частинок більше 500 нм. Також стійкість емульсії до розшарування залежить від різниці густин її компонентів. Таким чином, керування цими параметрами дозволяє фахівцям впливати на терміни зберігання та якісні характеристики емульсійних систем [53].

Таким чином, теоретичне обґрунтування механізмів дестабілізації за моделями Стокса та ДЛФО дозволили встановити причини втрати стійкості емульсій типу «олія у воді». Стабільність таких систем визначається ступенем

дисперсності жирової фази та формуванням адсорбційних бар'єрів, здатних створити енергетичний поріг, що перевищує критичні значення дестабілізації. Саме тому подальшими дослідженнями є аналіз сучасних методів впливу на міжфазну поверхню розділу в емульсіях типу «олія у воді».

1.2.4. Сучасні технологічні підходи та способи стабілізації жирових емульсій у дисперсних системах

Довготривала стабільність харчових емульсій типу «олія в воді» здійснюється шляхом використанням стабілізаторів та емульгаторів, які здатні адсорбуватися на межі розподілу «олія-вода», знижувати міжфазний натяг та формувати захисну плівку. Ці речовини поділяються на три категорії [60].

Перша категорія - низькомолекулярні емульгатори, до яких належать класичні поверхнево-активні речовини (ПАР), такі як полісорбати, ефіри сахарози та моногліцериди. Вони швидко мігрують до новоутвореної поверхні поділу фаз під час гомогенізації та ефективно знижують міжфазний натяг, полегшуючи розрив крапель. Проте плівки, утворені низькомолекулярними ПАР, часто є відносно тонкими і не завжди забезпечують достатній стеричний захист від коалесценції впродовж тривалого зберігання [60].

Друга категорія - макромолекулярні стабілізатори, які представлені переважно харчовими біополімерами, зокрема білками та полісахаридами. Ці великі молекули здатні формувати товстий, щільний, в'язкоеластичний міжфазний шар навколо крапель жиру. Такий захисний шар забезпечує потужні стеричні перешкоди [61, 62].

Третя категорія - тверді частинки харчового класу. Цей інноваційний клас стабілізаторів використовується для формування специфічного типу дисперсних систем, відомих як емульсії Пікерінга [63].

Рослинні білки дедалі частіше використовуються, як альтернатива тваринним протеїнам та синтетичним ПАР [64, 65]. Механізм адсорбції білків на межі «жир - вода» реалізується через декілька взаємопов'язаних стадій, що визначають агрегативну стійкість емульсій (рис. 1.9).

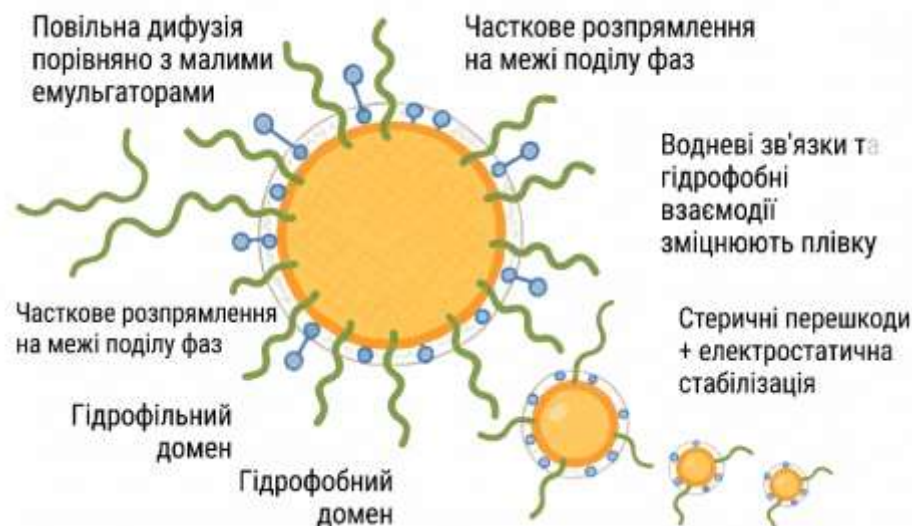


Рисунок 1.9. Механізм дії емульгатора на основі білка [66]

На першій стадії відбувається дифузія глобул з об'єму фази до поверхні. Швидкість цього процесу залежить від концентрації білка та розміру його молекул. На другій стадії відбувається проникнення білка в міжфазний шар, що супроводжується частковим розгортанням компактної структури [67]. Гідрофобні амінокислотні залишки орієнтуються в бік жирової складової, а гідрофільні - в бік води. Після адсорбції молекули білка можуть утворювати нові дисульфідні зв'язки та водневі містки у вигляді суцільної в'язкопружної сітки, яка є механічно міцною, що перешкоджає коалесценції навіть при механічних деформаціях.

Стабільність таких емульсій базується на комбінуванні двох механізмів відштовхування. В основі електростатичної стабілізації білкових емульсій лежить здатність білків, як амфотерних сполук надавати краплям олії однойменного електричного заряду [64, 68, 69]. Механізм стеричної стабілізації базується на взаємодії білкових адсорбційних шарів [68]. Гідратація білків забезпечує формування стійкої водної оболонки навколо жирових глобул та запобігає їхній агрегації. Для підвищення стабільності емульсійних систем використовують метод комбінування білків [70]. При цьому для підвищення технологічної ефективності білкових стабілізаторів набуло використання протеолітичних ферментів [71-73].

У межах стратегії натуралізації харчових продуктів альтернативою синтетичним добавкам виступають гідроколоїди рослинного походження [74, 75]. Товстий міжфазний шар, утворений полісахаридним емульгатором, стабілізує емульсію за допомогою просторових відштовхуючих сил [76, 77]. До основних недоліків використання гідроколоїдів належить їхня низька поверхнева активність порівняно з класичними емульгаторами. Застосування гідроколоїдів потребує точного розрахунку концентрації, оскільки їх надмірна концентрація у дисперсійному середовищі провокує виникнення осмотичного тиску, який змушує краплі жиру зближуватися [78].

В останні роки спостерігається стійке зростання наукового інтересу до емульсій Пікерінга. Це зумовлено їхніми суттєвими технологічними перевагами порівняно з традиційними системами, зокрема винятковою агрегативною стабільністю та широким спектром перспективного застосування [79, 80]. Для стабілізації емульсій Пікерінга використовують тверді частинки таких речовин як полісахариди, білки, ліпіди та безпечні неорганічні частинки, зокрема діоксид кремнію, карбонат кальцію та гідроксиапатит [81]. Згідно з теорією формування міжфазного шару, під дією капілярних сил тверді частки з обмеженою змочуваністю адсорбуються на межі поділу фаз. Це призводить до утворення щільної моно- або багатошарової плівки, яка виконує функцію структурно-механічного бар'єра [82]. Завдяки посиленню стеричного ефекту та оптимізації реологічного профілю поверхневого шару, система набуває підвищеної зсувної міцності та агрегативної стійкості [83]. Розміри, властивості та методи приготування відрізняються через різноманітність твердих частинок, що використовуються для приготування емульсій Пікерінга [84, 85]. Основними бар'єрами для промислової реалізації харчових емульсій Пікерінга є їхня висока вартість і складність технологічного масштабування.

Високоенергетичні методи емульгування є найбільш традиційним, масштабованим та розповсюдженим підходом у харчовій галузі. Принцип цих методів полягає у використанні потужних механічних пристроїв для

генерування інтенсивних сил зсуву, турбулентності, кавітації та ударної дії, які руйнують великі краплі жиру до значно менших розмірів [86-88].

Роторно-статорні системи є базовим обладнанням для підготовки харчових емульсій з середньою або високою в'язкістю та великою об'ємною часткою дисперсної фази. Принцип дії базується на обертанні ротора з високою швидкістю всередині нерухомого статора з мінімальним зазором між ними. Рідина, потрапляючи у цей вузький зазор, піддається екстремальним силам механічного зсуву та інтенсивній турбулентності [89, 90]. Колоїдні млини використовують для виробництва таких продуктів, як майонези, салатні заправки та соуси. Недоліком методу є утворення макроемульсії з розміром часток від 1 до 5 мкм. Проте, він вимагає значно менших енерговитрат. Останні дослідження свідчать про можливість отримання наноемульсій з розміром крапель 100–500 нм за допомогою роторно-статорної гомогенізації в умовах турбулентного в'язкого режиму, за умови правильного підбору емульгатора. Експерименти доводять, що для цього необхідне використання стабілізаторів із високою кінетикою адсорбції, таких як модифікований крохмаль [91].

Гомогенізація під високим тиском є загальноприйнятою практикою у харчовій промисловості для виробництва тонких, стабільних емульсій, зокрема молочних продуктів, напоїв та фармацевтичних суспензій. Процес передбачає попереднє змішування та створення грубої пре-емульсії, яка потім нагнітається поршневыми насосами високого тиску у спеціальну камеру або клапан гомогенізації [92, 93]. Під час обробки рідина зазнає впливу високошвидкісного зсуву, високочастотної осциляції, ефектів інтенсивної гідродинамічної кавітації та потужного конвективного удару об відбивні кільця або стінки камери [94]. Така комбінація сил здатна ефективно руйнувати великі агрегати та розбивати краплі жиру до мікронного та нанорозмірного розміру [95, 96]. Суттєвим недоліком методу є значне підвищення температури рідини внаслідок дисипації механічної енергії під час її проходження через клапан. Для термолабільних інгредієнтів така обробка

вимагає встановлення потужних систем миттєвого охолодження одразу після клапана гомогенізатора, що суттєво збільшує витрати на процес [97, 98].

Механізм мембранного емульгування базується на дозованому нагнітанні дисперсної фази крізь пори мікропористої мембрани у безперервне водне середовище, що містить стабілізатори [99]. У конфігурації з поперечним потоком безперервна фаза циркулює паралельно поверхні мембрани. Формування краплі триває до моменту, коли сумарний вплив гідродинамічної сили зсуву та сили Архімеда перевищить силу поверхневого натягу, що призводить до відриву частки та її міграції в об'єм системи [100]. Основною перевагою мембранного емульгування є утворення крапель дисперсного середовища за мінімального напруження зсуву. Такі емульсії є ефективними матрицями для інкапсулювання та контрольованого вивільнення лабільних біоактивних сполук [101]. Попри високу якість отримуваних емульсій, питома продуктивність мембранного емульгування значно поступається методам інтенсивної турбулентної гомогенізації.

Аналіз сучасних досліджень свідчить, що кавітаційна обробка є одним із найпрогресивніших методів реалізації та інтенсифікації технологічних процесів харчових виробництв [102-105].

Сучасні технологічні підходи передбачають використання різних методів ініціювання кавітаційних явищ, таких як гідродинамічні випромінювачі, роторно-пульсаційні апарати, системи дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) тощо [106-109]. Незважаючи на їхню доведену практичну ефективність, особливої уваги науковців заслуговує застосування ультразвукової кавітації, яка створює унікальні умови для інтенсифікації процесів на мікрорівні [110].

Вплив ультразвукового випромінювання на рідкі середовища являє собою багатофакторний процес, що ґрунтується на поєднанні механічних, термічних та хімічних ефектів [102, 103, 107]. Чітке розмежування частотних діапазонів дає змогу прогнозувати характер змін, так потужна механічна кавітація характерна для низькочастотного діапазону (20–100 кГц), тоді як

сонохімічні перетворення при частотах понад 300 кГц [110, 111]. Акустична кавітація виступає універсальним інструментом трансформації систем, де регулювання амплітуди, експозиції та температури дозволяє досягати широкого спектра ефектів [111, 112]. Застосування акустичної кавітації відповідає концепції «зелених технологій». Завдяки мінімізації термічного навантаження, використання ультразвуку дозволяє зберегти термолабільні компоненти сировини у їхньому нативному стані [110, 111]. Водночас деструктивний вплив кавітації на клітинні мембрани мікрофлори та інактивація ендогенних ферментів забезпечують подовження термін придатності готової продукції [112, 113].

Дослідженнями встановлено, що ультразвук має суттєві переваги щодо здатності створювати наноемульсії з вузьким розподілом за розмірами та вищою енергоефективністю порівняно з іншими високоенергетичними методами [86, 98, 114]. Застосування ультразвуку у виготовленні жирових емульсій обмежується ризиком виникнення окиснювальних процесів у ліпідній фракції (рис. 1.10).

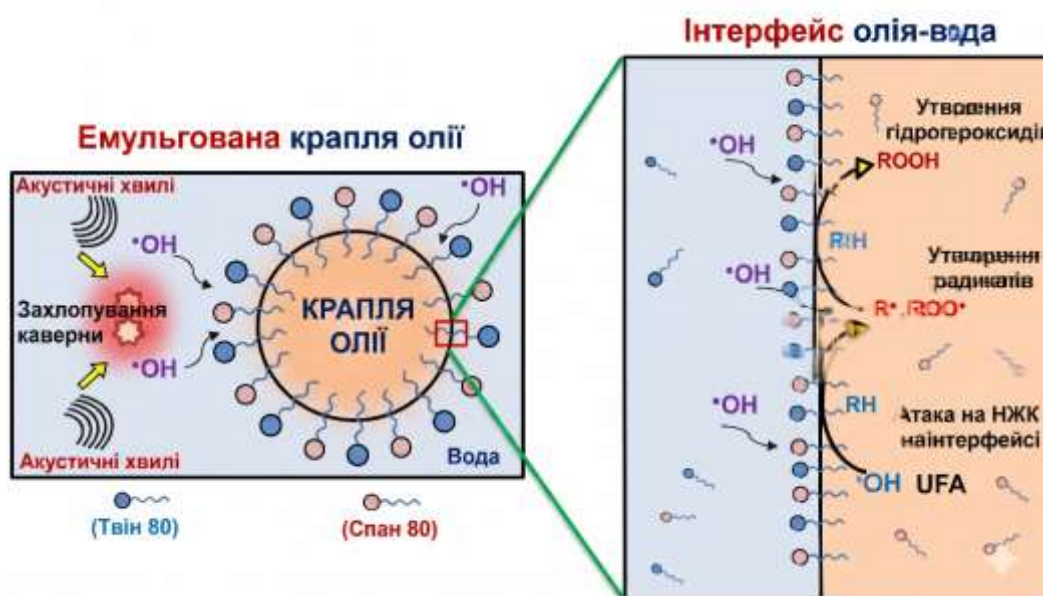


Рисунок 1.10. Механізм окиснення ліпідів під час ультразвукової емульсифікації. [115]

Умови, що виникають у локальних точках сплескування кавітаційних бульбашок призводять до явищ сонолюмінесценції та генерування вільних радикалів, що призводить до деструкції подвійних зв'язків у молекулах поліненасичених жирних кислот та інтенсифікації окиснювальних процесів у ліпідах [116, 117].

Використання білкових макромолекул забезпечує синергетичний захисний ефект. Оскільки вони створюють стеричну перешкоду на межі розділу фаз та здатні інактивувати прооксиданти завдяки наявності антиоксидантних амінокислотних залишків [118, 119]. У сучасних технологіях для запобігання окисненню оптимізують рецептуру шляхом використання довголанцюгових емульгаторів для створення міцного бар'єру та додають ліпофільні антиоксиданти [120].

Таким чином, аналіз сучасних технологічних підходів щодо стабілізації дисперсних систем свідчить, що найвищий рівень кінетичної та агрегативної стійкості рослинних напоїв досягається за умови синергетичної дії високоенергетичного диспергування та функціональних біополімерів. Водночас, сучасні підходи до харчування акцентують увагу на необхідності відмови від синтетичних емульгаторів на користь нативних інгредієнтів. Це зумовлює науковий пошук локальної рослинної сировини, яка б одночасно поєднувала високий вміст поверхнево-активних білків та збалансований ліпідний профіль.

1.3. Перспективи використання технічних конопель для виробництва функціональних харчових продуктів в Україні

Практика культивування та господарського використання конопель має глибоке історичне коріння, що сягає часів скіфів [121]. Попри те, що на початку XX століття Україна займала провідні позиції на світовому ринку виробництва конопель, упродовж наступних десятиліть спостерігалось різке скорочення їхніх посівних площ - зі 105 тис. га до 1,2 тис. га станом на 2004 рік [122]. Основними факторами використання конопель у минулому

служували сприятливі агрокліматичні умови, наявність технологій та успіхи вітчизняної селекції [123].

Сучасний етап розвитку коноплярства характеризується інтенсифікацією переробних процесів, розширенням напрямів використання конопляної сировини та асортименту отриманої з неї продукції [124, 125]. Висока конкурентоспроможність нових видів продукції з конопель корелює із загальносвітовим запитом на сталий розвиток та екологічну безпеку.

Фундаментальні зміни в регулюванні галузі почалися з усвідомлення необхідності розмежування промислового вирощування технічних сортів та обігу наркотичних речовин [126]. Основним критерієм приналежності до технічних конопель є вміст тетрагідроканабінолу (ТГК). Відповідно до оновленого законодавства, гранично допустима концентрація ТГК у висушеній соломі або насінні становить $\leq 0,2\%$, що повністю корелює з нормами Європейського Союзу [127-129]. Кабінет Міністрів України виключив канабіс, його смолу, екстракти та настоянки з переліку особливо небезпечних речовин з травня 2024 року, що фактично легалізувало наукові дослідження та глибоку переробку похідних продуктів [130].

Україна володіє унікальними агрокліматичними умовами для вирощування технічних конопель, що робить її природним партнером для європейських країн. Після повномасштабного вторгнення РФ посівні площі залишилися стабільними, а вже у 2024 році було засіяно рекордні 2,6 - 3 тис.га [124, 131]. Прогнози Міністерства аграрної політики та продовольства на наступні роки ще більш оптимістичними - очікується значне зростання площ для вирощування технічних конопель.

Експортний потенціал галузі підкріплюється тим фактом, що 59% всього українського експорту у 2024 році було спрямовано до ЄС. Для європейських переробників українське насіння конопель є привабливим не лише через якість, а й через економічні переваги. У країнах ЄС коноплярство отримує значні державні дотації - від 200 до 600 євро за гектар [132]. Використання недорогого, але високоякісного українського насіння дозволяє європейським

компаніям суттєво знижувати собівартість кінцевої продукції, зберігаючи при цьому високу рентабельність.

В умовах вітчизняного ринку коноплі класифікують як економічно привабливу нішеву культуру. Показники прибутковості циклу культивування та первинної переробки сировини становлять від 62 до 180 % залежно від цільового технологічного призначення. Зазначена економічна доцільність зумовлює розширення виробничої бази та появу нових підприємств, орієнтованих на створення інноваційної продукції у сегменті оздоровчого та функціонального харчування.

Коноплі мають високу ресурсну цінність, оскільки всі частини цієї культури придатні для переробки [133]. Переробка технічних конопель дозволяє реалізувати модель циркулярної економіки, де кожен морфологічний елемент рослини - стає сировиною для технологічного виробництва (рис. 1.11) [134].



Рисунок 1.11. Напрями комплексного використання промислових конопель [133, 134]

Насіння та суцвіття застосовуються у харчовій, косметичній та фармацевтичній сферах [135-137]. Стебла слугують сировиною для текстильного виробництва й будівництва, а цінність коріння полягає в його здатності очищати ґрунт від важких металів [134].

Глибока переробка насіння конопель є ключем до сталого розвитку галузі та створення продуктів з високою доданою вартістю [124, 138]. На відміну від реалізації сирої сировини, виробництво конопляного ядра, білкових ізолятів, олії холодного віджиму та функціональних напоїв дозволяє підприємствам значно збільшити прибуток та зменшити залежність від коливань світових цін на агросировину.

Термін "суперфуд" стосовно насіння конопель не є маркетинговим перебільшенням, а базується на високій концентрації біологічно активних речовин, що мають прямий позитивний вплив на здоров'я людини [139, 140]. Функціональна цінність насіння визначається його унікальним складом, який не має аналогів серед інших олійних культур [134]. Насіння конопель забезпечує організм повним спектром незамінних амінокислот, ідеальним балансом жирних кислот та критично важливими мінералами [141, 142].

На рис. 1.12 представлено результати аналізу нутрієнтного складу конопляної сировини із зазначенням середніх значень та розмаху варіації основних компонентів.

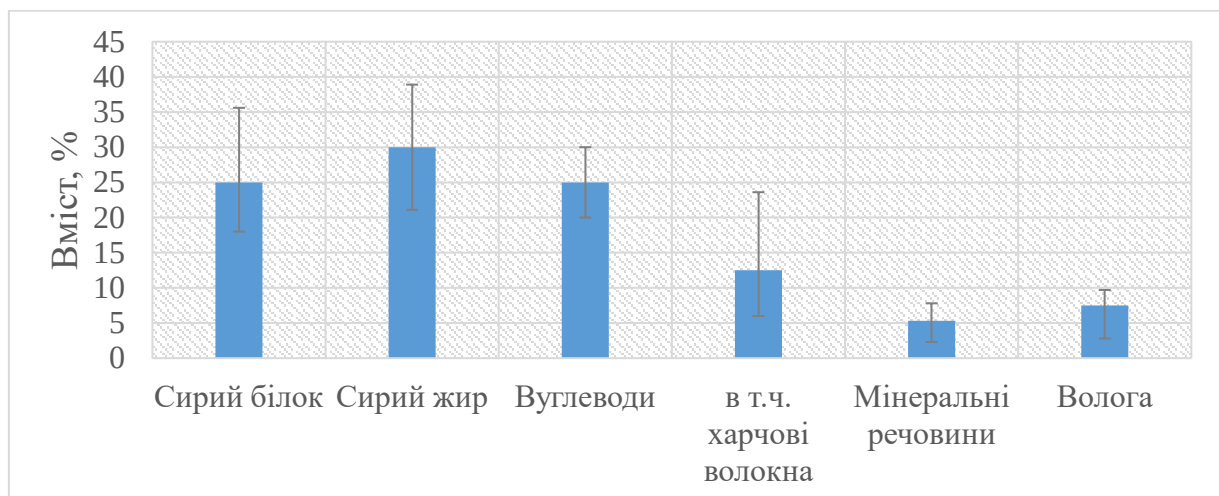


Рисунок 1.12. Хімічний склад та діапазони варіювання нутрієнтів насіння конопель

Відповідно до отриманих результатів можна стверджувати, що характерною ознакою технічних конопель є суттєве варіювання вмісту біологічно активних речовин.

Вміст білку в насінні конопель варіює від 20% до 35% загальної маси насіння і є одним із найбільш повноцінних рослинних протеїнів [143]. Його унікальність полягає у фракційному складі, який забезпечує надзвичайно високу засвоюваність та біодоступність [144]. Едестин глобулярний білок становить до 80% від загального вмісту білка в коноплях [145]. Едестин за своєю структурою максимально подібний до білків плазми крові людини, що робить його ідеальним для підтримки імунної системи. Також едестин не містить інгібіторів трипсину, тому він не викликає метеоризму або розладів травлення. Близько 20% білкової фракції насіння конопель становить водорозчинний альбумін, який швидко розщеплюється на амінокислоти [146].

Конопляний протеїн містить усі 9 незамінних амінокислот (рис. 1.13) [147-149].

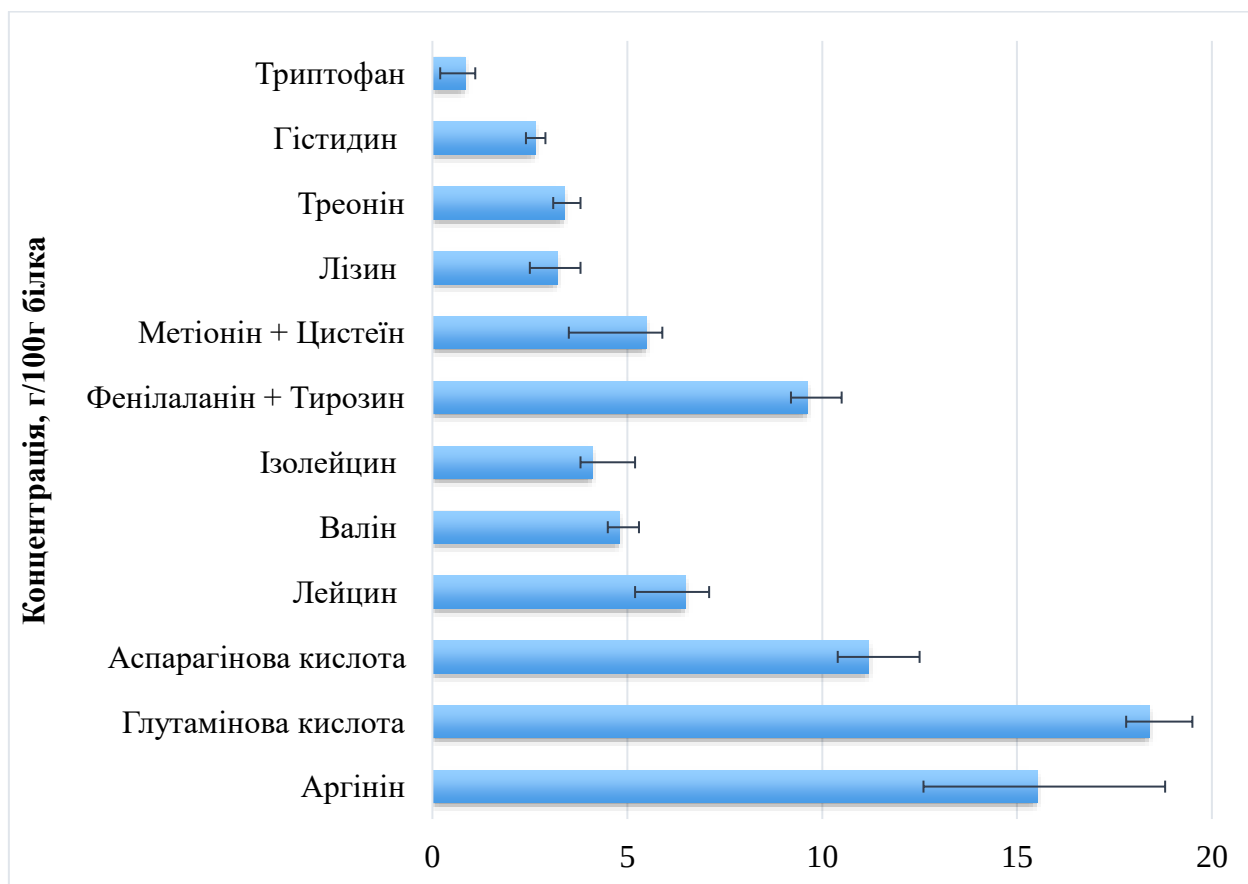


Рисунок 1.13. Амінокислотний склад білка насіння конопель

Аналіз амінокислотного складу білка насіння конопель свідчить про переважання глютамінової кислоти та аргініну, що визначає високий імунологічний потенціал сировини. Значна варіативність вмісту амінокислот свідчить про вплив на склад сорту та умов вирощування.

Насіння конопель відносять до гіпоалергенних, оскільки воно не містить глютену, лактози або соєвих алергенів. При цьому лізин визначено як головну лімітуючу амінокислоту білка насіння конопель, оскільки його амінокислотний скор становить менше 1 [150 - 152].

Жирнокислотний склад насіння відносять до золотого стандарту нутриціології. Нутрієнтний склад жирової фази містить понад 80% поліненасичених жирних кислот, що є одним із найвищих серед інших видів рослинних олій (рис. 1.14) [132, 153].

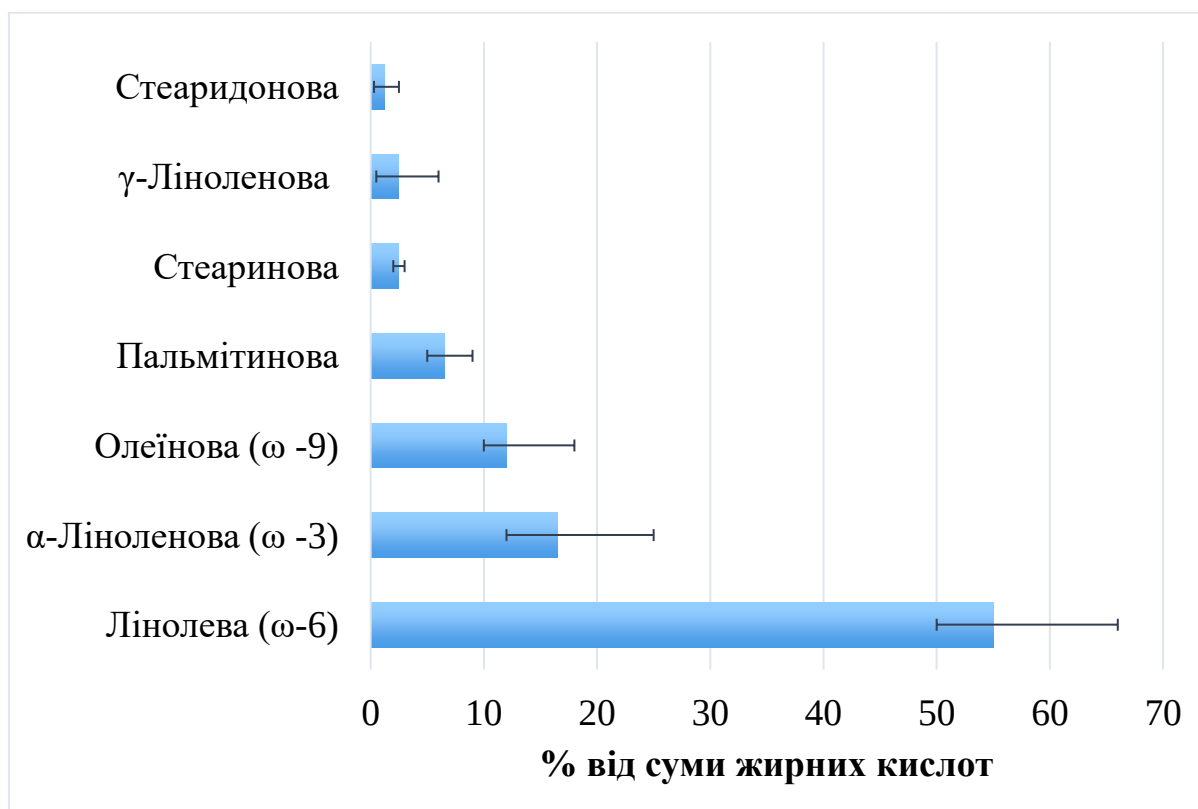


Рисунок 1.14. **Жирнокислотний склад насіння конопель**

Жирнокислотний склад насіння конопель (рис. 1.14) характеризується високим вмістом поліненасичених жирних кислот, серед яких переважають

лінолева та α -ліноленова, співвідношення ω -6 до ω -3 становить приблизно 3:1, яке вважається оптимальним для організму людини [154, 155]. Для раціону сучасних людей характерно надлишок ω -6, при цьому відношення їх до ω -3 може становити до 15:1 та навіть 20:1. Таке співвідношення провокує хронічні запалення [153].

Насіння конопель є джерелом мінералів (рис. 1.15) [156, 157].

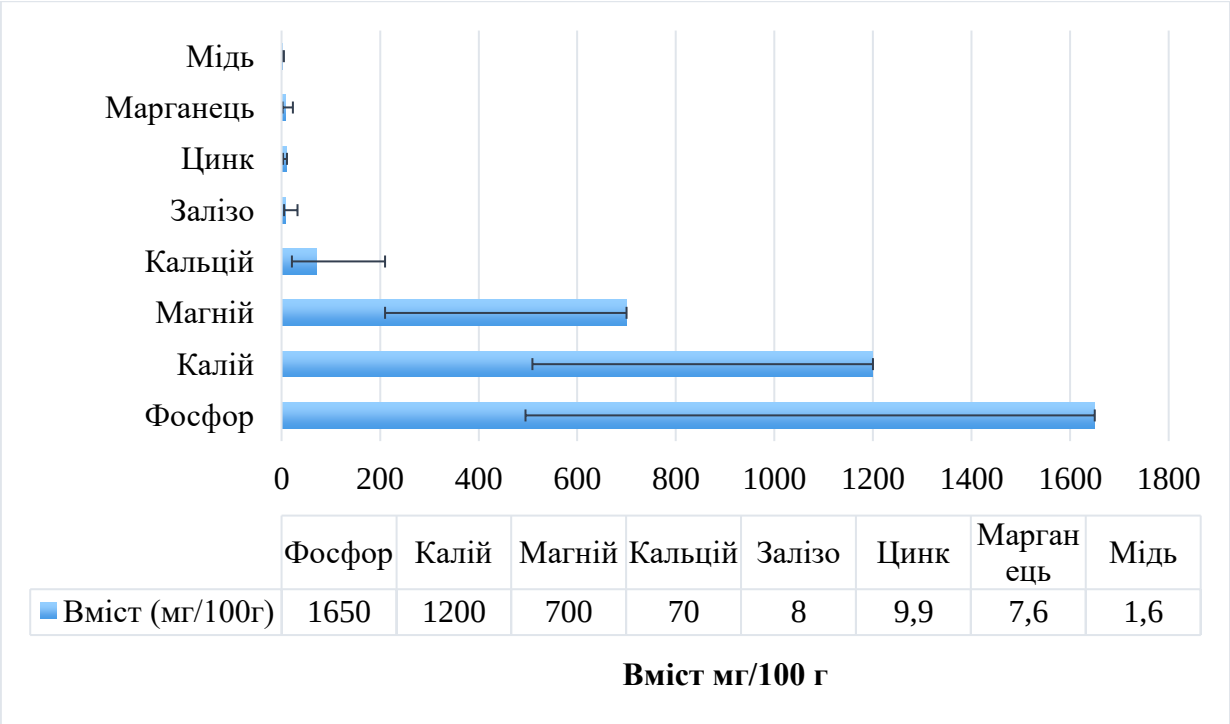


Рисунок 1.15. Мінеральний склад насіння конопель

Аналіз мінерального складу насіння конопель (рис. 1.15) підтверджує його високу нутрієнтну цінність, що визначається домінуванням таких макроелементів, як фосфор, калій та магній. Планки похибок на діаграмі свідчать про суттєві коливання вмісту мінеральних елементів, що вказує на залежність мінералізації сировини від генетичних особливостей сорту та агрокліматичних умов вирощування.

Таким чином, якість харчових продуктів з насіння конопель залежить від правильності підбору сорту, при цьому основними вимогами є поєднання

високої біологічної цінності та технологічності за дотримання вимоги органолептичної привабливості.

Для практичної реалізації цих вимог Держреєстр України пропонує широкий спектр сортів промислових конопель, адаптованих до різних ґрунтово-кліматичних умов [124]. Провідним є міжнародно визнаний універсальний сорт Гляна з вегетацією 85–115 діб та високим потенціалом урожайності соломи, волокна й насіння [132]. Напрям високоінтенсивної волокнистої селекції представлений сортами Глухівські 51 та Глухівські 85, орієнтованими на максимальну акумуляцію біомаси та волокна.

У сегменті вітчизняної насіннєвої продуктивності для харчових цілей домінує сорт промислових конопель Глесія, зареєстрований у 2016 році. Його врожайність зерна досягає 1,7-2,0 т/га, а ключовими перевагами є повна відсутність ТГК (0%) та чистота смакового профілю насіння, що є критично важливим для виробництва високоякісних рослинних напоїв. Поряд із зерновою спеціалізацією, сорт Глесія забезпечує ефективність безвідходного виробництва, демонструючи задовільний вихід стеблового волокна з високими фізико-механічними властивостями.

Отже, наявність унікальних вітчизняних сортів, зокрема й для харчових цілей, у поєднанні із законодавчими змінами та потужним науковим потенціалом, свідчить про те, що Україна стоїть на порозі масштабного застосування конопель. Сукупність цих факторів створює усі умови для стратегічного перетворення країни з експортера сировини на провідного виробника функціональних продуктів харчування з високою доданою вартістю. Особливої уваги у цьому контексті набуває розвиток технологій та налагодження промислового виробництва рослинних напоїв на основі насіння конопель. Це дозволить задовольнити зростаючий попит споживачів, що прагнуть до здорового способу життя. Розвиток глибокої переробки конопель зробить вагомий внесок у здоров'я нації, пропонуючи доступні та якісні альтернативи традиційним продуктам, насамперед у сегменті рослинних напоїв.

Висновки по розділу 1

1. За результатами оцінки складу та властивостей базових інгредієнтів виділено п'ять основних класифікаційних груп рослинних аналогів молока за видом сировини, серед яких домінують зернові, бобові, горіхоплідні та олійні культури. Встановлено, що найбільш дослідженою сировиною для виробництва рослинних напоїв є соя, мигдаль, овес, арахіс та кунжут; проаналізовано їхні технологічні переваги та недоліки. Огляд сучасних методів і стадій виробництва рослинного молока дозволив окреслити та порівняти ключові технологічні операції, спрямовані на максимальне екстрагування цільових компонентів із сировини.

2. Огляд сучасних методів і стадій виробництва рослинних напоїв дозволив порівняти технологічні операції, спрямовані на максимальне екстрагування цільових компонентів із сировини. Розглянуто механізми стабілізації та причини втрати стійкості жирових емульсій, зумовлені порушенням фізико-хімічної рівноваги в системі. Встановлено, що у традиційних технологіях стабільність харчових емульсій досягається переважно за рахунок використання стабілізаторів та емульгаторів. Водночас їх застосування ускладнює технологічний процес виробництва рослинних напоїв і може негативно впливати на їхні фізико-хімічні чи органолептичні властивості, що обмежує ефективність таких рішень.

3. Встановлено, що одним із не до кінця вирішених завдань залишається забезпечення фізико-хімічної стабільності рослинних аналогів молока, яка традиційно досягається за допомогою процесу гомогенізації. Теоретичне обґрунтування механізмів стабілізації дисперсних систем може базуватися на комплексному застосуванні теорії ДЛФО та закону Стокса.

4. Визначено, що найбільш ефективним механізмом забезпечення стійкості рослинного напою є застосування ультразвукової кавітаційної обробки, що забезпечує стабілізацію системи без використання екзогенних

емульгаторів і стабілізаторів завдяки залученню внутрішнього ресурсного потенціалу сировини.

5. Оцінка потенціалу застосування технічних конопель у виробництві функціональних харчових продуктів в Україні засвідчила, що її використовують не тільки для виробництва продуктів харчування, а й для одягу, текстилю, пластмас, паперу, фарб, а також як корм для тварин. Це підкреслює виняткову універсальність коноплі як сировини та економічну доцільність її використання.

6. Аналіз фізико-хімічних властивостей насіння конопель підтвердив його багатий нутрієнтний профіль, зокрема високий вміст білка та наявність поліненасичених жирних кислот (ω -3 і ω -6), що робить цю сировину перспективною для створення функціональних напоїв. З огляду на це, базовим інгредієнтом у роботі обрано насіння конопель сорту Глесія, а для його обробки та забезпечення стійкості готового продукту застосовано ультразвукову кавітаційну технологію.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Розробка методології теоретичних та експериментальних досліджень

Основним методологічним прийомом для вибору та обґрунтування методів досліджень є результати першого розділу в частині здійсненого огляду та аналізу стану проблеми за досліджуванним напрямком. І саме на цій основі визначено в роботі мета, завдання, об'єкт та предмет дослідження, сформовані загальна схема дослідження, алгоритми теоретичних та експериментальних досліджень (рис. 2.1).

У відповідності до наведеної схеми (рис. 2.1) дослідження здійснювали за системним підходом, у межах якого було виділено чотири основні взаємно пов'язані етапи.

На першому етапі дослідження здійснено огляд та аналіз існуючих технологій виготовлення рослинного напою на базі різних інгредієнтів із оцінкою їх переваг та недоліків. Виявлено перспективність застосування насіння конопель та відсутність достатньо обґрунтованих та малодосліджених результатів у використанні такого інгредієнту для виготовлення рослинного напою.

На другому етапі розроблено узагальнену фізичну модель та здійснені аналітичні дослідження морфологічної трансформації конопляної емульсії під дією ультразвуку, яка дала можливість пояснити та врахувати механізми формування стійкої системи без використання сторонніх добавок. Це дозволило забезпечити кінетичну стабільність напою, використовуючи лише внутрішній ресурсний потенціал насіння конопель.

На третьому етапі розроблені практичні алгоритми, застосування яких гарантує стабільність та якість отримання рослинного напою із насіння технічних конопель вітчизняної селекції сорту Глесія без використання сторонніх стабілізаторів та емульгаторів.

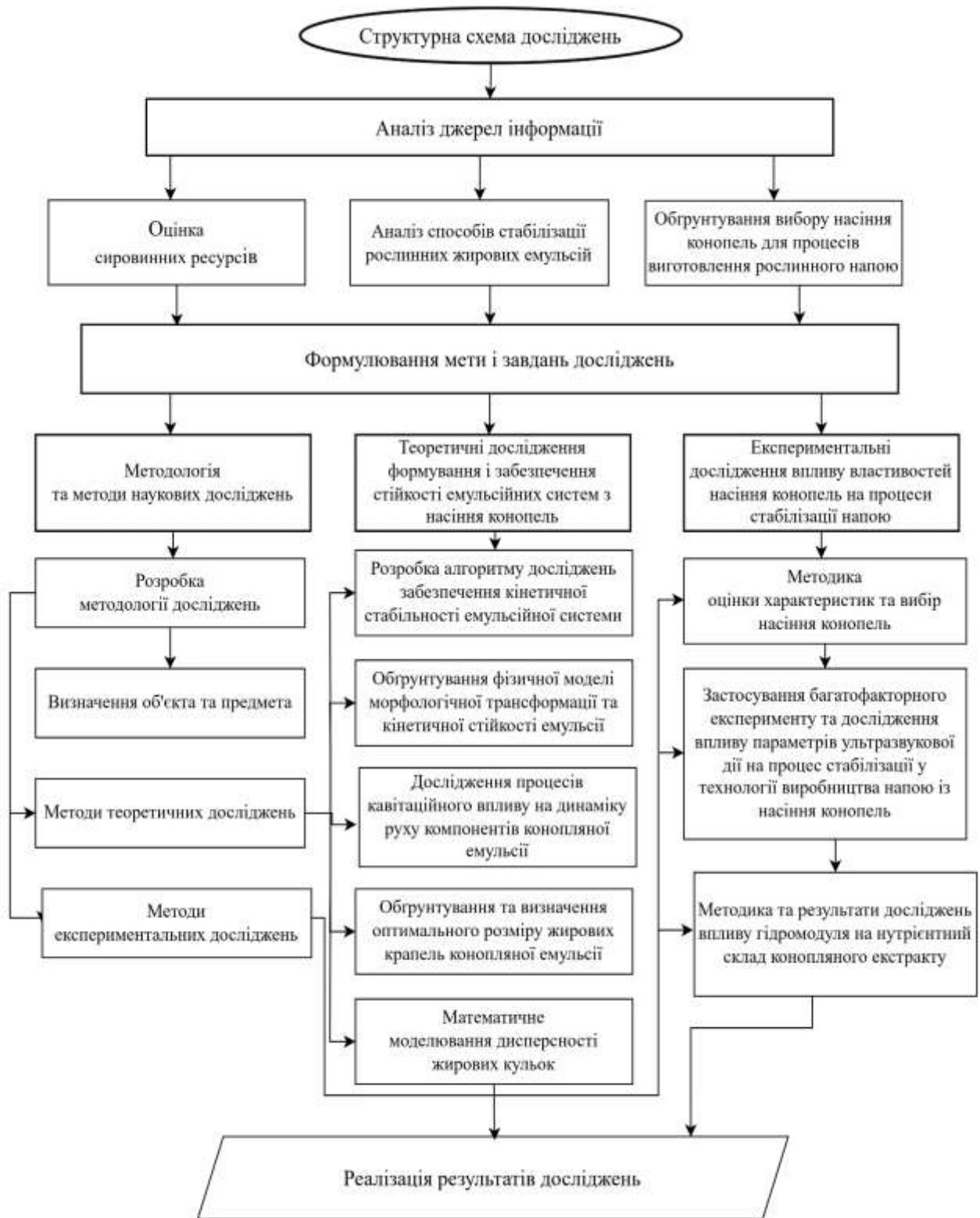


Рисунок 2.1. Структурно-логічна схема досліджень

Зазначено, що застосування розроблених алгоритмів та методів досліджень на основі ультразвукової кавітаційної технології може бути

корисними для проведення досліджень вдосконалення подібних процесів в харчових технологіях.

На четвертому етапі обґрунтовано та експериментально досліджено використання ядра насіння технічних конопель вітчизняної селекції сорту Глесія, для виробництва рослинних напоїв. Встановлено характер впливу гідромодуля на нутрієнтний склад екстрактів у широкому діапазоні. За результатами проведеного багатofакторного експерименту розроблено математичні моделі, що надали можливість адекватно описати зміну показників стабільності та якості рослинного напою з ядра насіння конопель залежно від параметрів ультразвукової обробки.

2.2. Об'єкт та предмет дослідження

Об'єкт дослідження – процес ультразвукової кавітаційної стабілізації рослинного напою з лущеного насіння конопель.

Предмет дослідження – механізми морфологічної трансформації компонентів сировини, режими ультразвукової обробки та технологічні параметри забезпечення кінетичної стійкості і якості напою.

Для досліджень у роботі обрано насіння технічних конопель сорту Глесія (*Cannabis sativa L.*). Такий вибір сорту обґрунтовано комплексом технологічних, екологічних та економічних чинників.

Сорт Глесія є досягненням української селекційної школи Дослідної станції луб'яних культур ІСГПС НААН та внесений до Державного реєстру сортів рослин України з 2016 року. Вибір української сировини відповідає національній стратегії імпортозаміщення та продовольчої безпеки. Перевагою використання насіння конопель сорту Глесії для харчових цілей є відсутність тетрагідроканабінолу, що гарантує безпечність продукції для споживачів. Доцільність використання такої сировини для виробництва рослинних напоїв пов'язано також з відсутністю сторонніх присмаків, які характерні для переважної більшості насіння конопель інших сортів. Достатньо високий вміст білкової та збалансований жирнокислотний склад ліпідної фракції є

важливою передумовою формування стійкої емульсійної системи під дією ультразвукової кавітації.

Продуктивності сорту на 1,7–2,0 т/га насіння дозволить мати стабільну сировинну базу для потенційного промислового масштабування технології. Використання даного сорту демонструє високу ефективність у межах концепції безвідходного виробництва, що суттєво підвищує рентабельність переробки сировини. Такий підхід також відповідає стратегічним вимогам European Green Deal та впровадження екологічно безпечних технологій у харчову індустрію.

2.3. Методи теоретичних досліджень процесів формування і стабілізації емульсійних систем

Вибір методів теоретичних досліджень процесів формування і забезпечення стабілізації емульсійних систем обумовлено розглядом конопляної емульсії як складної багатофазної системи, яка під дією ультразвукової кавітаційної обробки змінює не тільки свій фізичний стан, а і в ній відбуваються важливі фізико-хімічні процеси. Тобто, відкривається можливість впливу на стан білково-ліпідних комплексів, який суттєво впливає на забезпечення стабільності рослинного напою. Застосування ультразвукової кавітаційної обробки передбачає дослідження та визначення режимів і параметрів системи «акустичний апарат – кавітаційна бульбашка» на етапах зародження, розвитку і сплескування бульбашки на основі класичної теорії механічних коливань та механіки суцільних середовищ. Аналітичну залежність для визначення амплітуди сталих коливань бульбашки, A_0 визначали за отриманою формулою:

$$A_0 = \frac{F_0}{\sqrt{(c_6 - m\omega^2)^2 + (b_6\omega)^2}}, \quad (2.1)$$

де $m = m_k + \alpha m_b$ – сумарна маса ультразвукового кавітатора та приєднана маса бульбашки в контактній зоні системи «перетворювач кавітатора – бульбашка»; ω – коефіцієнт приєднаної маси бульбашки; F_0 – змушуюча сила

ультразвукового кавітатора; c_b – коефіцієнт пружності бульбашки; b_b – коефіцієнт опору бульбашки.

Важливість формули (2.1) полягає в тому, що вона враховує властивості бульбашки, які були відображені в подальших дослідженнях через її реологічні властивості. Тоді формула (2.1) для визначення амплітуди сталих коливань бульбашки була перетворена до вигляду:

$$A = \frac{P_{am}(4\pi R_0^2)}{[12\pi\gamma R_0(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0})] - (\omega^2 4\pi R_0^3 \rho)}, \quad (2.2)$$

де ρ – щільність бульбашки, R_0 – розмір бульбашки, p_0 – амплітуда тиску, σ – поверхневий натяг; P_{am} – атмосферний тиск.

А для визначення власної частоти бульбашки використана формула:

$$\omega_{вл} = \sqrt{\left[\frac{3\gamma}{\rho R_0^2} \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0}\right) - \frac{2\sigma}{\rho R_0^3} + \frac{2c_{пр}}{\rho R_0^3}\right] - \left(\frac{2\pi\delta_{пр}}{\omega}\right)^2}. \quad (2.3)$$

Пружні та інерційні властивості бульбашки у формулі (2.3) представлені першим підкореневим виразом, а дисипативні другим підкореневим виразом.

Механізм руйнування жирових кульок обумовлений взаємодією із кавітаційною бульбашкою на основі дії ударної хвилі та проколювання мікроструменем. Ударна хвиля від колапсу бульбашки створює різницю динамічних тисків на діаметрі краплі d . Деформація та розрив краплі відбуваються, якщо інерційні сили перевищують сили поверхневого натягу, що утримують форму краплі. Процес взаємодії бульбашки із жировою кулькою визначається зміною параметра, що являє собою відношення відстані від центру зародження бульбашки до поверхні жирової кульки до максимального радіусу, якого досягає бульбашка у фазі розширення:

$$\mu = d/R_{max} \quad (2.4)$$

В залежності від числових значень параметра μ можливі наступні стадії взаємодії кавітаційної бульбашки із жировою кулькою.

1. $\mu < 1$. За таких значень бульбашка поглинає частину поверхні жирової кульки або знаходиться в безпосередньому контакті. Домінує формування потужного мікроструменя, що пронизує жирову кульку,

2. $\mu = 1$. За цієї умови бульбашка сплескується поблизу жирової кульки. Формується мікрострумінь, але його енергія частково розсіюється у проміжку емульсії. Ударна хвиля також має значну інтенсивність.

3. $\mu > 1$. Таке значення параметра свідчить, що взаємодія слабшає, мікрострумінь може не досягати жирову кульку або не формуватися зовсім.

Визначення стабільності емульсії на основі насіння конопель вирішується шляхом використання методів мікрогідродинаміки та положення класичної теорії ДЛФО. Для оцінки седиментаційної стійкості емульсії використано закон Стокса за умов, що швидкість броунівського руху у високодисперсних системах (250-350 нм), є рівним швидкості гравітаційного осадження частинок таких систем. Для цього здійснено розрахунок балансу сил електростатичного відштовхування та Ван-дер-Ваальсового притягання між активованими білково-ліпідними глобулами, що дозволяє забезпечити агрегативну стійкість емульсії за відсутності застосування додаткових синтетичних емульгаторів. Розроблено алгоритм стабілізації, який дозволяє ідентифікувати чотири ключові технологічні стани системи, перехід між якими визначається ступенем дисперсності жирової фази та інтенсивністю формування електростатичного захисного шару

Запропонована методика багатофакторної оптимізації поєднує показники дисперсності, оптичної щільності та кінетичної стабільності. Це дозволяє визначити умови досягнення гарантованого терміну придатності при мінімальних питомих витратах енергії на кавітаційну обробку. Розрахунки та візуалізація результатів виконувалися з використанням чисельних методів розв'язання нелінійних рівнянь за використання пакетів прикладних програм Excel, Mathcad.

2.4. Апаратне оформлення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження здійснювали на установці, технічні можливості якої дозволяли забезпечити оброблення емульсій під дією ультразвукового поля. Обладнання забезпечувало введення у технологічну суміш ультразвукових коливань з інтенсивністю, що перевищує поріг кавітації.

Експериментальна установка (рис. 2.2) є кавітаційною камерою, виконаною у вигляді відрізка труби.

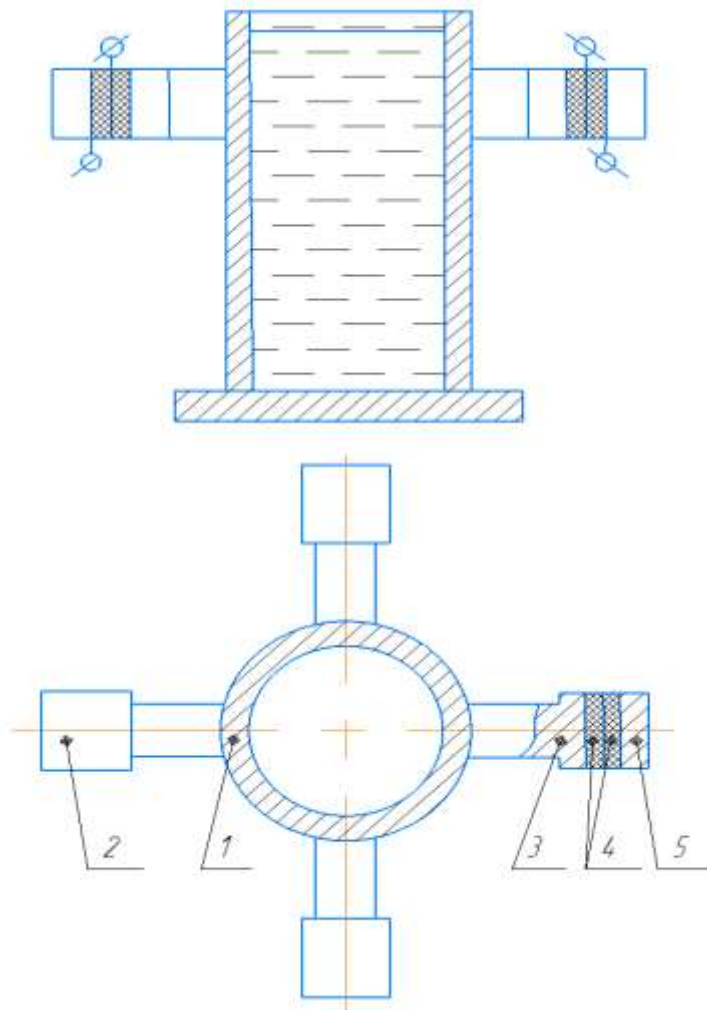


Рисунок 2.2. **Схема експериментальної установки з циліндричною кавітаційною камерою та ультразвуковими приводами-випромінювачами на твірній поверхні: 1 – труба; 2 – ультразвукові приводи-випромінювачі; 3 – трансформатор швидкості; 4 – п’єзокільця; 5 – демпфер**

Підведення акустичної енергії до труби 1 забезпечували за допомогою ультразвукових випромінювачів 2, які через щільне зварювання приєднані до її зовнішньої поверхні. Джерелом ультразвукових коливань в установці виступає складений п'єзоелектричний перетворювач, зібраний з двох п'єзокілець 4, що встановлені механічно послідовно та підключені до генератора електричних коливань електрично паралельно. П'єзоелектричні приводи є складеними перетворювачами Ланжевена, що забезпечують трансформацію електричних коливань генератора у механічні пружні поздовжні коливання. Необхідне значення резонансної частоти коливань п'єзоелектричного перетворювача отримували завдяки вибору акустичних розмірів та властивостей матеріалів демпфера 5 і трансформатора швидкості 3.

В основу конструкції експериментального стенду покладено принцип збудження резонансних радіально-згинальних коливань стінки труби. Процес передбачає генерування поздовжньої хвилі пружної деформації безпосередньо у складених п'єзоелектричних приводах-випромінювачах. Підсилення амплітуди коливань забезпечувалося завдяки використанню ступінчастих трансформаторів швидкості.

З метою зменшення впливу привода-випромінювача на механізм формоутворення радіально-згинальних коливань у трубі кавітаційної камери, ступінь малої площі ступінчастого трансформатора швидкості виконано у плоскій формі та розміщено на твірній циліндричній поверхні камери паралельно осі труби.

Принцип роботи полягає у подачі синусоїдальної високочастотної напруги від генератора електричних коливань на електроди п'єзоелектричних перетворювачів. Внаслідок зворотного п'єзоефекту в п'єзокерамічних дисках ініціюються пружні механічні коливання за їх товщиною, що зумовлює поширення поздовжньої хвилі деформації в п'єзоелектричних приводах. Акустичні поздовжні розміри складових елементів приводу розраховані таким чином, щоб забезпечити умови для виникнення резонансних коливань та формування стоячої хвилі пружної деформації за його довжиною. Через

трансформатори коливальної швидкості ультразвукові коливання передаються безпосередньо в об'єм камери, заповненої технологічним середовищем.

Система керування приводом-випромінювачем передбачає можливість регулювання параметрів обробки (рис. 2.3).

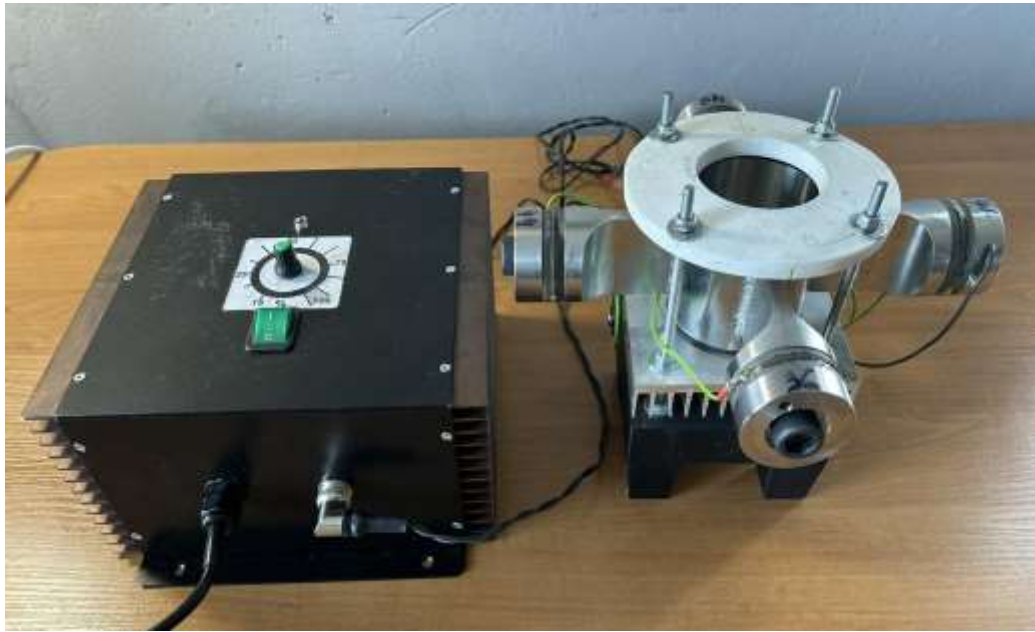
*а**б**в**г*

Рисунок 2.3. Експериментальна установка: а – загальний вигляд; б – ультразвукова коливальна система; в – ультразвуковий генератор з регулятором потужності; г – портативний ватметр (вимірювач потужності)

Технічна характеристика привода-випромінювача

Потужність, що споживається		
від мережі, Вт		до 400
Напруга живлення, В		220 ± 22
Частота мережі, Гц		50
Робоча частота апарата, кГц		$22 \pm 1,65$
Межі зміни частоти, кГц		± 5
Принцип перетворення		
електричних коливань в механічні		зворотній п'єзоефект
П'єзокерамічний матеріал		АРС-841
Кількість п'єзоелементів, шт.		4
Геометрична форма перетворювачів		кільця
Акустична система		напівхвильова резонансна
Система охолодження перетворювачів		повітряна, не примусова

Дослідження проводили за наступною схемою. Камеру заповнювали конопляним екстрактом. За допомогою системи керування встановлювали рівень потужності ультразвукового випромінювання в інтервалі 50, 75 та 100 % від номінальної потужності генератора при робочій частоті 22 кГц. Після встановлення необхідних параметрів ультразвукових коливань здійснювали обробку середовища.

Потужність ультразвуку визначає інтенсивність кавітаційних процесів та амплітуду коливань ультразвукового випромінювача. Варіювання здійснювали шляхом зміни амплітуди коливань у діапазоні від 50% до 100% від номінальної потужності генератора (400 Вт).

Питома енергія є інтегральним показником, який відображає сумарну кількість енергії, витрачену на одиницю маси продукту за весь час обробки (t). Показник $E_{\text{пит}}$ (кДж/кг) розраховували за формулою:

$$E_{\text{пит}} = \frac{W \cdot t}{m} \quad (2.5)$$

Показник питомої енергії $E_{\text{пит}}$ варіювали шляхом зміни тривалості експозиції ультразвуку за фіксованої потужності.

Вимірювання температури здійснювали безпосередньо в зоні кавітації за допомогою терморезистивного датчика РТ100 з похибкою не більше 0,5 °С. Оскільки ультразвук спричиняє інтенсивне нагрівання, для підтримання заданої температури $T_{ст}$ використовували охолодження. Дослідження проводили в діапазоні 20-50⁰С.

Для встановлення раціональних режимів ультразвукової обробки жирової емульсії, що характеризується інтенсивністю та зазначеними вище факторами, за критерії якості та ефективності було обрано показники розміру жирових кульок та індекс стабільності жирової емульсії.

2.5. Методи експериментальних досліджень впливу властивостей насіння конопель на процеси створення рослинного молока

Оцінка органолептичних показників лущеного насіння конопель сорту Глесія. Дослідження проводили відповідно до ДСТУ 7695:2015 [158], ДСТУ ISO 6658:2005 [159], ДСТУ ISO 5492:2006 [160], також адаптували для ядра насіння конопель методи випробувань для олійної сировини згідно з ДСТУ 8840:2019 [161]. Зовнішній вигляд та колір ядер досліджували візуально на білому фоні за інтенсивного природного освітлення. Фіксували матовість поверхні, однорідність та наявність вкраплень. Запах визначали шляхом інгалаційної оцінки летких речовин у закритій скляній колбі після 10-15 хвилин експозиції. Смак та консистенцію аналізували шляхом розжовування 2-3 г та розтирання ядер між пальцями.

Дослідження фізико-хімічних показників ядра насіння конопель. Дослідження проводили за загальноприйнятими стандартизованими методиками для олійної сировини. Вміст вологи визначали термогравіметричним висушуванням до постійної маси відповідно до ДСТУ ISO 665:2008 [162], масову частку золи - методом сухої мінералізації зразка у муфельній печі за температури 550 °С за адаптованою для олійного насіння методикою згідно з ДСТУ ISO 2171:2009 [163]. Масову частку білка визначали за адаптованою для олійного насіння методикою К'ельдаля згідно з ДСТУ ISO

5983-1:2014 [164]. Фракційний склад білків, зокрема масову частку едестину (глобулінової фракції) досліджували за методом Осборна [165]. Вміст ліпідної фракції досліджували екстракційно-ваговим методом в апараті Сокслета за ДСТУ ISO 659:2007 [166].

Кислотне число визначали відповідно до ДСТУ 8839:2019 [167]. Суть методу полягає у титрометричному визначенні масової частки вільних жирних кислот, екстрагованих із наважки насіння, шляхом їх нейтралізації спиртовим розчином гідроксиду калію у присутності індикатора до появи стійкого рожевого забарвлення. Масову частку сировини клітковини визначали гравіметричним методом згідно з ДСТУ ISO 6865:2022 [168]. Процедура включала попереднє знежирення зразків, передбачене стандартом для олійної сировини. Кількість засвоюваних вуглеводів знаходили розрахунковим шляхом, а загальну енергетичну цінність розраховували із застосуванням стандартних коефіцієнтів Атуотера для макронутрієнтів. Контроль відсутності смітної домішки проводили згідно з ДСТУ ISO 658:2006 [169].

Фізико-хімічні показники екстрактів з насіння конопель проводили за стандартними методиками. Вміст сухих речовин визначали гравіметрично шляхом висушування наважки до постійної маси згідно ДСТУ ISO 6731:2007 [170]. Масову частку жиру визначали відповідно до ДСТУ EN ISO 1211:2022 [171], вміст білка - методом К'ельдаля згідно ДСТУ EN ISO 8968-1:2022 [172]. Глобулінову фракцію білка (едестин) виділяли шляхом послідовної екстракції 10%-м розчином NaCl за методом Осборна. Розрахунок масової частки вуглеводів та загальної енергетичної цінності проводили розрахунковим методом.

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

$$\text{TOTOX} = 2\text{ПЧ} + \text{АЧ}, \quad (2.6)$$

де ПЧ – пероксидне число, АЧ - анізидинове число.

Пероксидне число визначали згідно з ДСТУ EN ISO 3960:2019 [173]. 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 [174]. Анізидинове число вказує на нагромадження стійких вторинних продуктів, які зазвичай мають неприємний запах і смак.

Органолептичну оцінку екстрактів проводили профільним методом згідно з ДСТУ ISO 6564:2005 [175] та відповідно до загальних настанов ДСТУ ISO 6658:2005 [159]. Вибрані дескриптори, зокрема зовнішній вигляд та колір, запах, смак, консистенція оцінювали за 5-бальною шкалою. Математичну обробку результатів проводили шляхом розрахунку середньоарифметичних значень бальних оцінок при рівні значущості $p < 0,05$.

Оцінка результатів органолептичного аналізу за методом узагальненої функції бажаності Харрінгтона [176]. Переведення бальних оцінок до уніфікованого вигляду проводили шляхом перетворення окремих значень y_i у нормовані безрозмірні z_i за використання лінійної залежності:

$$z_i = a \cdot y_i + b \quad (2.7)$$

Параметри a та b розраховували через зіставлення характерних рівнів дегустаційної оцінки з базовими точками шкали бажаності (зокрема, бал «3» відповідав $z=0$, а бал «5» - $z=2$). Після лінійного кодування проводили розрахунок одиничних показників бажаності d_i за експоненціальною залежністю:

$$d_i = \exp(-\exp(-z_i)) \quad (2.8)$$

Це дозволило представити різні якісні показники у вигляді уніфікованих числових значень у діапазоні від 0 до 1 для обчислення інтегрального критерію якості продукту.

Інтегральну оцінку зразка за сукупністю всіх дескрипторів визначали шляхом обчислення узагальненої функції бажаності (D), яка є середнім геометричним одиничних показників бажаності d_i :

$$D = \sqrt[n]{d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_n} \quad (2.9)$$

де n – кількість досліджуваних одиничних показників бажаності.

Отримане інтегральне значення використовували для кваліметричної оцінки якості екстрактів шляхом їх зіставлення зі стандартною шкалою Харрінгтона (табл. 2.1). Статистичну значущість отриманих результатів підтверджували при рівні $p < 0,05$.

Таблиця 2.1

Стандартна шкала бажаності Харрінгтона

Бажаність	Відмітки по шкалі бажаності
Дуже добра	1,00-0,80
Добра	0,80-0,63
Задовільна	0,63-0,37
Погана	0,37-0,20
Дуже погана	0,20-0

Методика оцінки середнього діаметра жирових кульок. Для дослідження впливу режимів ультразвукової кавітації на середній діаметр d_{32} жирових кульок ліпідної фази конопляних емульсій використовували турбідиметричний метод, заснований на принципах світлорозсіювання за теорією Мі. Зважаючи на матрицю емульсійної системи, яка містить як ліпідні глобули, так і макромолекулярні білкові агрегати для точної ізоляції оптичного сигналу ліпідної фази використано метод селективної деструкції білкової фракції за використання 0,05 М розчину Трилону Б. Механізм дії базується на хелатуванні іонів двовалентних металів, які структурно стабілізують білкові міцели. З метою дотримання фізичних умов одиничного розсіювання та усунення похибки від багаторазового перевідбиття фотонів, дослідні зразки піддавали двостадійному каскадному розведенню у дисоціюючому буфері до досягнення загального коефіцієнта розведення 2500. Вимірювання оптичної щільності здійснювали при довжині хвилі $\lambda=500$ нм у

кюветах з довжиною оптичного шляху 10 мм при температурі 20 ± 2 °С. Як розчин порівняння використовували чистий 0,05 М розчин Трилону Б.

Розрахунок середнього діаметра жирових кульок d_{32} здійснювали за формулою:

$$d_{32} = \frac{3 \cdot C_{об} \cdot l \cdot K}{2 \cdot D} \quad (2.10)$$

де $C_{об}$ - об'ємна частка жирової фази у розведеному зразку; l - товщина кювети, мм; D - виміряна оптична щільність при $\lambda=500$ нм; K - коефіцієнт ефективності ослаблення світла ($K=2,1$).

Визначення індексу стабільності жирової емульсії. Індекс стабільності характеризує здатність системи зберігати однорідність під дією відцентрових сил, що імітують тривале зберігання. В роботі використовували метод центрифугування протягом 30 хв при швидкості 5000 об/хв. з наступною кількісною оцінкою розподілу фаз. Індекс стабільності розраховували за формулою:

$$I_{ст} = \frac{V_{заг} - V_{в}}{V_{заг}} 100 \%, \quad (2.11)$$

де $V_{заг}$ - загальний об'єм емульсії взятої для дослідження, мл; $V_{в}$ - об'єм відшарованої фази, мл.

Оцінка точності вимірювань на основі планування багатофакторного експерименту. Характеристики процесу стабілізації у технології виробництва рослинного напою з лущеного насіння конопель сорту Глесія є функціями таких 3-х основних параметрів:

$$d_{32}, I_{ст}, TOTOX = f(W, E_{пит}, T_{ст}) \quad (2.12)$$

де d_{32} – середній діаметр жирових кульок, нм; $I_{ст}$ - індекс стабільності, %; $TOTOX$ – показник окиснення; W – потужність, %; $E_{пит}$ – питома енергія, кДж/кг; $T_{ст}$ – температура, °С.

Вибір цих параметрів обумовлений їх роллю у формуванні дисперсного складу системи.

Потужність ультразвукового випромінювання W , Вт - базовий енергетичний параметр, що детермінує інтенсивність акустичного поля в

об'ємі оброблюваної системи. Величина W безпосередньо корелює з амплітудою коливань випромінювача та визначає концентрацію кавітаційних зародків. Механічний вплив, зумовлений кумулятивними струменями та ударними хвилями при сплескуванні кавітаційних бульбашок, забезпечує дезінтеграцію жирових глобул та агрегатів білків ядра насіння конопель. Введення даного фактора до плану експерименту обумовлене необхідністю встановлення раціонального рівня енергетичного впливу, достатнього для подолання сил когезії дисперсної фази без ініціювання процесів деструкції термолабільних компонентів.

Температура системи $T_{ст}$, °C - критичний параметр, що впливає на фізико-хімічні та реологічні властивості емульсії. Зміна температурного режиму зумовлює варіювання в'язкості середовища та поверхневого натягу на межі поділу фаз, що безпосередньо впливає на поріг виникнення кавітації. Крім того, температурний вплив визначає функціонально-технологічні властивості білкового комплексу конопель. Регулювання $T_{ст}$ дозволяє керувати процесом часткової денатурації білків, що сприяє їх адсорбції на поверхні розподілу фаз «жирові кульки - вода» та формуванню стійкого захисного шару, запобігаючи злиттю жирових кульок.

Питома енергія обробки $E_{пит}$, кДж/кг - інтегральний показник, що характеризує сумарну кількість акустичної енергії, підведеної до одиниці маси середовища за час експозиції. Даний параметр враховує взаємозв'язок між потужністю випромінювання та тривалістю обробки, що забезпечує можливість об'єктивного порівняння результатів при масштабуванні технології. Питома енергія визначає ступінь дисперсності системи та її седиментаційну стабільність. Показник $E_{пит}$ дозволяє встановити значення надмірної обробки, за якого відбуваються зворотні процеси, такі, як агломерації диспергованих часток внаслідок підвищення частоти їх зіткнень.

Дослідження впливу перерахованих вище факторів на характеристики процесу стабілізації у технології виробництва рослинного напою з ядра насіння конопель сорту Глесія при проведенні однофакторних експериментів

пов'язане із значними труднощами і об'ємами робіт. Тому доцільно провести багатофакторний експеримент для отримання рівнянь регресії для функцій відгуку - характеристики процесу стабілізації у технології виробництва рослинного напою з ядра насіння конопель сорту Глесія за допомогою планування багатофакторного експерименту виду 2^3 методом Бокса-Уілсона [177, 178].

При цьому встановлено наступну область визначення факторів:

$$\begin{aligned} 50 &\leq W \leq 100 (\%); \\ 100 &\leq E_{\text{пит}} \leq 600 (\text{кДж/кг}); \\ 20 &\leq T_{\text{ст}} \leq 50 (^\circ\text{C}). \end{aligned} \quad (2.13)$$

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.

Вибір діапазонів варіювання факторів функції (2.13) 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 сполучення рівнів факторів були б стійко реалізовані.

Всі відзначені фактори, які належать до функції (2.13), є величинами, що мають різну розмірність, а значення величин цих факторів мають різні порядки. Тому для отримання поверхонь відгуку цих функцій було проведено операцію кодування факторів, що являє собою лінійне перетворення факторного простору за формулою:

$$x_j = \frac{(\tilde{X}_j - \tilde{X}_{j0})}{I_j}. \quad (2.14)$$

У результаті проведених пошукових експериментів для кожного фактору встановлені такі значення: X_{j0} – основний рівень фактора; X_{jmax} , X_{jmin} – верхній та нижній рівні фактора; αX_{jmax} , αX_{jmin} – 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. 2.2.

Таблиця 2.2

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/кг	100	200	350	500	600	150
x_3 – температура, °С.	20	26	35	44	50	9

Кількість дослідів для багатфакторного експерименту для квадратичної регресії визначалась за формулою:

$$N = 2^k + 2k + N_0(k), \quad (2.15)$$

де k – кількість факторів; 2 – кількість рівнів варіювання; N_0 – кількість дослідів в центрі плану, $N_0(k) = N_0(3) = 6$.

Загальна кількість дослідів склала $N = 2^3 + 2 \cdot 3 + 6 = 20$ дослідів.

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

Метою планування було отримання квадратичних регресійних моделей, що враховують ефекти взаємодії факторів першого порядку:

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{33}x_3^2, \quad (2.16)$$

де y – цільові функції; $b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{23}, b_{11}, \dots, b_{33}$ – коефіцієнти регресії.

Точкові оцінки коефіцієнтів регресії визначали за допомогою методу найменших квадратів (МНК) у матричній формі [177]:

$$B = Y \Phi^{-1}, \quad (2.17)$$

де $B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_k \end{bmatrix}$ – матриця, що містить коефіцієнти регресії;

$\Phi = F^T F$ – інформаційна матриця Фішера;

$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_N \end{bmatrix}$ – матриця, що містить результати експериментів за матрицею

планування;

$F = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & \dots & x_{1,k} \\ 1 & x_{2,1} & \dots & x_{2,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{N,1} & \dots & x_{N,k} \end{bmatrix}$ – матриця, що містить значення факторів $x_{i,j}$ (де i –

номер дослідів за матрицею планування, j – номер фактора);

k – кількість факторів; N – кількість дослідів за матрицею планування.

Адекватність отриманих регресійних рівнянь перевіряли за допомогою критерію Фішера [196]:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{vidm}^2} \leq [F(f_1, f_2)], \quad (2.18)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності; S_{vidm}^2 – дисперсія відтворюваності; $[F(f_1, f_2)]$ – критичне значення критерію Фішера, яке рівне значенню розподілу Фішера; $f_1 = N - d$ – кількість ступенів вільності дисперсії адекватності; $f_2 = N_0 - 1$ – кількість ступенів вільності дисперсії відтворюваності; d – кількість значимих коефіцієнтів регресії (2.16).

Якщо виконувалась умова $F > [F(f_1, f_2)]$, регресійна модель визнавалася неадекватною.

Дисперсія адекватності обчислювалась за залежністю [177]:

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{f_1} \sum_{i=1}^N (y_i - \tilde{y}_i)^2, \quad (2.19)$$

де y_i – результат i -го дослід, проведеною за матрицею планування; $\tilde{y}_i$ – результат i -го значення дослід, передбаченого за допомогою регресійної моделі (2.16).

Статистична значимість кожного окремого коефіцієнта регресії перевірялася за допомогою t -критерію Стюдента [177]:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_{\text{відм}} \sqrt{c_{i,i}}} > [t(f_2)], \quad (2.20)$$

де $[t(f_2)]$ – критичне значення t -критерію Стюдента, яке рівне значенню розподілу Стюдента; $c_{i,i}$ – відповідний елемент матриці Φ^{-1} .

Розрахункове значення t_i порівнювали з критичним значенням $t(f_2)$. Якщо $|t_i| \leq [t(f_2)]$, такий коефіцієнт визнавався статистично незначимим і виключався з моделі.

Кількість повторних дослідів в кожній точці плану експерименту знаходили за залежністю [179]:

$$n \geq \frac{1 + \gamma + 2n_{\text{відк}}}{1 - \gamma}, \quad (2.21)$$

де γ – довірна ймовірність того, що похибка вимірювання знаходиться в допустимих межах; $n_{\text{відк}}$ – число вимірювань, що відкидається.

Згідно рекомендацій авторів робіт [179, 180] довірна ймовірність при нормуванні квантильної оцінки результуючої та випадкової похибок вимірювальної техніки вибирається в межах (0,8...0,9), тоді при $n_{\text{відк}}=0$:

$$n \geq \frac{1 + (0,8...0,9)}{1 - (0,8...0,9)} = 9...19. \quad (2.22)$$

Висновки до розділу 2

1. Обґрунтовано структурно-логічну схему та методологію досліджень, яка базується на системному аналізі емульсійної системи з ядра насіння конопель сорту Глесія. Основу методичного підходу становить керована морфологічна трансформація складових компонентів насіння за

ультразвукового кавітаційного впливу з метою отримання кінетично стійкого рослинного напою.

2. Для теоретичного моделювання процесів формування та агрегативної стійкості емульсії обрано положення мікрогідродинаміки та класичної теорії ДЛФО. Аналіз стабільності системи базується на дослідженні балансу сил електростатичного відштовхування та Ван-дер-Ваальсового притягання між жировими глобулами. Динаміка кавітаційного впливу описується модифікованими рівняннями типу Релея-Плессета.

3. Розроблено експериментальний стенд на базі циліндричної кавітаційної камери для дослідження впливу акустичного поля на емульсійну систему із визначенням параметрів її стабілізації. Обґрунтовано фактори керування процесом стабілізації - потужність ультразвукового випромінювання, питома енергія обробки та температура середовища. Обґрунтовано комплекс фізико-хімічних та інструментальних методів оцінки якості конопляної емульсії.

4. Обґрунтовано доцільність проведення кваліметричної оцінки органолептичних показників за допомогою методу узагальненої функції бажаності Харрінгтона, який дає змогу об'єктивно перетворити якісні дескриптори на уніфіковані числові значення.

5. Для оптимізації конструктивно-технологічних параметрів процесу ультразвукової стабілізації та отримання адекватних математичних моделей обрано метод планування багатofакторного експерименту. Застосування ротатабельного центрального композиційного планування другого порядку за методом Бокса-Уїлсона дозволяє отримати квадратичні регресійні моделі цільових функцій при мінімізації кількості дослідів. Адекватність отриманих моделей та значимість коефіцієнтів регресії оцінювали за критеріями Фішера та Стюдента.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ І ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕМУЛЬСІЙНИХ СИСТЕМ З НАСІННЯ КОНОПЕЛЬ

3.1. Розробка алгоритму досліджень забезпечення кінетичної стабільності емульсійної системи

Відповідно до сучасних підходів харчової інженерії, розглядати харчові технологічні дисперсні середовища доцільно не як колоїдні суміші, а як ієрархічно організовані системи. При цьому кожен компонент середовища є елементом системи, кінцевим рішенням якої є забезпечення кінетичної стійкості за тривалого часу зберігання. Для реалізації такого підходу запропоновано алгоритм (рис. 3.1).

Розглянемо більш детально складові блоки розробленого алгоритму. На початковому етапі визначаються фізико-хімічні властивості інгредієнтів, зокрема жирового та білкового складу насіння конопель. Вплив застосованого в роботі методу ультразвукових коливань на компоненти системи дозволить визначити потенціал диспергування жирової фази та активування стабілізуючих властивостей білка едестину. Наступним етапом передбачено дослідження закономірностей розподілу енергетичних навантажень. На цьому етапі передбачено визначення енергетичних характеристик процесу, зокрема інтенсивності ультразвукових коливань та питомих енерговитрат на диспергування дисперсійного середовища. А також вирішується задача запобігання надмірного підвищення температури, що може негативно вплинути на структуру рослинних білків.

Розроблена на реальному уявленні процесу взаємодії кавітаційного поля з дисперсною системою фізична модель системи «ультразвуковий кавітатор – жирова емульсія» аргументовано адаптована в математичну модель.

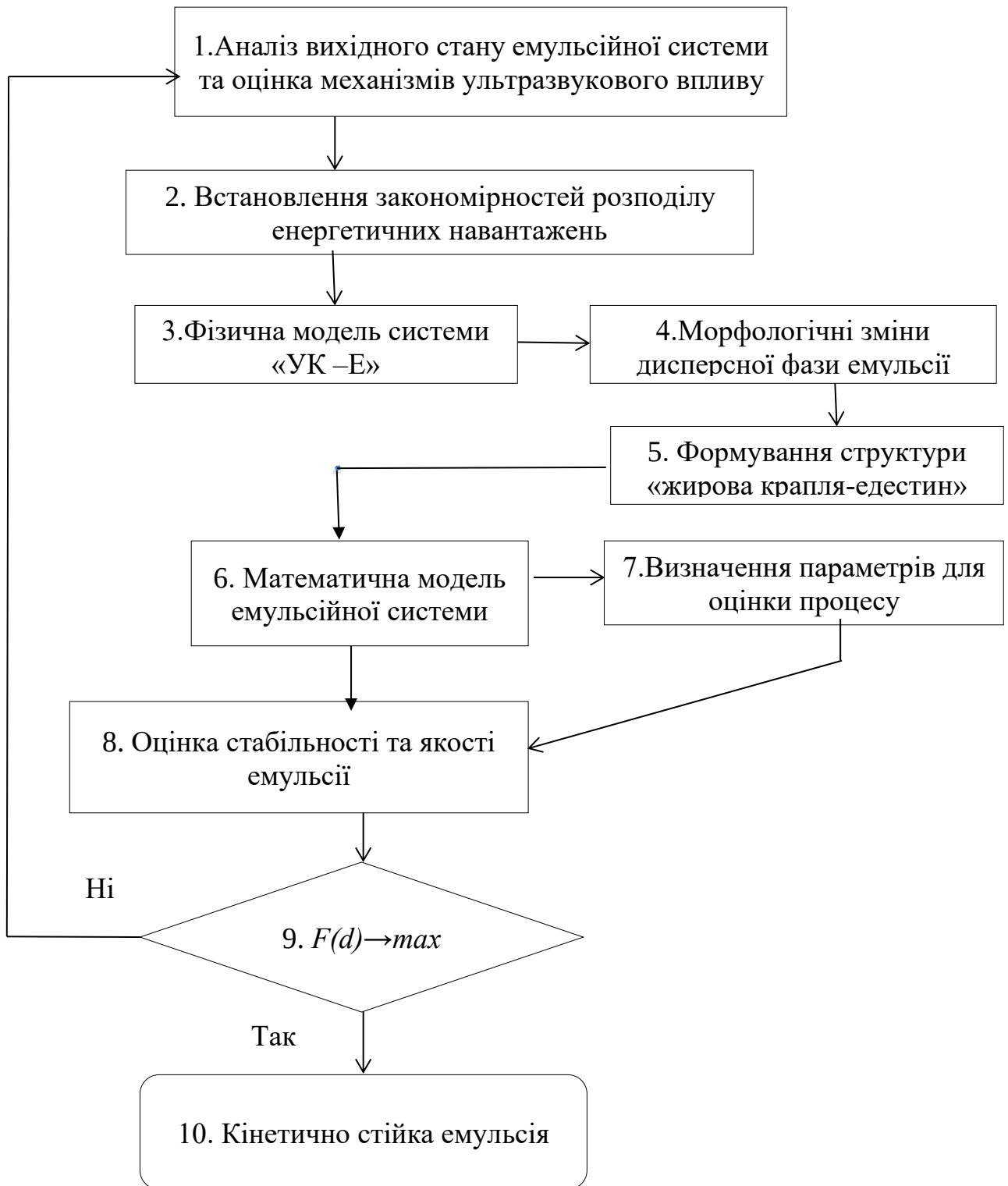


Рисунок 3.1. Алгоритм оцінки та забезпечення кінетичної стабільності емульсійної системи

Математична модель емульсійної системи методом планування багатофакторного експерименту дозволяє встановити функціональні залежності між незалежними чинниками та цільовими показниками стабільності. Отриманні рівняння регресії використані для прогнозування поведінки системи та побудови поверхонь відгуку. Внаслідок рішення відкривається можливість реально врахувати особливості утворення, розвитку та сплескування кавітаційних бульбашок, а також фізико-хімічних ефектів та результатів їх дії, які безпосередньо відповідають за подрібнення жирової фази. При цьому важливою складовою результату є оцінка кавітаційного впливу на морфологічні зміни дисперсної фази емульсії, зокрема білкових речовин. Кінетична стійкість системи формується за використання власних ресурсів шляхом створення захисного адсорбційного шару на поверхні подрібнених жирових крапель за участю молекул едестину. Інструментальні вимірювання ключових характеристик отриманої емульсії виступають кількісними індикаторами ефективності запропонованих техніко-технологічних рішень.

Багатофакторна оцінка показників якості та стабільності конопляної емульсії від середнього діаметра жирових глобул дозволяє встановити числові значення для емульсійної системи. Отримана за такою методикою досліджень кінетично стійка емульсія характеризується високою біодоступністю поживних речовин та стабільністю всіх фізико-хімічних показників у часі.

3.2. Обґрунтування фізичної моделі морфологічної трансформації та кінетичної стійкості нанодисперсних фаз конопляної емульсії

Для побудови узагальненої фізичної моделі морфологічної трансформації та кінетичної стабілізації нанодисперсних фаз конопляної емульсії в умовах ультразвукового кавітаційного впливу запропоновано послідовність етапів їх перетворення (рис. 3.2) [181].

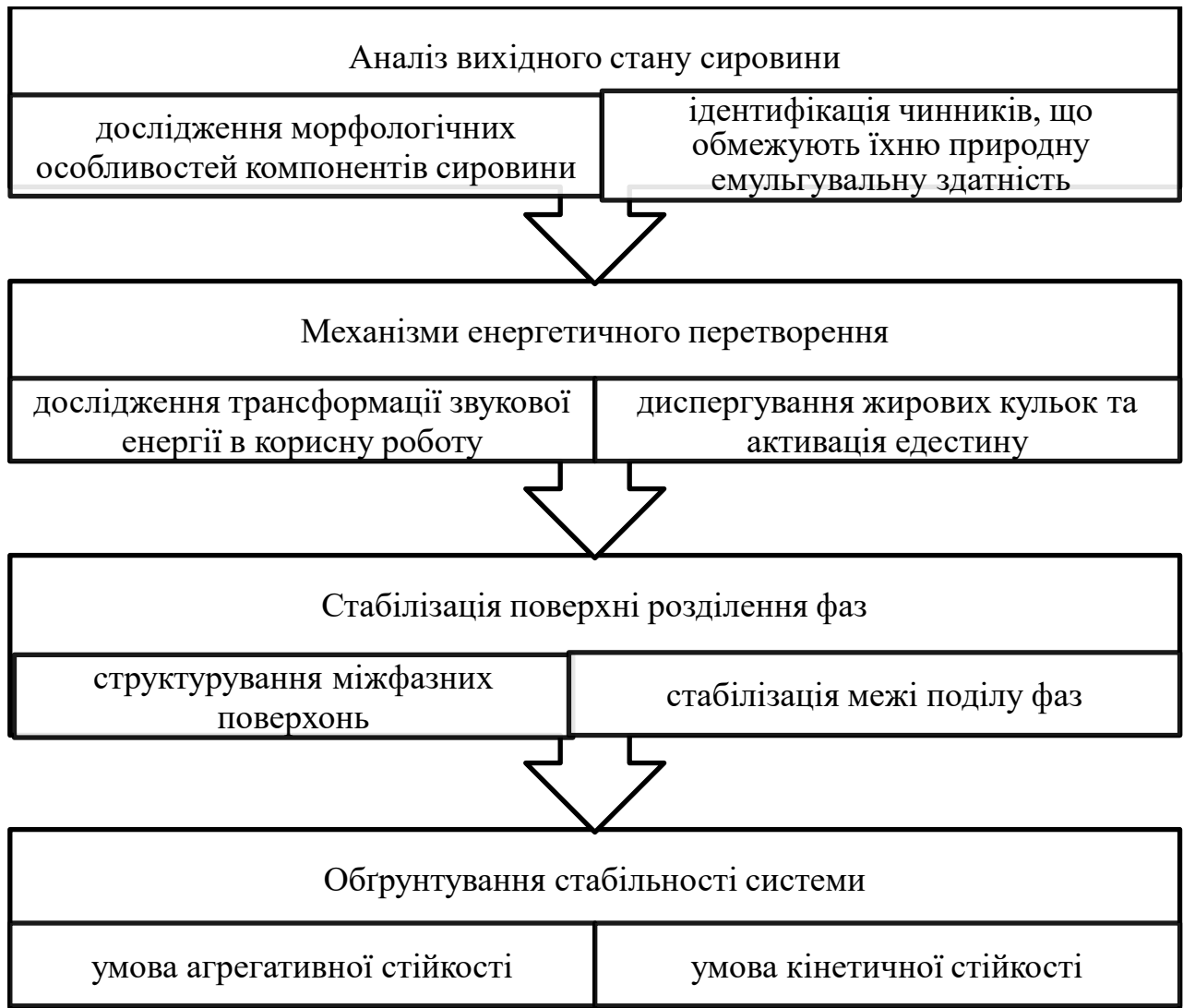


Рисунок 3.2. Блок-схема узагальненої фізичної моделі конопляної емульсії

Представлена модель побудована за системним підходом враховує аналіз вихідних морфологічних чинників ядра насіння конопель до синтезу наносистеми з прогнозованими властивостями через цілеспрямований акустомеханічний вплив. Такий підхід забезпечує досягнення необхідного балансу сил міжмолекулярної взаємодії, що є необхідною умовою для забезпечення агрегативної та кінетичної стійкості продукту.

Відповідно до запропонованої блок-схеми розглянемо етапи формування стабільної харчової матриці конопляної емульсії в умовах інтенсивного акустомеханічного впливу.

Етап I. Дослідження початкового стану емульсійної системи.

Розглянемо структуру насіння конопель. Ключові макронутрієнти у ньому в природному стані є просторово ізольованими структурами. Переважна частина ліпідів міститься у сім'ядолях у вигляді ліпідних тіл, які оточені фосфоліпідною мембраною в якій містяться білки олеозини. Білкові речовини розміщені у протеїнових тілах та, переважно, представляють собою едестином. Целюлоза, геміцелюлоза та пектин формують клітинні стінки насіння конопель, які, фактично, забезпечують зберігання макроелементи у нативному природному стані. Отже, суттєві зміни природного стану компонентів відбуваються за реалізації вилучення цільових компонентів з сировини. Зокрема, за механічного подрібнення та екстрагування водою система, фактично, переходить до стану грубої дисперсії. Дисперсну фазу такої неоднорідної системи представлено краплями конопляної олії, розмір яких перевищує $d > 10$ мкм.

За таких умов під дією гравітаційних сил відбувається швидке розшарування насіння конопель. Також у такому водному дисперсійному середовищі знаходяться і решта екстрагованих речовин, зокрема, нативні глобули едестину. Едестин високомолекулярний білок із молекулярною масою приблизно 300 кДа належить до 11S глобулінів. Він є олігомерним білком та містить шість однакових субодиниць. Кожен гексамер має молекулярну масу близько 50 кДа та складається з кислого та основного поліпептидних ланцюгів, які з'єднані між собою дисульфідним -S-S- зв'язком. У такому стані едестин має компактну конфігурацію.

Просторова структура едестину подібна до сплюсненого сфероїду сформованого шістьма субодиницями, яка має специфічну будову та має гідрофобне ядро і гідрофільну оболонку. В середині гідрофобного ядра розміщені

гідрофобні амінокислотні радикали. Гідрофільна оболонка розміщена навколо нього та містить гідрофільні групи, які взаємодіють з водою. Таким чином, у нативному стані едестину гідрофобні взаємодії є внутрішнім простором глобули, що обмежує його емульгувальну здатність.

Тобто така система є термодинамічно нестабільною у зв'язку з високим значенням надлишкової вільної енергії Гіббса на межі поділу фаз «олія-вода». Такий стан можна описати відомим рівнянням [53]:

$$\Delta G = \sigma \cdot \Delta A, \quad (3.1)$$

де ΔG - надлишкова вільна енергія системи; σ - поверхневий натяг на межі поділу фаз; ΔA - загальна площа поверхні розділення фаз.

Умова нестабільності емульсії характеризується значним поверхневим натягом та великою питомою площею поверхні жирових крапель. За такої умови система прагне до мінімізації вільної енергії Гіббса шляхом злиття крапель, як наслідок відбувається її розшарування.

Етап II. Динамічна система «ультразвук - емульсія».

В динамічній системі «ультразвук - емульсія» під дією ультразвукової обробки середовища відбувається трансформація акустичної енергії в корисну механічну роботу. Реалізація високоенергетичної дії забезпечує перехід з макрорівня на мікро- та нанорівні, що виникають в об'ємі емульсії. Тобто, закладаються передумови для формування стабільного колоїдного стану.

У періоди сплескування кавітаційних бульбашок відбувається вивільнення енергії, що супроводжується генерацією локальних ударних хвиль та кумулятивних мікроструменів. Швидкість цих хвиль може сягати 100-400 м/с, що створює потужні імпульсні навантаження на складові компоненти оброблюваної емульсії. Тобто, застосування ультразвукової кавітації приводить до проявлення низки фізико-хімічних явищ та гідродинамічних напружень зсуву, які також впливають на процес обробки.

Також варто відмітити наявність термомеханічного ефекту, який обумовлений виникненням локальних зон критичного підвищення температури у місцях сплескування кавітаційних бульбашок. При цьому мікролокальні температурні стрибки створюють умови для подолання енергетичного бар'єру, необхідного для зміни нативної глобулярної форми структури білка. Як наслідок, гідрофобні ділянки едестину стають доступними до взаємодії з ліпідною фазою.

Етап 3. Морфологічні зміни дисперсної фази.

При накладанні зовнішнього ультразвукового поля відбувається інтенсивне подрібнення жирової фази. Ультразвукова обробка створює зони інтенсивної турбулентності та високі градієнти швидкості, які за своєю величиною значно перевищують сили поверхневого натягу жирових глобул. Внаслідок цього великі краплі конопляної олії деформуються та розпадаються, як наслідок, відбувається поступове зменшення їх розміру.

Результат дії на жирову фазу визначається параметрами ультразвукового впливу. Паралельно з подрібненням жирових кульок відбувається суттєвий вплив і на білкову фракцію. За дії гідродинамічних навантажень та локального підвищення температури нативний білок едестин зазнає денатураційної активації. Під дією гідродинамічних ефектів впливу відбувається руйнування слабких нековалентних зв'язків (водневих, гідрофобних, іонних). Як наслідок, великий білковий комплекс розпадається на менші олігомери та окремі мономерні. Фактично відбувається перетворення структури з компактної глобулярної на розгорнуту.

Амфіфільність едестину зумовлено наявністю у структурі гідрофільної та гідрофобної груп. Така структура є передумовою для використання високої емульгувальної здатності білка, що дає йому ефективно взаємодіяти на межі розділу фаз, забезпечуючи стабільність емульсії.

Етап 3. Стабілізація жирових кульок модифікованими молекулами едестину.

Стабілізація жирових кульок модифікованими молекулами едестину обумовлена зниженням рівня міжфазового натягу, формуванням структурно-механічного бар'єру та на цій основі отримати електростеричну стабілізацію.

Оскільки система «олія-вода» має високу вільну енергію на межі поділу фаз, вона прагне до мінімізації цієї енергії шляхом зменшення площі контакту. При цьому, коефіцієнт дифузії білка зростає у зв'язку зі зменшенням його молекулярної маси, що забезпечує швидке адсорбування гідрофобної частини на поверхні жирових крапель.

Для розгорнутої структури едестину характерне зростання вільних сульфгідрильних груп, які вступають в реакції окислення між сусідніми молекулами та утворюють міжмолекулярні дисульфідні містки. В наслідок цього навколо жирових крапель формується суцільна в'язко-пружна білкова оболонка, яка перешкоджає їхньому злиттю. При цьому заряджені групи едестину на поверхні жирових кульок створюють однойменний заряд, що формує умови відштовхування крапель одна від одної. Розглянутий механізм формування білкових оболонок є одним із важливіших напрямків стабілізації жирових кульок.

Етап 4. Обґрунтування критеріїв кінетичної стійкості нанодисперсної системи конопляної емульсії в умовах кавітаційного впливу.

Стабільність системи базується на синергії двох факторів: мінімізації швидкості розшарування (кінетичний аспект) та створенні енергетичного бар'єру (енергетичний аспект).

Кінетична стійкість системи визначається швидкістю гравітаційного розшарування відповідно до закону Стокса:

$$\vartheta = \frac{2R^2g(\rho_{\text{д.с.}} - \rho_{\text{ж}})}{9\eta}, \quad (3.2)$$

де R – радіус частинки; g – прискорення вільного падіння; $\rho_{\text{д.с.}}, \rho_{\text{ж}}$ – густина дисперсійного середовища та жиру; η – динамічна в'язкість.

За умови досягнення нанорозміру часток та їх стабілізації необхідно запобігти агрегації жирових кульок. З цією метою розглянемо енергетичний стан системи, який описується балансом сил:

$$V_{\text{заг}} = (V_R + V_S) - |V_A|, \quad (3.3)$$

де $V_{\text{заг}}$ – сумарна потенційна енергія взаємодії; V_R – енергія електростатичного відштовхування; V_S – енергія просторового відштовхування; V_A – енергія молекулярного притягання.

Енергія молекулярного притягання для двох сферичних частинок однакового радіуса, що знаходяться на близькій відстані одна від одної за теорією Гамакера описується рівнянням:

$$V_A = -\frac{AR}{12H}, \quad (3.4)$$

де A – стала Гамакера, Дж; R – радіус жирової краплі, м; H – відстань між поверхнями крапель. Знак «-» вказує на спрямування енергії на притягування.

Оскільки V_A прямо пропорційна радіусу, енергія притягання між частинками суттєво зменшується порівняно з грубодисперсною емульсією. При цьому, за умови зниження величини енергії притягання між частинками, їхня кількість в одиниці об'єму зростає експоненціально. Як наслідок, середня відстань між ними скорочується, що потребує створення захисних оболонок з едестину для компенсації сил Ван-дер-Ваальса.

Енергія молекулярного притягання зумовлена дисперсійними силами Ван-дер-Ваальса. Вони виникають внаслідок утворення миттєвих диполів, які індукують появу аналогічних диполів у сусідніх краплях, що спричиняє їх взаємне притягання. Величина цієї енергії стрімко зростає при наближенні крапель одна до одної за гіперболічною залежністю. Якщо енергія притягання перевищує енергетичний бар'єр електростатичного відштовхування, відбувається коалесценція крапель.

Енергію електростатичної взаємодії V_R опишемо через потенціал поверхні:

$$V_R = 2\pi\epsilon\epsilon_0 R\zeta^2 \ln(1 + \exp(-kH)), \quad (3.5)$$

де $\varepsilon, \varepsilon_0$ - діелектрична проникність середовища та вакууму; ζ – електрокінетичний потенціал поверхні краплі (В); $1/k$ – товщина подвійного електричного шару; R – радіус частинки; H - відстань між частинками.

Енергію просторового відштовхування за моделлю Маккора можна представити як функцію від товщини адсорбційного шару:

$$V_S = \frac{100Rk_B T C^{3/2}}{L} \exp\left(-\frac{\pi H}{L}\right), \quad (3.6)$$

де L - товщина білкового захисного шару на поверхні краплі (м); C - ступінь покриття поверхні білком; k_B – стала Больцмана (Дж/К); T – абсолютна температура (К).

Стеричне відштовхування виникає у зв'язку з формуванням навколо жирових крапель шару з адсорбованих макромолекул білка. Коли жирові краплі наближаються одна до одної на відстань, меншу за подвійну товщину білкового шару, їхні адсорбційні оболонки починають перекриватися. У зоні контакту різко зростає локальна концентрація сегментів білкових ланцюгів, як наслідок, виникають умови за яких система прагне вирівняти концентрацію за використання надходження молекул води. Виникає осмотичний тиск, який відділяє краплі одна від одної.

Відповідно до вищезначеного умова стабільності базується на співвідношенні сил у системі, описується взаємопов'язаними нерівностями агрегативної та кінетичної стійкості.

Умову агрегативної стійкості представимо у вигляді залежності:

$$V_{max} = (V_R + V_S) - |V_A| \geq 20k_B T, \quad (3.7)$$

Агрегативної стійкості система досягає за умови досягнення критичного термодинамічного порогу, визначеного розширеною теорією ДЛФО [53]. Тобто сума електростатичного відштовхування та стеричного опору білкової оболонки єдинину має бути в 20 разів вищою за енергію теплового зіткнення часток, що

гарантує цілісність оболонок за можливих випадкових ударів частинок одна об одну.

Умову кінетичної стійкості представимо у вигляді залежності:

$$k_B T \gg E_g, \quad (3.8)$$

Кінетична стійкість конопляної емульсії ґрунтується на стані седиментаційної рівноваги, за якого енергія теплового броунівського руху значно перевищує гравітаційне осадження за законом Стокса та гарантує однорідність рослинного аналога молока протягом усього терміну зберігання.

Результатом такого комплексного підходу є узагальнена структурно-логічна схема стабілізації колоїдної системи напою з насіння конопель, яка наочно відображає послідовність переходів від первинних параметрів обробки до формування кінетично стійкої наносистеми з заданими властивостями (рис. 3.3).

Встановлення взаємозв'язку між вхідними технологічними чинниками та механізмами мікроструктурних змін дає змогу не лише контролювати процес кавітації, а й прогнозувати властивості рослинного напою.

Таким чином, кінетична стійкість нанодисперсної системи конопляної емульсії в умовах кавітаційного впливу досягається шляхом інтенсивного диспергування жирової фази та структурної модифікації білка едестину. Завдяки відкриттю активних центрів білка під дією кавітації, молекули едестину утворюють щільну захисну оболонку, що дозволяє використовувати електричний заряд і фізичний об'єм білка для стабілізації системи. У відповідності до розширеної теорії ДЛФО маємо умову $V_{\max} \geq 20k_B T$, реалізація якої унеможливорює злипання. Водночас зменшення радіуса жирових крапель забезпечує домінування енергії теплового броунівського руху над впливом гравітаційних сил, тобто $k_B T \gg E_g$. Отже, згідно із законом Стокса реалізація наведених умов є запорукою відсутності процесів седиментаційного розшарування та забезпечує її агрегативну стабільність протягом періоду зберігання.

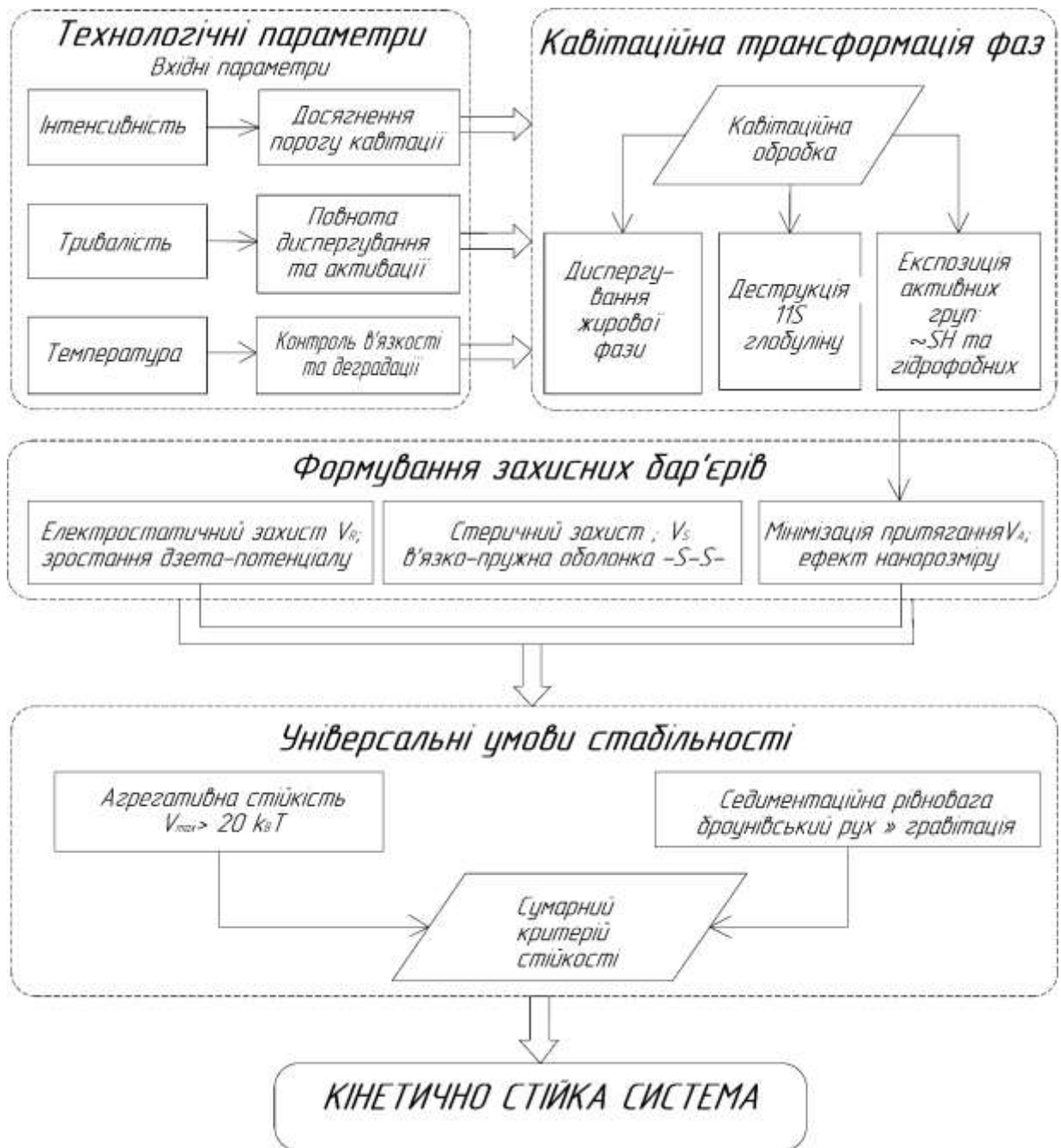


Рисунок 3.3. Узагальнена структурно-логічна схема стабілізації колоїдної системи напою з насіння конопель

В результаті розкрита сутність фізики процесу, розроблена модель механізму формування білкових оболонок, обґрунтовані критерії кінетичної стійкості нанодисперсної системи конопляної емульсії та запропонована

узагальнена структурно-логічна схема стабілізації колоїдної системи напою з насіння конопель.

3.3. Теоретичні дослідження процесів кавітаційного впливу на динаміку руху компонентів конопляної емульсії

3.3.1. Передумови та допущення

Ультразвукова кавітація характеризується утворенням, розвитком та сплескуванням парогазових бульбашок, внаслідок чого виникають величезні тиски, ударні хвилі, локальні температури у тисячі кельвінів, мікрострумені великої швидкості та тиски у тисячі атмосфер. Ці явища за умов досліджених та визначених необхідних параметрів кавітаційного процесу забезпечують ефективне подрібнення наявних в емульсії жирових кульок, отриманням ефектів гомогенізації та стабілізації емульсії. Незважаючи на виконані раніше дослідження [107, 181] механізм подрібнення не в повній мірі вивчений, особливо для емульсій при готуванні рослинного напою на основі використання насіння конопель. В роботі висувається ідея використати ефекти резонансу на стадії сплескування бульбашки із забезпеченням раціональної відстані до жирової кульки на досліджених вище результатах (див.п. 3.1, 3.2). З цією метою розглянуто динаміку кавітаційної бульбашки із застосуванням рівняння Релея-Плессета для моделювання поведінки радіуса бульбашки $R(t)$ у часі:

$$\rho_L(R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2) = P_g(t) + P_v - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu\dot{R}}{R} - P_\infty(t) \quad (3.9)$$

де $R(t)$, $\dot{R}$, $\ddot{R}$ - миттєвий радіус бульбашки, швидкість та прискорення стінки бульбашки відповідно; ρ_L - густина емульсії; μ - динамічна в'язкість емульсії; σ - коефіцієнт поверхневого натягу бульбашки; $P_\infty(t)$ - змінний тиск у емульсії на значній відстані від бульбашки; $P_g(t)$ - тиск газу та пари всередині бульбашки.

Фізичне визначення складових рівняння наступне:

-інерційний член $\rho_L(R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2)$ описує інерцію приєднаної маси емульсії;

-різниця між внутрішнім тиском (газ P_g + пара P_v) і зовнішнім тиском $P_\infty(t)$.

Внутрішній тиск газу зазвичай моделюється політропічним процесом:

$$P_g = P_{g0}(R_0/R)^{3k}, \quad (3.10)$$

де k - показник політропи (від 1 для ізотермічного до γ для адіабатичного процесу;

- надлишковий тиск $\frac{2\sigma}{R}$, зумовлений поверхневим натягом – це тиск, що стискає бульбашку. Зменшення R призводить до зростання цього тиску, прискорюючи сплескування бульбашки;

- в'язкий член $\frac{4\mu\dot{R}}{R}$, який враховує витрати енергії на в'язке тертя на межі бульбашки.

3.3.2. Дослідження динаміки системи «акустичний апарат – кавітаційна бульбашка»

Кавітаційна бульбашка при математичному моделюванні володіє масою m_b , коефіцієнтом пружності c_b та коефіцієнтом опору b_b і її спільний рух разом з перетворювачем ультразвукового кавітатора в контактній зоні описується таким рівнянням:

$$m\ddot{x} + b_b\dot{x} + c_b x = F(t) \quad (3.11)$$

де, $m = m_k + \alpha m_b$ – сумарна маса ультразвукового кавітатора та приєднана маса бульбашки в контактній зоні системи «перетворювач кавітатора –бульбашка»; α – коефіцієнт приєднаної маси бульбашки; $\ddot{x}, \dot{x}, x$ – переміщення, швидкість та прискорення бульбашки в контактній зоні відповідно; F, t – амплітуда зовнішньої сили ультразвукового кавітатора та потоковий час.

Рішення наведеного рівняння має вигляд:

$$x = A_0 \sin(\omega t + \alpha) \quad (3.12)$$

де A_0, α - амплітуда коливань бульбашки та фаза, що враховує зсув між силою,

що діє на бульбашу та її переміщенням.

Підставивши (3.12) в (3.11) після нескладних перетворень отримуємо аналітичну залежність для визначення амплітуди сталих коливань бульбашки, A_0 :

$$A_0 = \frac{F_0}{\sqrt{(c_6 - m\omega^2)^2 + (b_6 + \omega)^2}} \quad (3.13)$$

Важливість формули (3.13) полягає в тому, що вона враховує реологічні властивості бульбашки (коефіцієнт пружності c_6 та коефіцієнт опору b_6), визначення яких і є предметом досліджень. Окрім цього, за умови реалізації резонансного режиму, який відбувається за умови:

$$c_6 - m\omega^2 = 0, \text{ тобто } c_6 = m\omega^2 \quad (3.14)$$

Із формули (3.13) із врахуванням (3.14) отримаємо вираз для визначення амплітуди коливань бульбашки в резонансі:

$$A_{0p} = \frac{F_0}{b_6\omega} \quad (3.15)$$

А із умови (3.14) отримаємо вираз для визначення резонансної частоти коливань ω_0 , яка є в зоні резонансу рівною вимушеній частоті коливань бульбашки ω , тобто $\omega_0 = \omega$:

$$\omega_0 = \sqrt{c_6/m} \quad (3.16)$$

Для визначення власної частоти коливання бульбашки, розглянуто її вільні коливання. Тоді рівняння (3.11) буде мати вигляд:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = 0 \quad (3.17)$$

Рішення рівняння (3.17) представимо у вигляді:

$$x = A_0 e^{st} \quad (3.18)$$

Показник ступеня s , що характеризує згасання, визначається подвійним диференціюванням рішення

$$\dot{x} = A_0 s e^{st}, \ddot{x} = A_0 s^2 e^{st}. \quad (3.19)$$

Значення x і його похідних підставляємо в рівняння (3.17). Тоді отримаємо

рівняння у вигляді:

$$(ms^2 + bs + c)A_0e^{st} = 0. \quad (3.20)$$

Оскільки $x = A_0e^{st}$ не може бути рівним нулю, то рівним нулю буде вираз $ms^2 + bs + c = 0$, який є звичайним квадратним рівнянням. Його рішення відоме:

$$s_{1,2} = \frac{(-b \pm \sqrt{b^2 - 4mc})}{2m} = -\frac{b}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{b}{2m}\right)^2 - \frac{c}{m}}. \quad (3.21)$$

Корінь рівняння в комплексній формі запишеться у вигляді:

$$s_{1,2} = -\frac{b}{2m} \pm i\sqrt{\frac{c}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2}, \quad (3.22)$$

де $i = \sqrt{-1}$.

Тоді загальне рішення шуканого рівняння:

$$x = A_0e^{(-bt/2m) \pm iqt} = A_0e^{-bt/2m} \cdot e^{iqt}. \quad (3.23)$$

При використанні формули Ейлера [182]:

$$e^{iqt} = \cos qt + i \sin qt, \quad (3.24)$$

наведений розв'язок остаточно може бути записане у вигляді:

$$x = e^{-\frac{bt}{2m}}(A_1 \cos qt + A_2 \sin qt), \quad (3.25)$$

де q – частота власних коливань із згасанням:

$$\omega_{o.z.} = \sqrt{\frac{c}{m} - \left(\frac{bt}{2m}\right)^2}. \quad (3.26)$$

Як впливає із залежності (3.26) частота власних коливань системи із загасанням буде менше частоти власних коливань без загасання (3.16). Цей результат є важливим при визначенні параметрів кавітаційного процесу руху бульбашки. Тепер визначимо масу бульбашки m_δ та коефіцієнт її пружності c_δ через врахування властивостей бульбашки у явному вигляді:

$$m_\delta = 4\pi R_0^3 \rho; \quad c_\delta = 12\pi\gamma R_0 \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0}\right), \quad (3.27)$$

де ρ – щільність бульбашки, R_0 – розмір бульбашки, p_0 – амплітуда тиску, σ –

поверхневий натяг.

Зовнішню силу $F(t)$ виразимо через тиск на бульбашку із врахуванням її площі:

$$F(t) = p_{ak} (4\pi R_0^2), \quad (3.28)$$

де p_{ak} - акустичний тиск, який змінюється у часі t за законом:

$$p_{ak} = p_0 \cos \omega t. \quad (3.29)$$

Використовуючи формулу (3.16) здійснимо заміну маси бульбашки m_b та коефіцієнт її пружності c_b враховуючи залежність (3.17). Тоді отримаємо вираз для визначення резонансної частоти у вигляді:

$$\omega_0 \cong \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{3\gamma(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0})}{\rho}}. \quad (3.30)$$

Тепер, враховуючи (3.27) і (3.28) та приймаючи умову, що переміщення бульбашки здійснюється за законом (3.12), отримаємо вираз для визначення амплітуди коливань бульбашки із врахуванням реологічних властивостей бульбашки:

$$A = \frac{P_{am} (4\pi R_0^2)}{[12\pi\gamma R_0(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0})] - (\omega^2 4\pi R_0^3 \rho)}. \quad (3.31)$$

Формула (3.16), як і формула (3.30) відображає вплив пружних та інерційних властивостей бульбашки. А для врахування дисипативних властивостей бульбашки використана формула [183]:

$$\omega_{en} = \sqrt{[\frac{3\gamma}{\rho R_0^2} (P_0 + \frac{2\sigma}{R_0}) - \frac{2\sigma}{\rho R_0^3} + \frac{2c_{np}}{\rho R_0^3}] - (\frac{2\pi\delta_{np}}{\omega})^2}. \quad (3.32)$$

Пружні та інерційні властивості у формулі (3.32) представлені першим підкореневим виразом, а дисипативні другим підкореневим виразом. Розрахунки, здійснені за формулою (3.32) для емульсії, наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

**Розрахункові значення відносної амплітуди коливань бульбашки для
різних режимів демпфування**

№	Варіант розрахунку	Кофіцієнт опору (дисипація), b	Відношення частот коливань, ω / ω_0	Відношення амплітуди коливань, A/A_0
1	1.1	0,00	0,75	2,29
	1.2		1,00	∞
	1.3		1,50	0,80
2	2.1	0,10	0,75	2,25
	2.2		1,00	10,00
	2.3		1,50	0,79
3	3.1	0,15	0,75	2,21
	3.2		1,00	6,67
	3.3		1,50	0,79
4	4.1	0,20	0,75	2,16
	4.2		1,00	5,00
	4.3		1,50	0,78
5	5.1	0,30	0,75	2,03
	5.2		1,00	3,33
	5.3		1,50	0,75

Таким чином, вибір оптимального співвідношення частот та врахування опору середовища є ключовими для стабілізації кавітаційних бульбашок. Такий підхід дозволяє прогнозувати необхідну інтенсивність ультразвукового впливу на технологічне середовище з метою забезпечення стабільності емульсії типу «олія у воді».

3.3.3. Математичне моделювання та дослідження процесів взаємодії кавітаційної бульбашки із жировою кулькою

У реальній емульсії бульбашка рухається за наявності також і жирової кульки, внаслідок чого порушується сферична симетрія потоку емульсії навколо бульбашки. Це порушення симетрії є фундаментальною причиною виникнення мікроструменів.

Розглянемо рух бульбашки із врахуванням взаємодії з жировою кулькою. Рівняння руху враховує інерційну $F_{\text{ін}}$, дисипативну $F_{\text{дис}}$ та силу, що враховує взаємодію між бульбашкою та жировою кулькою $F_{\text{вз}}$. Ці сили в диференціальній формі представлені рівнянням виду:

$$\frac{d}{dt}(M_6 v_b) = F_{\text{ін}} + F_{\text{дис}}, \quad (3.33)$$

або в скалярній формі для координати L , яка представляє собою відстань між центрами бульбашки та жирової кульки:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{2}{3}\pi\rho R^3 L\right) = F_{\text{ін}}(L) - 6\pi\eta RL \quad (3.34)$$

Перший член цих рівнянь представляє інерційну складову, яка враховує приєднану масу бульбашки з емульсією, за дискретною моделлю має вигляд:

$$M_6 = \frac{2}{3}\pi\rho R^3 \quad (3.35)$$

Достовірність цієї формули залежить від співвідношення лінійного розміру прийнятої довжини в напрямку розповсюдження хвиль L та довжини хвилі λ . За умови, що $L < \lambda$, формула (3.35) може бути використана, а якщо $L > \lambda$ то необхідно враховувати хвильовий рух за континуальною моделлю.

Дисипативна сила за моделлю Кельвіна-Фойгта у рівняннях має наступний вигляд:

$$F_{\text{дис}} = 6\pi\eta RL \quad (3.36)$$

Тут розсіяння енергії враховується коефіцієнтом згасання коливань η . Вплив цієї сили є показником опору зближення між бульбашкою та жировою

кулькою.

Сила, що виникає та враховує взаємодію між бульбашкою та жировою кулькою дістала назву сила Б'єркнеса і у випадку, коли жирова кулька розглядається як частинка, що відбиває хвилі тиску бульбашки, сила притягання розраховується через градієнт тиску:

$$F_{\text{ін}} = -\frac{\rho}{4\pi L^2} \frac{dV_b}{dt} \frac{dV_p}{dt} \quad (3.37)$$

Важливим результатом наведених рівнянь (3.33), (3.34) та їх складових (3.35), (3.37) є визначення швидкості наближення відстані від поверхні жиру за яким відбудеться сплескування. Зменшення відстані L призводить до порушення сферичної симетрії бульбашки. Саме цей висновок є передумовою для визначення процесу руйнування жирових кульок та білкових конгломератів у жировій емульсії з насіння конопель.

Сплескування кавітаційної бульбашки відбувається за умови, коли амплітуда деформації a_n стає порівнянною з радіусом бульбашки R . Швидкість руху стінок кавітаційної бульбашки залежить від відстані до жирової кульки. В результаті цього відбувається формування кумулятивного мікроструменя, який проколює жирова кульку наскрізь. Розглянутий процес доцільно описати параметром μ , який розглянемо як відношення відстані від центру зародження бульбашки до поверхні жирової кульки та до максимального радіусу, якого досягає бульбашка у фазі розширення:

$$\mu = d/R_{\text{max}} \quad (3.38)$$

В залежності від числових значень параметра μ можливі наступні типи взаємодії кавітаційної бульбашки із жировою кулькою:

1. $\mu \ll 1$ - бульбашка охоплює частину поверхні жирової кульки або знаходиться в безпосередньому контакті, домінує формування потужного мікроструменя;

2. $\mu = 1$ - бульбашка сплескується поблизу жирової кульки, ударна хвиля має значну інтенсивність, часткова дисипація енергії мікроструменя в

емульсії;

3. $\mu > 1$ - взаємодія слабшає, мікрострумінь може не досягати жирової кульки або не формуватися зовсім.

Аналіз наведених режимів взаємодії свідчить про те, що інтенсивність та характер подрібнення жирової фази залежать від просторового розташування кавітаційної бульбашки. Відповідно до чого подрібнення жирових кульок відбувається, або гідродинамічним мікроструменем, або ударною хвилею.

Із зростанням температури з 20 до 40 °C амплітуда пульсацій збільшується. Це зумовлено зниженням в'язкості з 4,2 до 2,3 мПа·с, що зменшує дисипативні втрати енергії. При 40 °C сплескування бульбашки відбувається інтенсивніше, що генерує вищі пікові тиски, необхідні для дезінтеграції жирових кульок. Графік відстані засвідчує, що бульбашка під дією сил Б'єркнеса невпинно наближається до жирової кульки.

При 40 °C швидкість наближення значно вища. Менша в'язкість емульсії дозволяє бульбашці швидше подолати відстань до частинки жирової кульки, що підвищує ймовірність удару саме по поверхні жирової кульки. Амплітуда деформації (поверхнева нестабільність) різко зростає в моменти стиснення бульбашки. Найвищі значення спостерігаються при 40 °C. Це свідчить про те, що зниження поверхневого натягу та в'язкості сприяє швидшій втраті сферичної форми та формуванню кумулятивного мікроструменя який є основним інструментом подрібнення жиру в емульсії.

Поведінка мікроструменя поблизу жирової кульки залежить від співвідношення розмірів бульбашки R_b та жирової кульки R_k , а також відстані між ними L , яка може мати різні співвідношення:

– розмір бульбашки менше розміру жирової кульки, $R_b \ll R_k$. Велика жирова кулька сприймається маленькою бульбашкою як плоска стінка. Мікрострумінь спрямований до жирової кульки. Удар струменя викликає ерозію поверхні краплі або її глибоку деформацію;

– розмір бульбашки більше розміру жирової кульки, $R_b \gg R_k$. Якщо бульбашка значно більша за краплю, мікрострумінь може бути спрямований від жирової кульки, але потоки емульсії, що втягуються в зону сплескування, створюють сильні розтягуючі зусилля.

– розмір бульбашки дорівнює розміру жирової кульки, $R_b = R_k$. Найскладніший випадок, де обидва об'єкти деформуються. Чисельне моделювання показує, що мікрострумінь може пронизувати жирову кульку наскрізь, розбиваючи її на дві частини та створюючи велику кількість дрібних частинок.

3.3.4. Визначення раціональних режимів та параметрів ультразвукової дезінтеграції жирових кульок

Теоретичні розрахунки здійснювалися на основі даних, приведених в таблиці (табл. 3.2) та за результатами аналізу робіт [183, 184].

Таблиця 3.2

Фізико-механічні параметри дослідження

№ п/п	Назва параметра	Числове значення
1	Щільність	900...1100 кг/м ³
2	Поверхневий натяг	0,02...0,09 Н/м
3	Початковий радіус бульбашки	2...7 мкм
4	Кінцевий радіус бульбашки	120...300 мкм
5	Коефіцієнт дисипативного опору	0,05...0,2
6	Вихідна частота коливань	15...60 кГц
7	Тиск	80...100 кПа

Розрахунки за даними табличних значень (табл. 3.3) засвідчили, що частота коливань є домінуючим параметром. Було встановлено, що підвищення частоти f вище 40 кГц призводить до зменшення максимального радіуса $R_{\max}$ кавітаційної

бульбашки, при постійному значенні інтенсивності коливань. Такий результат обумовлений тим, що з ростом f скорочується час, протягом якого величина звукового тиску перевищує зовнішні сили, які утримують бульбашку в стані рівноваги.

Таблиця 3.3

Фізико-механічні параметри дослідження

Параметр	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Частота ультразвуку	f	кГц	20
Амплітуда тиску	P_A	10^5 Па	5
Гідростатичний тиск	P_0	10^5 Па	1
Густина води	ρ_L	кг/м ³	1000
Поверхневий натяг	σ	Н/м	0,072
Міжфазний натяг	σ_H	Н/м	0,025
В'язкість олії	$\mu_{\text{ж}}$	Па·с	0,05
Початковий діаметр краплі	d	мкм	50
Початковий радіус бульбашки	R_0	мкм	5

В результаті аналізу отриманих числових значень (табл.3.2. та табл.3.3.) та сформованих у другому розділі методів дослідження визначені основні режими та параметри ультразвукової обробки емульсії.

Раціональний режим передачі енергії. Ефективність передачі енергії від ультразвукового поля до бульбашки максимальна при резонансі. Для визначення умови резонансу $\omega_{\text{в.т}} = \omega_{\text{рез}} = \omega_{\text{вим}}$ використана формула (3.32) [107].

Оптимальна частота ультразвукових коливань. Рекомендована частота, яка забезпечує резонанс при досягненні максимального радіуса кавітаційної бульбашки R_{max} має бути в межах 20...25 кГц для даних параметрів.

Амплітуда ультразвукових коливань. Амплітуда є дуже важливим параметром, а її значення та зміна залежить від частоти для забезпечення необхідного значення інтенсивності коливань:

$$I = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 A^2, \quad (3.39)$$

де ρ – щільність (густина) емульсії; c – швидкість розповсюдження хвиль в емульсії; $\omega = 2\pi f$ – частота коливань в рад/с; f – частота коливань в Гц; A – амплітуда коливань в мкм.

Із (3.39) отримана формула для визначення амплітуди коливань:

$$A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho c}} \quad (3.40)$$

В таблиці 3.4. наведені синтезовані оптимальні параметри із оцінкою їх впливу на протікання процесу ультразвукової кавітаційної обробки емульсії.

Таблиця 3.4

Оптимальні параметри процесу ультразвукової кавітаційної обробки емульсії

Параметр	Оптимальне значення	Оцінка впливу параметрів на обробку насіння конопель
Частота	20 кГц	Забезпечення ефективної реалізації енергії ударних хвиль для протікання процесу обробки емульсії.
Амплітуда	4...6 мкм	Оптимізація процесу ультразвукової кавітаційної обробки емульсії
Енергоємність	300–500 кДж/кг	Досягнення заданого результату за рахунок встановлення взаємозв'язку між потужністю випромінювання та тривалістю обробки необхідного для встановлення балансу між процесами диспергування та агрегації.
Температура	< 50°C	Запобігання термічній коагуляції едестину; мінімізація окислення

Визначені числові значення оптимальних параметрів є базовими для розробки вдосконаленої технології процесу ультразвукової кавітаційної обробки емульсії із насіння конопель.

3.4. Фізико-математичне обґрунтування та визначення оптимального розміру жирових крапель конопляної емульсії

Визначення оптимального розміру жирових крапель конопляної емульсії базується на представленні жирової глобули як складної структури типу «ядро-оболонка». За такого уявлення системи жирове ядро оточене адсорбційним шаром гідратованого білка едестину. Фізико-хімічна стабільність такої системи визначається балансом сил, що діють на частку в емульсії. За такого підходу середню ефективну густину структури «ядро-оболонка» прирівнюємо до густини емульсії, що усуває можливість гравітаційного осадження жирових крапель конопляної емульсії.

3.4.1. Теоретичне обґрунтування та дослідження седиментаційної стабільності емульсії на основі врахування геометричних розмірів жирової кульки

Седиментаційна стабільність визначає здатність середовища опиратися гравітаційному впливу. Порушення цієї стабільності призводить до розшарування системи, як наслідок, втрата функціональних властивостей та зменшення терміну зберігання продукту.

Для емульсії типу «олія у воді» швидкість кремінгу v визначається законом Стокса, який описує фізику седиментаційної нестійкості системи (3.2).

Для емульсії з насіння конопель для жирових крапель за умови відсутності адсорбційного шару едестину на поверхні $\rho_{\text{ед}}$ дорівнює густині жиру $\rho_{\text{ж}}$. Оскільки $\rho_{\text{ж}} < \rho_{\text{д.с.}}$, жирові краплі спливають. Проте, за умови формування білкової оболонки з едестину навколо жирової кульки доцільно розглядати

систему «ядро-оболонка» [50, 181].

За таких умов густину системи «ядро-оболонка» розраховуємо як середньозважену:

$$\rho_{\text{сис}} = \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot V_{\text{ж}} + \rho_{\text{ед}} \cdot V_{\text{ед}}}{V_{\text{ж}} + V_{\text{ед}}} \quad (3.41)$$

де $V_{\text{ж}}$ - об'єм ліпідного ядра, а $V_{\text{ед}}$ - об'єм гідратованого шару едестину.

Якщо позначити товщину адсорбційного шару едестину як δ , то за певних значень радіуса жирової краплі r для нанорозмірних емульсій густина системи «ядро-оболонка» може наближатися до густини емульсії. Це призводить до компенсації сили тяжіння виштовхувальною силою Архімеда, внаслідок чого настає стан нейтральної плавучості та робить систему седиментаційно стійкою.

Якщо густина глобули едестину в гідратованому стані 1350 кг/см^3 , тобто густина адсорбційного шару $\rho_{\text{ед}}$ є значно вищою за густину жиру та води. За ультразвукового кавітаційної обробки відбувається розгортання молекул білка та знижує густину до 1210 кг/м^3 . Таким чином, збільшення товщини δ призводить до зростання $\rho_{\text{сис}}$. Коли $\rho_{\text{сис}}$ наближається до $\rho_{\text{д.с.}}$, різниця густин прямує до нуля, що робить емульсію стабільною проти гравітаційного розділення незалежно від розміру крапель. Вплив кількості білка на стабільність емульсії є важливим показником. Коли кількість едестину менша за розрахункову величину $C_{\text{ед}}$, система переходить у стан термодинамічного та механічного дисбалансу.

Для проектування кінетично стійкої емульсійної системи запропоновано алгоритм розрахунку параметрів нейтральної плавучості конопляної емульсії (рис. 3.4).

У алгоритмі на початковому етапі задаються фізичні константи жирової фази $\rho_{\text{ж}}$ та гідратованого едестину $\rho_{\text{ед}}$, а також змінні параметри системи: цільова жирність $C_{\text{ж}}$, початкова густина емульсії $\rho_{\text{сис}}$ та точність розрахунку ε . Алгоритмом передбачено послідовне наближення до шуканого значення через лічильник ітерацій i . На кожному кроці розраховується об'ємний коефіцієнт k_i ,

який визначає співвідношення об'ємів білкової оболонки та жирового ядра для досягнення нейтральної плавучості.

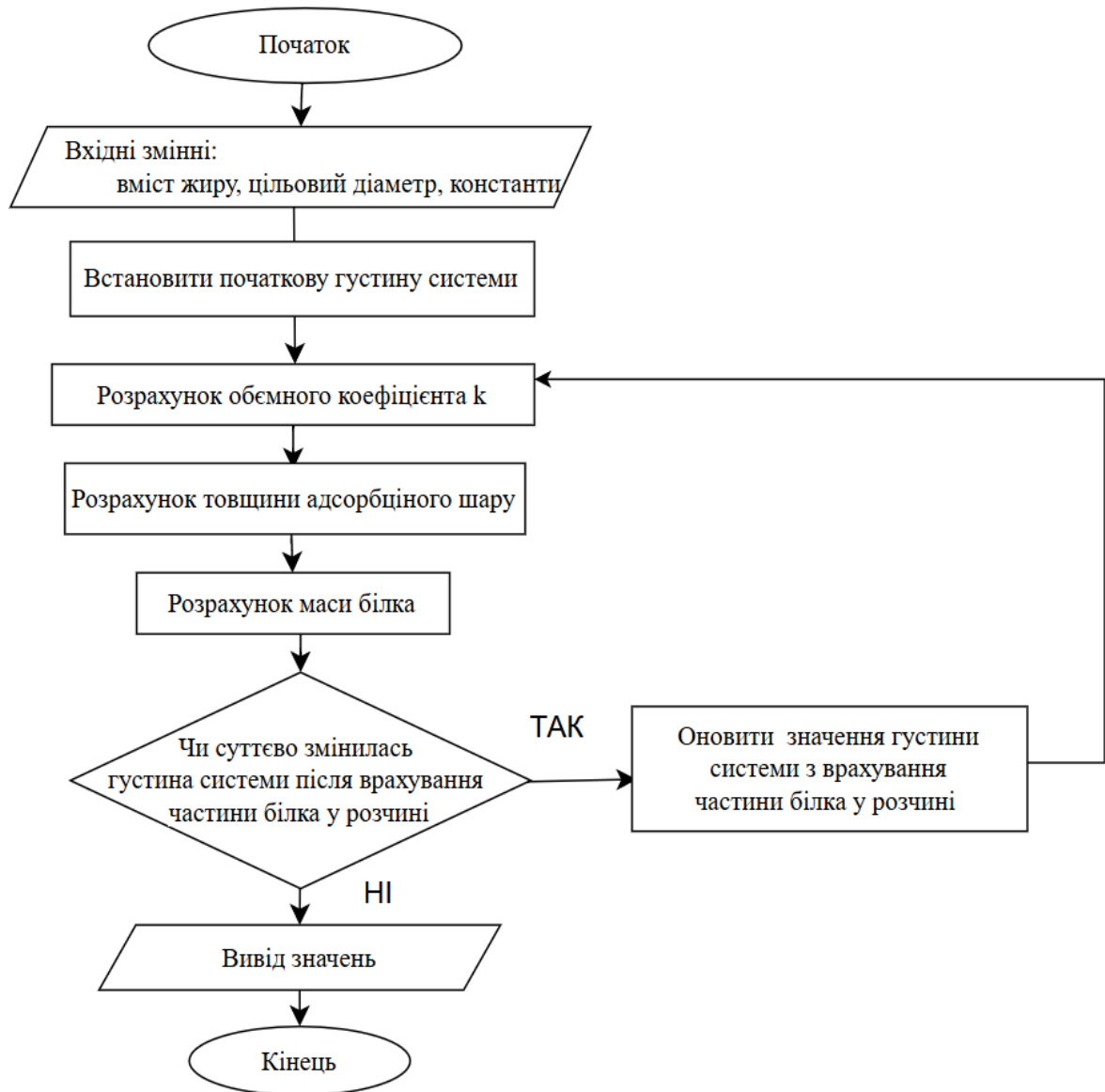


Рисунок 3.4. Блок-схема ітераційного алгоритму розрахунку параметрів нейтральної плавучості дисперсної фази конопляної емульсії

Також враховано зміну фізичних властивостей емульсії за зміни концентрації масової частки сухих речовин. За умови зміни густини емульсії вище похибки, система повертається до повторного розрахунку коефіцієнтів з

уточненими даними. При досягненні збіжності алгоритм виводить кінцеві значення необхідної концентрації білка C_{ed} та товщини адсорбційного шару δ , що забезпечують ізопікнічну рівновагу системи. Розроблений алгоритм використаний для розрахунку рецептурного складу рослинних напоїв з насіння конопель. В основі алгоритму запропоновано новий підхід розгляду кінетичної стабільності як динамічного балансу мас і густин на відміну від звичайної статичної рецептури. Аналітична залежність товщини оболонки δ від параметрів системи при дотриманні умови нейтральної плавучості є ключовим інструментом для проектування стабільних емульсій.

З метою забезпечення седиментаційної стійкості конопляного напою важливим є розрахунок δ . Шляхом чисельного рішення рівняння нейтральної плавучості $\rho_{\text{сис}} = \rho_{\text{д.с.}}$ отримано графічну інтерпретацію залежності товщини адсорбційного шару єдинину δ від діаметра жирових кульок d (рис. 3.5).

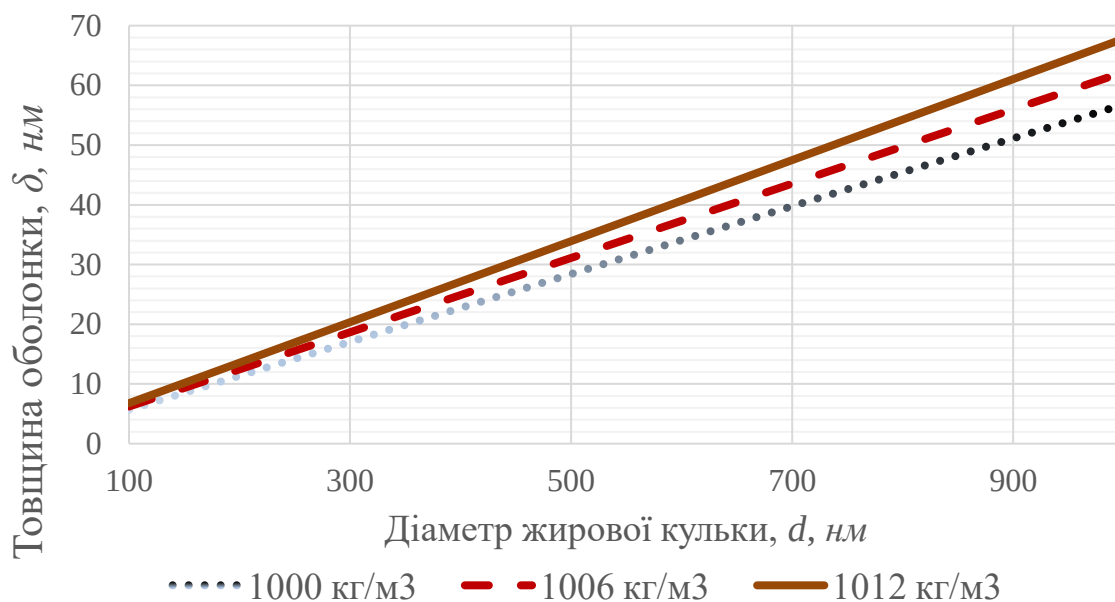


Рисунок 3.5. Моделювання товщини оболонки δ залежно від діаметра жирових кульок

Аналіз отриманих розрахункових даних (рис. 3.5) дозволив встановити, що між діаметром жирових кульок та необхідною товщиною адсорбційного шару едестину існує пряма лінійна залежність. Це свідчить про те, що для збереження стану нейтральної плавучості при збільшенні розміру часток товщина захисної білкової оболонки має пропорційно зростати. Також встановлено вплив густини емульсії. Збільшення вмісту розчинених сухих речовин у сироватці (альбумінів та вуглеводів) призводить до зростання виштовхувальної сили Архімеда, що потребує збільшення товщини білкових оболонок. Визначено критичну межу стабілізації для наночасток діаметром менше 200 нм. Встановлено, що для таких середовищ розрахункова товщина оболонки δ наближається до мінімально можливого розміру розгорнутої молекули едестину 15 нм.

Для оцінки рецептурних параметрів системи було проведено розрахунок показників для зразка емульсії з масовою часткою жиру 5% (табл. 3.5).

Таблиця 3.5

**Модель нейтральної плавучості для емульсії з насіння конопель,
вміст жиру 5%**

Густина дисперсійного середовища, кг/м ³	Об'ємний коефіцієнт, k	% білка від маси жиру	Масова частка білка, %
1000	0,381	50,1	2,51
1006	0,422	55,4	2,77
1012	0,465	61,1	3,06

За результатами моделювання (табл. 3.5) встановлено необхідну кількість едестину для досягнення стану нейтральної плавучості при різних значеннях густини дисперсійного середовища. Результати розрахунків свідчать про пряму кореляцію між густиною дисперсійного середовища та масовою часткою білка. Таким чином, для рослинного напою з ядра насіння конопель сорту Глесія з

вмістом жиру 5% необхідна концентрація едестину у межах 2,51-3,06% для формування седиментаційно стійкої системи.

Оскільки застосування ультразвукової кавітації для стабілізації емульсійної системи дозволяє мати досить широкий діапазон розмірів жирових глобул, доцільно з'ясувати вплив діаметра часток середовища на необхідну концентрацію білка для забезпечення седиментаційної стійкості (рис. 3.6).

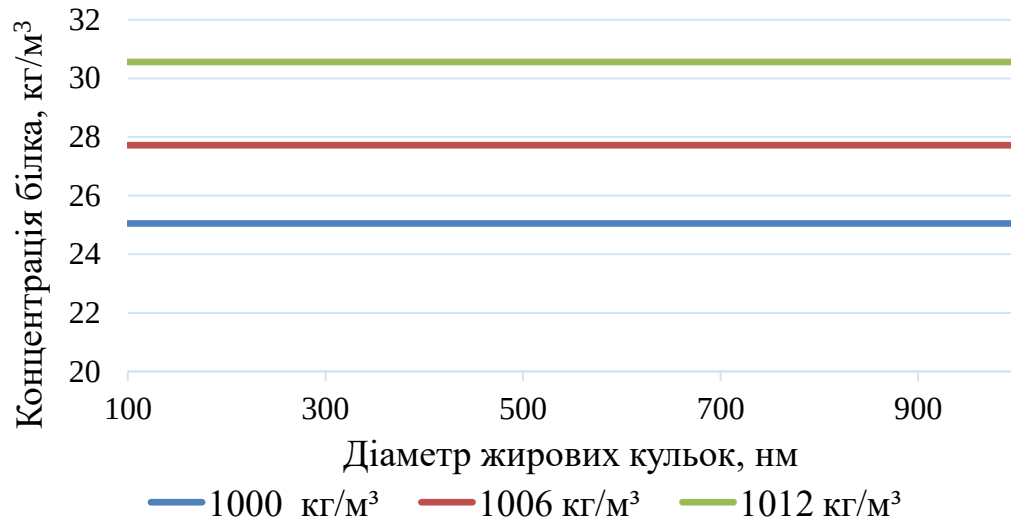


Рисунок 3.6. Залежність необхідної концентрації білка від діаметра жирових часток для забезпечення седиментаційної стійкості

Аналіз результатів дозволив встановити, що необхідна концентрація білка є незалежним параметром відносно ступеня дисперсності жирової фази. Тобто, зміна діаметра часток не потребує корегування кількості едестину, умова нейтральної плавучості визначається виключно співвідношенням густин та об'ємів фаз, що формують систему «ядро-оболонка». Хоча подрібнення жирових кульок під дією ультразвуку призводить до зростання сумарної площі міжфазної поверхні, загальний об'єм білкової оболонки залишається сталим. При цьому, збільшення густини дисперсійного середовища призводить до пропорційного зростання необхідної концентрації білка. Зокрема, для досягнення стабільності в

середовищі з густиною 1012 кг/м^3 необхідно забезпечити концентрацію едестину на рівні близько $30,5 \text{ кг/м}^3$, тоді як для 1000 кг/м^3 лише 25 кг/м^3 .

Для узагальнення результатів дослідження було проведено розрахунок необхідної кількості білка едестину для забезпечення стану нейтральної плавучості від вмісту жирової фази (рис. 3.7).

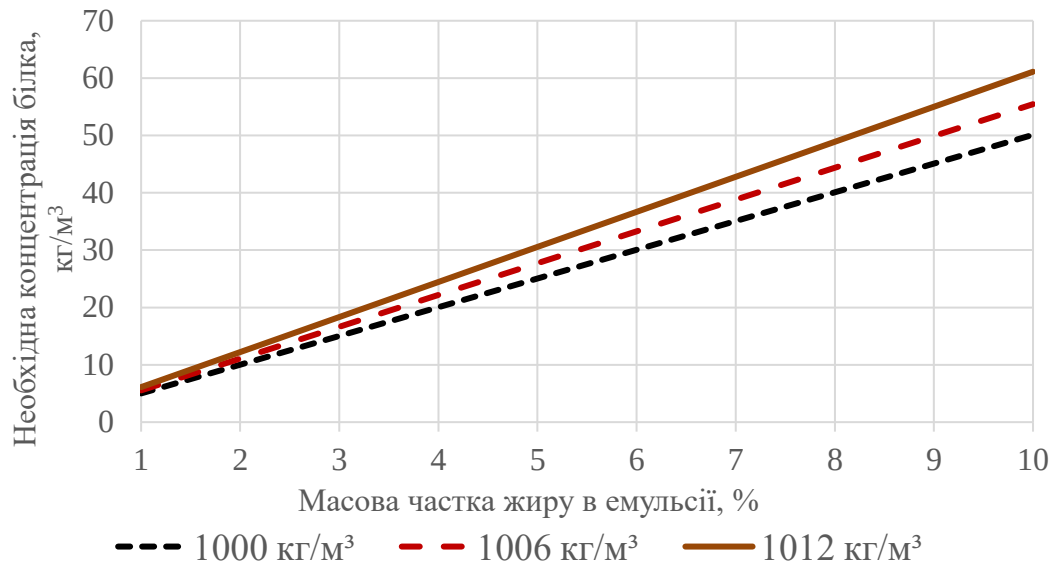


Рисунок 3.7. Залежність необхідної концентрації білка від вмісту жиру для нейтральної плавучості емульсійної конопляної системи з різним вмістом сухих речовин

Аналіз рисунку 3.7 дозволив встановити закономірності формування стабільної системи рослинних напоїв з насіння конопель залежно від вмісту жиру. Встановлено, що для всіх досліджуваних значень густини дисперсійного середовища залежність необхідної концентрації білка від масової частки жиру має лінійний характер. Зі зростанням густини середовища від 1000 до 1012 кг/м^3 спостерігається підвищення потреби у білку. Зокрема, для емульсії густиною 1000 кг/м^3 та 1012 кг/м^3 з масовою часткою жиру 10% різниця у необхідній концентрації білка становить близько 11 кг/м^3 (від 50 до 61 кг/м^3 відповідно).

Таким чином, науково обґрунтовано та запропоновано алгоритм реалізації ізопікнічної рівноваги в конопляних емульсіях, що дозволяє з високою точністю моделювати параметри седиментаційної стійкості системи. Доведено, що ключовим фактором корекції рецептурного складу є густина дисперсійного середовища, зміна якої потребує нелінійного збільшення вмісту білка едестину (до 22%) для збереження стану нейтральної плавучості. На основі встановлених закономірностей отримано розрахункові криві для діапазону жирності 1-10%, яке виступає інструментом точного створення стабільних систем у стані нейтральної плавучості. Такий підхід нівелює потребу в синтетичних добавках і гарантує тривалу агрегативну стійкість напою при одночасному зростанні його нутрієнтного профілю завдяки раціональному використанню білкового потенціалу насіння конопель.

3.4.2. Дослідження впливу розмірів жирових крапель конопляної емульсії на агрегативну стійкість емульсії

Стабільність емульсійної системи залежить не лише від відсутності седиментації, а й від здатності часток зберігати свою дискретність при зіткненнях, зумовлених броунівським рухом. Звідси виникла необхідність переходу від макроскопічного аналізу балансу фаз до теоретичного розгляду агрегативної стійкості на мікро- та нанорівні. За такого підходу адсорбційний шар едестину товщиною δ розглядається не лише як гравітаційний баласт, а як потужний фізико-хімічний бар'єр.

Для сферичних частинок геометричний фактор $f(h, \delta)$ розраховуємо при зближенні жирових кульок на відстань $h < 2\delta$ на основі використання моделі Фішера:

$$f(h, \delta) = \frac{\pi}{3} (2\delta - h)^2 (3R + 2\delta + \frac{h}{2}), \quad (3.42)$$

де R - радіус жирової кульки, а δ - товщина адсорбційного шару білка.

Для знаходження критичних точок енергетичної кривої розроблено алгоритм розрахунку стабільності емульсії (рис. 3.8).

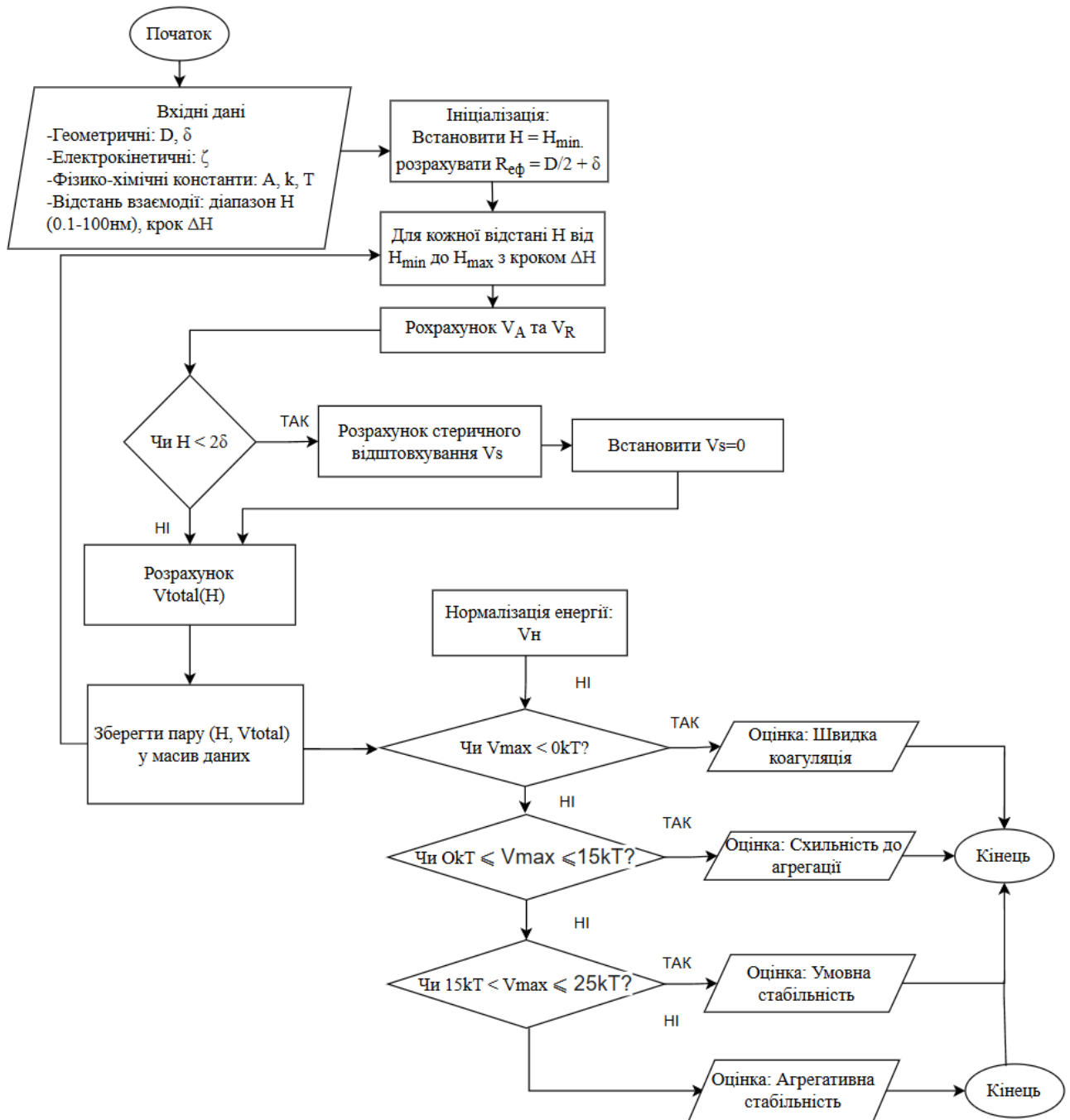


Рисунок 3.8. Блок-схема алгоритму оцінювання агрегативної стійкості емульсійної системи із урахуванням -розмірів жирових крапель

Встановлена послідовність операцій забезпечує перехід від фізико-хімічних характеристик до прогнозування агрегативної стійкості емульсійної системи, що базується на аналізі енергетичного профілю системи.

Початковим етапом реалізації алгоритму є введення вхідних даних, що включають геометричні параметри частинок d , δ , електрокінетичний потенціал ζ та термодинамічні константи системи. Ключовим моментом є встановлення ефективного радіуса глобули $R_{\text{еф}}$, який враховує товщину захисної оболонки. Далі алгоритм передбачає розрахунки енергій притягання Ван-дер-Ваальса V_A та електростатичного відштовхування V_R для визначеного діапазону відстаней між частинками h . Особливістю алгоритму є перевірка умови $h < \delta h$, у разі критичного зближення часток активується блок розрахунку стеричного відштовхування V_S , що базується на моделях осмотичного тиску. Після визначення всіх складових відбувається розрахунок сумарної потенційної енергії взаємодії $V_{\text{заг}}$, як аддитивної суми трьох сил. Отримані пари значень зберігаються у масиві даних для подальшої побудови енергетичної кривої. Важливим кроком є нормування енергії відносно термічного руху $V_{\text{норм}} = V_{\text{заг}}/kT$, що дозволяє оцінити здатність системи протистояти руйнівній дії броунівського руху. Це забезпечує перехід від абстрактних енергетичних одиниць до фізично обґрунтованих критеріїв стабільності.

Заключний блок алгоритму базується на селекції отриманого максимуму енергетичного бар'єра V_{max} . Через систему логічних фільтрів проводиться якісна оцінка стану емульсії. При відсутності або низькому бар'єрі $V_{\text{max}} < 0 \text{ kT}$ прогнозується швидка коагуляція та миттєве розшарування. Діапазон від 0 до 15 kT , свідчить про схильність до агрегації та можливе укрупнення часток під час зберігання. Значення понад 25 kT , розглядається як стан повної агрегативної стабільності. Саме цей результат визначено як цільовий для напою з насіння конопель сорту Глесія, оскільки він забезпечує дискретність жирової фази та тривалий термін зберігання продукту.

Реалізація розробленого алгоритму передбачає перевірку стійкості системи при різних фізико-хімічних параметрах системи, що відповідають технологічним станам у процесі виробництва напою.

Для верифікації розробленої математичної моделі та визначення впливу ступеня дисперсності й інтенсивності електростеричного захисту на дискретність емульсійної системи, було виділено декілька варіантів моделювання.

Кожен варіант відображає конкретний фізичний стан системи - від критичної нестабільності грубої суміші до цільових показників напою з насіння конопель сорту Глесія. Узагальнені параметри розміру часток d , електрокінетичного потенціалу ζ та товщини адсорбційного шару δ , а також відповідні їм очікувані значення сумарної енергії взаємодії $V_{\max}$, представлені у табл. 3.6.

Таблиця 3.6

**Характеристика варіантів моделювання агрегативної стійкості
емульсійної системи**

Варіант	Технологічний стан	Параметри моделювання	Очікуваний $V_{\max}$
1. Критичний	Грубе змішування, відсутність кавітації	$d=1000$ нм, $\zeta = -5$ мВ, $\delta = 1$ нм	$V_{\max} < 0$ кТ
2. Нестабільний	Слабке подрібнення	$d=600$ нм, $\zeta = -15$ мВ, $\delta = 5$ нм	$0 \dots 15$ кТ
3. Перехідний	Середня інтенсивність обробки	$d=450$ нм, $\zeta = -25$ мВ, $\delta = 10$ нм	$15 \dots 25$ кТ
4. Цільовий	Оптимальна обробка	$d=300$ нм, $\zeta = -35$ мВ, $\delta = 15$ нм	$V_{\max} > 25$ кТ

Представлені у табл. 3.6 дані дозволяють простежити динаміку переходу емульсії з метастабільного у термодинамічно стійкий стан. Кожен із варіантів моделювання є логічним кроком у реалізації алгоритму стабілізації. Перші два варіанти ілюструють неминучість коагуляції при недостатній енергії обробки, а четвертий варіант фіксує параметри, за яких сили відштовхування домінують над силами притягання.

Таким чином, представлена закономірність формування енергетичного бар'єра розкриває фізичну сутність механізму стабілізації досліджуваної емульсійної системи. Послідовна трансформація енергетичного профілю демонструє перехід від повного домінування сил молекулярного притягання до розвиненого електростеричного захисту, амплітуда якого суттєво перевищує поріг агрегативної стійкості. Виявлена залежність підтверджує, що лише за умови досягнення розрахункових параметрів четвертого варіанту напій з насіння конопель сорту Глесія набуває стану термодинамічної стійкості. Це слугує математичним обґрунтуванням ефективності запропонованого алгоритму стабілізації, що дозволяє прогнозувати високу агрегативну автономність глобул та гарантувати збереження якісних показників готового продукту протягом усього терміну зберігання.

Верифікація параметрів та порівняння результатів моделювання представлено в табл. 3.7.

Аналіз наведених даних свідчить про наявність прямої кореляційної залежності між ступенем дисперсності фази, рівнем електрокінетичного потенціалу та результуючою стабільністю емульсії.

Для повноти фізико-хімічної моделі стабільності недостатньо знати не лише величину енергетичного бар'єра. Необхідно встановити просторові характеристики дисперсної системи. Середня відстань між глобулами жиру визначає частоту їх зіткнень та ймовірність перебування часток у зоні дії сил притягання чи відштовхування.

**Кількісні показники стабільності системи для різних варіантів
моделювання**

Параметр	Варіант			
	1	2	3	4
d, нм	1000	600	450	300
ζ-потенціал, мВ	-7.5	-17.5	-27.5	-37.5
δ, нм	1.5	6	11	15
V _{max} , кГ	< 0	~14.9	~19.5	~36.4
Фізико-хімічна характеристика стану	Нестабільний стан	Схильність до оборотної флокуляції	Мета-стабільний стан	Термодинамічно стабільний стан

Для розрахунку середньої відстані між поверхнями часток h у монодисперсній системі (де всі частинки мають однаковий діаметр) найчастіше використовується модель, що базується на об'ємній частці жиру φ . Для розрахунку відстані «поверхня-поверхня» h , нм використаємо залежність:

$$h = D \cdot \left[\left(\frac{\varphi_{max}}{\varphi} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right], \quad (3.43)$$

де D - діаметр жирової глобули, нм; φ - об'ємна частка жиру; φ_{max} - максимальна частка упаковки часток (для хаотичної щільної упаковки сфер $\varphi_{max} = 0,64$, для кубічної ґратки $\varphi_{max} = 0,52$).

Для розрахунків використано модель кубічної ґратки, яка є стандартною для оцінки середніх відстаней у харчових емульсіях. Розрахунок цього параметра дозволяє встановити геометричні межі стабільності системи та обґрунтувати необхідність досягнення певного ступеня дисперсності для запобігання процесам коалесценції за різних рівнів вмісту жирової фази (рис. 3.9).

Аналіз наведених даних демонструє виражену нелінійну залежність середньої відстані між частками від їхнього діаметра та об'ємної частки жиру ϕ . Спостерігається закономірне скорочення міжчасткового простору при збільшенні концентрації жирової фази. Для часток діаметром 300 нм відстань зменшується з 822 нм при 1% вмісті жиру до 288 нм при 7%. Це свідчить про те, що у концентрованих системах ризик зіткнення глобул зростає в рази, що висуває жорсткіші вимоги до потужності електростеричного захисту.

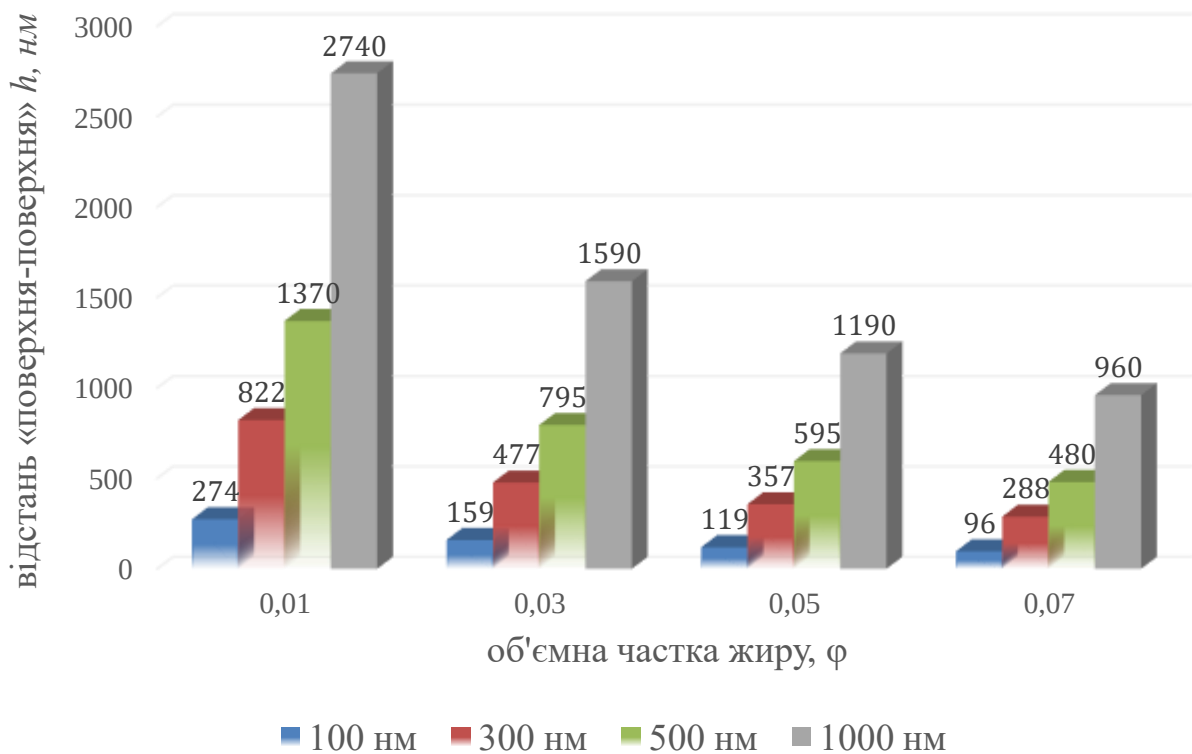


Рисунок 3.9. Відстань між жировими кульками залежно від вмісту жиру

Особливий інтерес становить порівняння часток різного ступеня дисперсності. Для грубодисперсних систем $D=1000$ нм відстані між глобулами є найбільшими від 2740 до 960 нм, проте відсутність енергетичного бар'єра зумовлює незворотну коагуляцію часток під дією броунівського руху. Натомість

для високодисперсних часток $D=100-300$ нм характерним є суттєве скорочення середньої відстані, що зумовлено високою концентрацією глобул у одиниці об'єму. Однак, з фізико-хімічної точки зору, саме такий стан забезпечує максимальну стабільність емульсії. Розрахункові значення h для концентрацій жиру 1-5% на порядок перевищують радіус дії молекулярних сил притягання Ван-дер-Ваальса. У поєднанні з високою амплітудою енергетичного бар'єра 36,4 кТ, це забезпечує стан дискретності дисперсної фази. Отже, попри високу щільність дисперсної фази, сформований стеричний фактор стабільності ефективно мінімізує ймовірність результативних зіткнень, що гарантує термодинамічну стійкість напою з насіння конопель сорту Глесія.

Таким чином, результати розрахунків підтверджують забезпечення оптимального просторового структурування напою насіння конопель сорту Глесія. Навіть при щільному розташуванні часток, їхній малий розмір у поєднанні з розрахованим енергетичним бар'єром створює умови, за яких броунівський рух не здатний подолати сили відштовхування, що забезпечує стабільність напою протягом тривалого часу.

Результати виконаних досліджень є вихідною інформацією для подальшого встановлення раціональних режимів ультразвукової обробки. Встановлені параметри моделювання є контрольними значеннями для верифікації якості готового продукту та підтверджують достовірність запропонованої математичної моделі щодо здатності забезпечення агрегативної стійкості напою із насіння конопель сорту Глесія.

3.5. Математичне моделювання дисперсності жирових кульок на основі багатofакторної оптимізації показників стабільності та якості

Для визначення оптимального розміру часток використаємо узагальнену цільову функцію $F(d)$:

$$F(d) = \sum_{i=1}^n k_i \cdot I_i(d) \rightarrow \max, \quad (3.44)$$

де $I_i(d)$ - нормовані значення показників стабільності та якості (від 0 до 1,0);

Для емульсійної системи цільова функція набуває вигляду:

$$F(d) = k_A \cdot A(d) + k_K \cdot K(d) + k_B \cdot B(d), \quad (3.45)$$

де $A(d)$ - індекс агрегативної стабільності, який враховує енергію взаємодії часток з урахуванням стеричного бар'єра активованого едестину; $K(d)$ - індекс кінетичної стабільності, що характеризує стійкість системи до седиментаційного розшарування за законом Стокса; $B(d)$ - індекс білизни, визначений за інтенсивністю світлорозсіювання часток жиру.

Розподіл вагових коефіцієнтів для моделі проводили за врахування особливостей технології виробництва рослинного молока:

- агрегативна стабільність $k_A = 0,40$, надано найвищий пріоритет, що пов'язано з тим, що незворотна коагуляція жирових кульок призводить до повної втрати технологічних властивостей системи;

- кінетична стабільність $k_K = 0,3$, величину вагомості пов'язано з тим, що ризики кінетичного розшарування мінімізуються за рахунок вирівнювання густини фаз шляхом формування адсорбційного шару едестину;

- індекс білизни $k_B = 0,3$ – величина значення пов'язано зі споживчою привабливістю рослинного напою та обумовлена необхідністю забезпечити візуальну ідентичність з коров'ячим молоком.

Для пошуку екстремуму функції $F(d)$ враховуємо систему нерівностей, що обмежують допустиму область розв'язків для знаходження значень дисперсності жирових глобул за сукупним ефектом стабілізації та якості:

$$\begin{cases} A(d) \geq A_{min} \approx 0,40 \\ K(d) \geq K_{min} \approx 0,30, \\ 250 \leq d \leq 350 \text{ нм} \end{cases} \quad (3.46)$$

Створення стабільної дисперсної системи рослинного напою з насіння

конопель потребує комплексного підходу спрямованого на забезпечення міжфазової взаємодії на межі поділу фаз «жирова кулька - вода».

При цьому параметри конопляної емульсії повинні задовольняти умови системи нерівностей, які визначають область існування стійкого стану системи:

$$\begin{cases} V_{max}(d) \geq 25 kT - \text{умова агрегативної стійкості,} \\ \vartheta_{сед}(d) \leq \vartheta_6(d) - \text{умова кінетичної стійкості,} \\ d \approx \lambda/2n - \text{умова оптичної ефективності,} \\ d \leq d_{пор} - \text{обмеження за органолептичним критерієм,} \end{cases} \quad (3.47)$$

де V_{max} - сумарний потенціал взаємодії часток, Дж; $\vartheta_{сед}$ - лінійна швидкість седиментації часток за законом Стокса, м/с; ϑ_6 - середньоквадратична швидкість броунівського руху часток, м/с; λ - довжина хвилі видимого світла (380 - 780 нм); $d_{пор}$ - порогове значення розміру часток для гладкої текстури (10 мкм); n - показник заломлення середовища.

Сукупність цих фізико-хімічних умов є основою для визначення стабільності рослинного напою з насіння конопель. Оскільки забезпечення енергетичного бар'єра взаємодії часток на рівні вищому за поріг теплового руху гарантує запобігання незворотній коагуляції глобул за рахунок стеричного відштовхування активованого едестину. Переважання інтенсивності броунівської дифузії над швидкістю гравітаційного спливання часток забезпечує рівномірний розподіл дисперсної фази в об'ємі. Наближення середнього діаметра часток до половини довжини хвилі видимого світла забезпечує максимальну інтенсивність розсіювання, як наслідок, напій має насичений білий колір та високу оптичну густину. Обмеження максимального розміру часток чутливістю рецепторів ротової порожнини необхідний для відчуття гомогенності та без піщанистості.

Інтегруємо фізико-хімічні закони у єдину прогностичну модель. Застосування інтегрального методу «Відносна стабільність/індекс» обумовлено

необхідністю уніфікації різнорідних за своєю природою фізичних параметрів - енергетичного бар'єра (Дж), швидкості седиментації (м/с) та інтенсивності розсіювання світла (відн. од.) - до єдиної безрозмірної шкали від 0 до 1,0. За такого підходу стало можливим визначити технологічне вікно стабільності конопляної емульсії. Значення 1,0 відповідає теоретично максимальному рівню збереження якості системи.

Багатофакторну залежність показників якості та стабільності конопляної емульсії від середнього діаметра жирових глобул представлено на рис. 3.10.

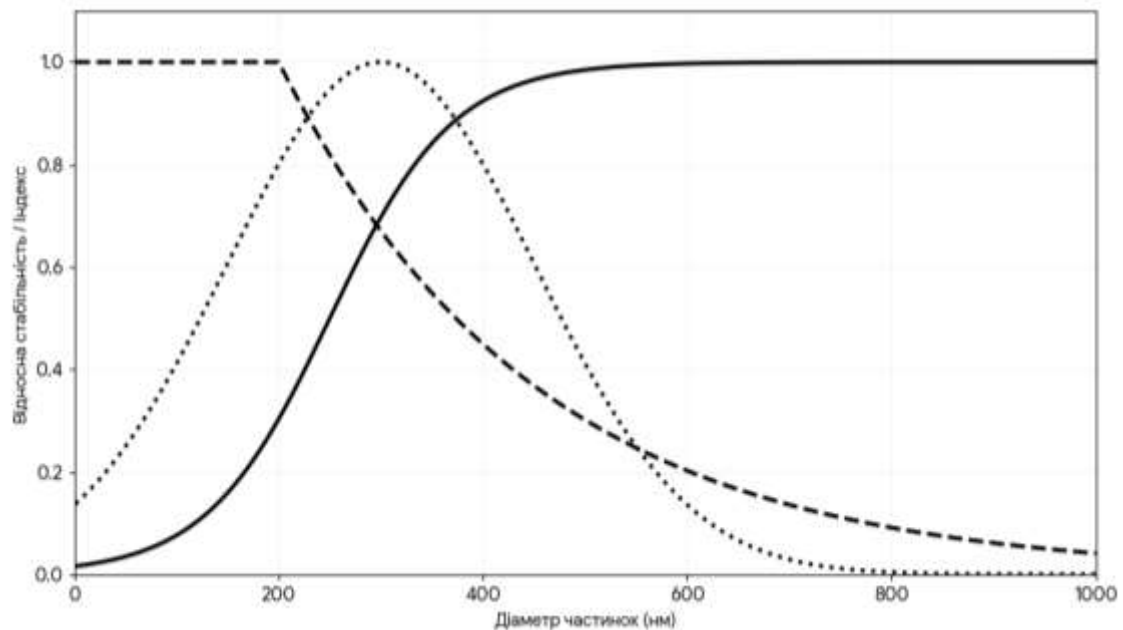


Рисунок 3.10. Обґрунтування оптимального діапазону дисперсності жирових кульок конопляної емульсії: ——— - агрегативна стабільність; — — — - кінетична стабільність; ······ - індекс білизни

Для встановлення значень розроблено алгоритм багатофакторної оцінки стану емульсійної системи (рис. 3.11).

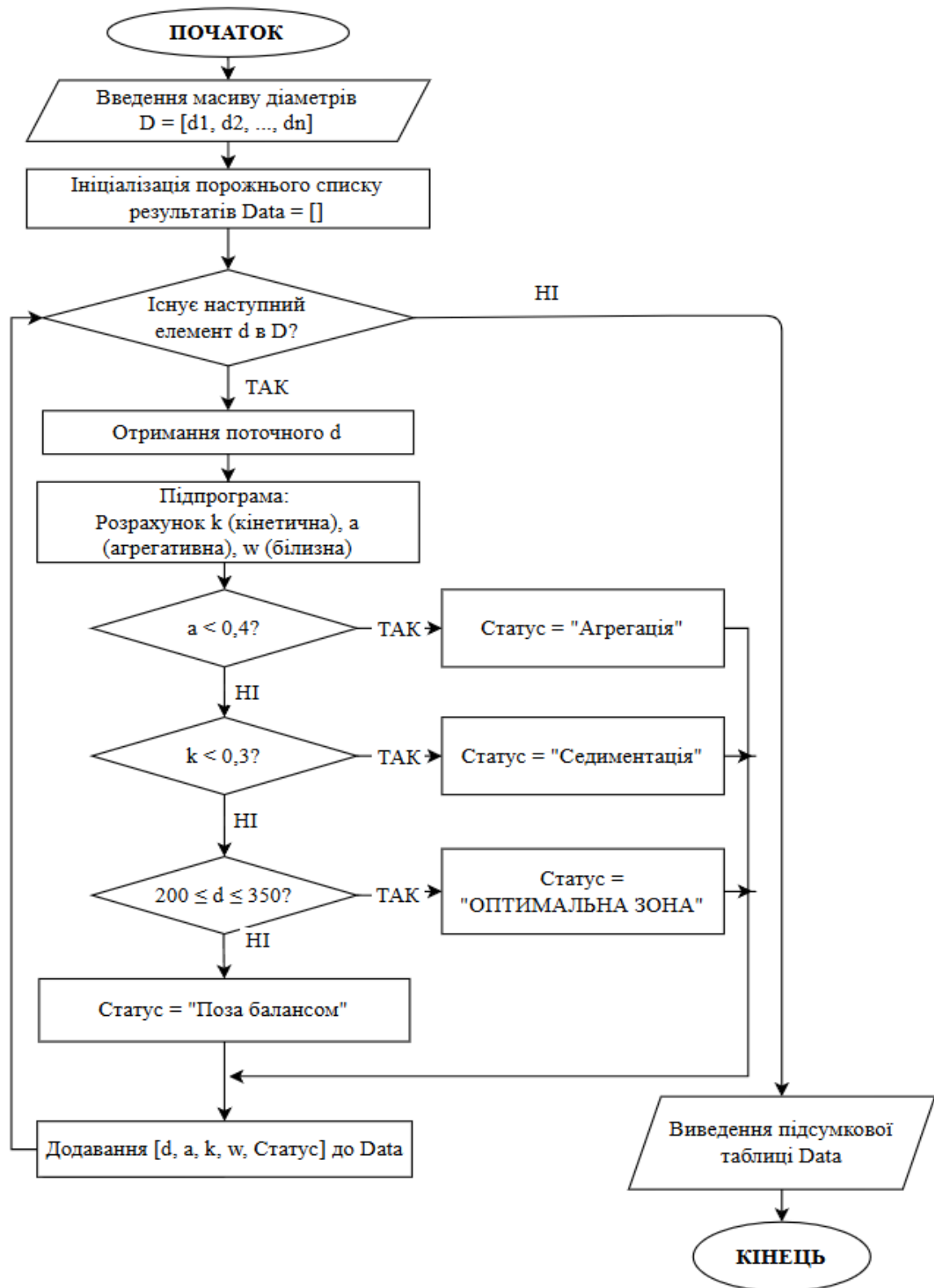


Рисунок 3.11. Блок-схема алгоритму оцінки стабільності та якості емульсії

Основою алгоритму прийнято принцип ітераційного аналізу масиву діаметрів жирових глобул із послідовною перевіркою відповідності системи встановленим критичним порогам: агрегативної та кінетичної стійкості.

За результатами розрахунків за розробленим алгоритмом отримано чисельні значення параметрів стану системи залежно від діаметра жирових глобул. Одержані дані дозволили визначити зміни в технологічному середовищі та встановити цільовий діапазон розмірів глобул у межах 250–350 нм (табл. 3.8).

Таблиця 3.8

**Параметри стану технологічного середовища залежно від
дисперсності жирової фази**

Діаметр часток d , нм	Агрегативна стабільність	Кінетична стабільність	Індекс білизни
50	0,03	1,00	0,25
100	0,08	1,00	0,41
200	0,30	1,00	0,80
250	0,50	0,82	0,95
300	0,70	0,67	1,00
350	0,84	0,55	0,95
400	0,92	0,45	0,80
500	0,98	0,30	0,41
800	1,00	0,09	0,00

Обґрунтування нижньої межі цільового діапазону на рівні 250 нм базується на досягненні максимальної кінетичної стійкості. Тобто, відсутність седиментаційного розшарування протягом періоду зберігання у зв'язку з переважанням броунівської дифузії над гравітаційними силами. Показник агрегативної стабільності за діаметру жирової глобули 250 нм є відносно низьким, що пов'язано з малим радіусом кривини часток. Однак, в цілому

стабільність системи підтримується тепловим рухом, який перешкоджає з'єднанню глобул. Індекс білизни на рівні 0,80 забезпечує візуальне сприйняття емульсійної системи, як молочної емульсії.

Верхня межа діапазону на рівні 350 нм відповідає компромісу між фізичною стійкістю та енергоефективністю процесу ультразвукової кавітації. За такого значення спостерігається найвища агрегативна стійкість, що обумовлено формуванням структурно-механічного бар'єру у вигляді щільної оболонки едестину. Спостерігається зниження кінетичної стійкості до рівня 0,55 у зв'язку зі зростанням маси жирових глобул, але система все таки зберігає здатність до агрегативної стійкості. Індекс білизни 0,95-1,0.

Таким чином, діапазон дисперсності 250 - 350 нм є областю синергії. За таких значень дисперсності жирових глобул емульсійна система відповідає вимогам фізико-хімічної стабільності та органолептичної відповідності коров'ячого молока. Вихід за межі 350 нм призводить до втрати кінетичної стійкості та погіршення показника білизни, тоді як подрібнення нижче 250 нм потребує надлишкових витрат енергії кавітації та зниження агрегативної стійкості.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено узагальнену фізичну модель морфологічної трансформації конопляної емульсії під дією ультразвуку, яка пояснює механізм формування стійкої системи без використання сторонніх добавок. Це дозволяє забезпечити кінетичну стабільність напою, використовуючи лише внутрішній ресурсний потенціал насіння конопель.

2. Виконане математичне моделювання та здійснені дослідження процесів взаємодії кавітаційної бульбашки із жировою кулькою. Отримані аналітичні залежності були використані для визначення раціональних режимів та параметрів ультразвукової дезінтеграції жирових кульок. Визначені числові

значення оптимальних параметрів є базовими для розробки вдосконаленої технології процесу ультразвукової кавітаційної обробки емульсії із насіння конопель.

3. Встановлено, що стабільність конопляної емульсії досягається завдяки інтенсивному диспергуванню жирової фази та модифікації білка едестину під дією ультразвукової кавітації. Доведено, що денатураційна активація едестину сприяє вивільненню сульфгідрильних груп та утворенню міжмолекулярних дисульфідних містків, що призводить до формування навколо жирових крапель суцільної в'язко-пружної оболонки.

4. Встановлено залежність для визначення агрегативної стабільності напою $V_{\max} \geq 20k_B T$ на основі використання умови розширеної теорії ДЛФО. Підтверджено седиментаційну стійкість зумовленої домінуванням енергії теплового броунівського руху над гравітаційними силами згідно із законом Стокса.

5. Теоретично досліджено та експериментально підтверджено, що оптимальний діапазон дисперсності жирової фази емульсійної системи, знаходиться в межах 250 - 350 нм. Саме в цьому інтервалі досягається раціональний баланс між фізико-хімічною стійкістю та органолептичними показниками.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЦЕПТУРНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЯКІСТЬ ТА СТАБІЛЬНІСТЬ НАПОЮ З НАСІННЯ КОНОПЕЛЬ

4.1. Обґрунтування вибору та технологічна оцінка сировини для виробництва рослинного напою

Виробництво рослинного напою значною мірою визначається якістю сировини. Для досліджень використано ядро насіння технічних конопель сорту Глесія, оскільки видалення оболонки дозволяє покращити органолептичні показники сировини. З метою обґрунтування технологічної придатності сировини обраного сорту було проведено органолептичну оцінку її якості (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Органолептична оцінка лущеного насіння конопель сорту Глесія

Назва показника	Характеристика
Зовнішній вигляд	Очищені від плодової оболонки ядра округло-видовженої форми, однорідні за розміром. Поверхня матова
Колір	Кремово-білий з незначною наявністю світло-зелених краплень
Смак	Приємний, солодкувато-горіховий, характерний для свіжого ядра конопель, гіркота відсутня, ледь помітна в'язкість
Запах	Дуже тонкий, ненав'язливий, горіховий, сторонні запахи відсутні
Консистенція	На дотик ядра м'які, маслянисті, легко розтираються між пальцями. При розжовуванні відчувається ніжна текстура, яка швидко перетворюється на кашку, хрускіт відсутній

Аналіз наведеної оцінки засвідчив наступне. Однорідність ядер за розміром та формою, а також характерний кремово-білий колір із незначними вкрапленнями свідчать про ефективність видалення плодової оболонки та збереження цілісності ендосперму. Смако-ароматичний профіль характеризується чистотою та відсутністю сторонніх присмаків чи запахів, зокрема гіркоти, що вказує на стабільність ліпідного комплексу та відсутність процесів окиснення жирів. Маслянистість та здатність до легкого розтирання сировини свідчать про високий вміст жирової фракції. Відсутність хрускоту при розжовуванні є важливим індикатором повного очищення насіння від залишків лушпини. Отриманий аналіз дозволяє характеризувати сорт Глесія як перспективну основу для виробництва рослинних напоїв, паст та інших функціональних продуктів з високими сенсорними характеристиками.

Надалі проведено дослідження фізико-хімічних властивостей ядра насіння конопель, результати яких приведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Фізико-хімічні показники ядра насіння конопель сорту Глесія

Показник	Одиниці вимірювання	Значення
Вологість	%	6,50±0,32
Білок	г	31,37±0,58
в т.ч. едестин		25,41±0,41
Жир	г	48,91±0,77
Вуглеводи	г	5,51±0,41
Клітковина	г	3,23±0,20
Калорійність	ккал	589,69±7,34
Зольність	%	5,93±0,15
Кислотне число	мг КОН/г	1,93±0,12
Смітна домішка	%	відсутня

При цьому визначені ті властивості, які безпосередньо впливають на терміни зберігання та біологічну цінність рослинного напою.

Аналіз фізико-хімічних показників лущеного насіння конопель сорту Глесія підтверджує його високу біологічну цінність як сировини для виробництва рослинного напою. Так із таблиці слідує, що високий вміст білкових речовин 31,37 % свідчить про значний потенціал використання ядер для виробництва рослинного напою. Масова частка жиру близько 49 % свідчить про високу енергетичну цінність продукту, а низьке значення кислотного числа до 2,0 мг КОН/г підтверджує якість ліпідної фракції та відсутність гідролітичного псування під час підготовки сировини. Рівень вологості складає 6,5%, що свідчить про забезпечення стабільності продукту при зберіганні та запобігає розвитку мікробіологічних процесів.

Показник масової частки золи має 5,93% і відображає високий ступінь мінералізації ядер, що характерно для селекційних сортів технічних конопель із низьким вмістом каннабіноїдів. В цілому отримані дані аналізу дозволяють розглядати сорт Глесія як основу для створення продуктів із функціональними властивостями.

4.2. Дослідження впливу гідромодуля на нутрієнтний склад та кваліметричну оцінку сенсорних властивостей конопляного екстракту

Важливою складовою розробки технології рослинного напою є обґрунтування відношення основної сировини та екстрагенту - гідромодуля. Даний показник має суттєвий вплив, як на біологічну цінність готового продукту, так і на економічну ефективність його виробництва. Також, при розробці рослинних напоїв важливим заданням є отримання продукту з характеристиками наближеними до традиційного коров'ячого молока.

Для визначення раціонального гідромодуля методикою досліджень передбачено видалення залишків оболонки та пошкоджених ядер лущеного насіння сорту Глесія та здійснення процесів подрібнювання до однорідного стану. Екстрагування проводили шляхом змішування подрібненої сировини з

підготовленою водою температурою 35-40°C за визначених рівнів гідромодуля. Дотримання температурного режиму необхідне для забезпечення розчинності білку едестину та переходу ліпідної фракції в емульгований стан. Для видалення нерозчинного залишку екстракт фільтрували, після чого його використовували для визначення показників хімічного складу та сенсорної оцінки.

Величина гідромодуля має безпосередній вплив на хімічний склад готового продукту. За результатами експериментальних досліджень було проведено порівняльний аналіз отриманих зразків за вмістом білків, жирів та сухих речовин (табл. 4.3) [185].

Таблиця 4.3

Хімічний склад екстракту з ядра насіння конопель сорту

Глесія, n=3

Показник	Одиниці вимірювання	Гідромодуль		
		1:4	1:8	1:12
Вміст ядра	%	20,0	11,11	7,69
Сухі речовини	%	14,79±0,17	8,22±0,09	5,69±0,07
Жир	%	8,10±0,13	4,50±0,07	3,12±0,05
Білок	%	4,86±0,09	2,70±0,05	1,87±0,03
в т.ч. едестин	%	3,79±0,05	2,31±0,03	1,49±0,04
Вуглеводи	%	0,88±0,07	0,49±0,04	0,34±0,03
Зола	%	0,95±0,02	0,53±0,01	0,37±0,01
Енергетична цінність	ккал/100г	94,51±1,18	52,50±0,65	36,35±0,45

Аналіз даних таблиці 4.3 засвідчує обернену залежність між величиною гідромодуля та концентрацією поживних речовин у екстрактах. Це підтверджує те, що величина гідромодуля є ефективним інструментом для регулювання нутрієнтного складу та енергетичної цінності конопляного напою. Порівняльний аналіз отриманих екстрактів із коров'ячим молоком

дозволив оцінити їх, як рослину альтернативу. За показниками харчової цінності зразок із гідромодулем 1:8 є найбільш наближеним до класичного коров'ячого молока із жирністю 3,2%. При цьому, необхідно зазначити, що на відміну від коров'ячого молока, багатого на лактозу, конопляні екстракти характеризуються низьким вмістом вуглеводів.

Таким чином, регулювання гідромодуля дозволяє отримувати напої, які за енергетичним та ліпідним профілем імітують коров'яче молоко та мають специфічні функціональні переваги, які характерні для рослинної сировини.

Під час розробки технології рослинних напоїв дуже важливим питанням є забезпечення їх споживчої привабливості, яка фактично визначає успіх продукту на ринку. Оскільки варіювання гідромодуля має безпосередній вплив на формування органолептичного профілю готового продукту, це потребує визначення балансу між концентрацією сухих речовин та прийнятними сенсорними характеристиками.

Для об'єктивного обґрунтування гідромодуля було застосовано методи кваліметричної оцінки, зокрема профільний метод сенсорного аналізу та функцію бажаності Харрінгтона. Такий підхід дозволяє перевести якісні характеристики смаку, запаху, кольору, консистенції у кількісний узагальнений показник бажаності D, що мінімізує суб'єктивізм дегустаційної оцінки.

Для об'єктивного проведення дегустаційної оцінки та подальшого розрахунку узагальненого показника бажаності D, встановлено характеристики для кожного рівня оцінювання (табл. 4.4). Розроблені дескриптори стали основою для проведення дегустаційної оцінки дослідних зразків напою, отриманих із ядра конопель сорту Глесія за різних значень гідромодуля.

Характеристика бальних оцінок показників якості конопляного екстракту

Бали	Зовнішній вигляд та колір	Запах	Смак	Консистенція
5	Однорідна рідина без осаду. Колір молочно-білий або світло-кремовий	Чистий, приємний горіховий аромат, характерний для ядра сорту Глесія	Гармонійний, з вираженим горіховим присмаком, злегка солодкуватий, без сторонніх присмаків	Однорідна, в міру в'язка, створює відчуття повноти смаку та вершковості
4	Однорідна рідина, допускається ледь помітний сіруватий відтінок	Горіховий аромат слабо виражений. Присутні легкі трав'яні нотки	Смак приємний, але недостатньо насичений (водянистий) або з ледь відчутним трав'яним відтінком	Рідина однорідна, проте недостатньо в'язка
3	Помітний сірий або зеленуватий відтінок. Допускається незначний осад на дні	Виражений трав'янистий запах сирого насіння. Слабкі ознаки сторонніх ароматичних сполук	Смак занадто інтенсивний або водянистий з відчутною гіркотою післясмаку	Відчуття легкої шорсткості на язиці
2	Неоднорідна рідина з ознаками розшарування. Колір темно-сірий, брудний	Запах сирості, затхлості або ознаки початкового окиснення ліпідів ядра	Негармонійний, виражена гіркота, сторонній хімічний чи мильний присмак	Рідина дуже в'язка слизоподібна або повністю розшарована на фракції
1	Наявність сторонніх домішок, ознак псування або плісняви на поверхні	Різкий, неприємний запах псування або сильного згіркнення жирів	Смак неприємний, різкий, викликає відчуття подразнення слизової оболонки	Повна втрата агрегативної стійкості; утворення щільного нерозчинного осаду

Оцінювання проводилося групою експертів у складі 7 осіб, які аналізували кожен показник за 5-бальною шкалою.

Далі проведено дегустаційну оцінку дослідних зразків екстракту з ядра насіння конопель сорту Глесія (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

**Дегустаційна оцінка показників якості екстракту з ядра насіння
конопель сорту Глесія за різних гідромодулів $n=7$, балів**

Показник якості	Гідромодуль		
	1:4	1:8	1:12
Зовнішній вигляд та колір	4,2±0,2	4,8±0,1	3,2±0,2
Запах	3,4 ±0,2	4,6±0,1	3,1±0,2
Смак	3,7±0,3	4,7±0,2	2,5±0,2
Консистенція	4,1±0,1	4,9±0,1	2,7±0,3
Середній бал	3,85	4,75	2,88

Аналіз результатів дегустаційної оцінки демонструє залежність між значеннями гідромодуля та якісними характеристиками отриманого екстракту. Найвищі бали за всіма дескрипторами мав зразок з гідромодулем 1:8. Тобто саме за такого гідромодуля отримано вміст розчинних речовин ядра насіння конопель сорту Глесія, який забезпечує гармонійне поєднання смакових та ароматичних властивостей без ознак надмірної насиченості чи, навпаки, дефіциту органолептичної вираженості.

Застосування математичної обробки результатів органолептичного аналізу за методом узагальненої функції бажаності Харрінгтона дало можливість здійснити вибір раціонального гідромодуля. Використання такого підходу дозволив трансформувати суб'єктивні бальні оцінки у безрозмірні часткові відгуки. Отримані профілі бажаності органолептичних показників екстракту з ядра насіння конопель сорту Глесія за різних гідромодулів

дозволили оцінити ступінь збалансованості основних показників якості та визначити межі їх відповідності вимогам (рис. 4.1).

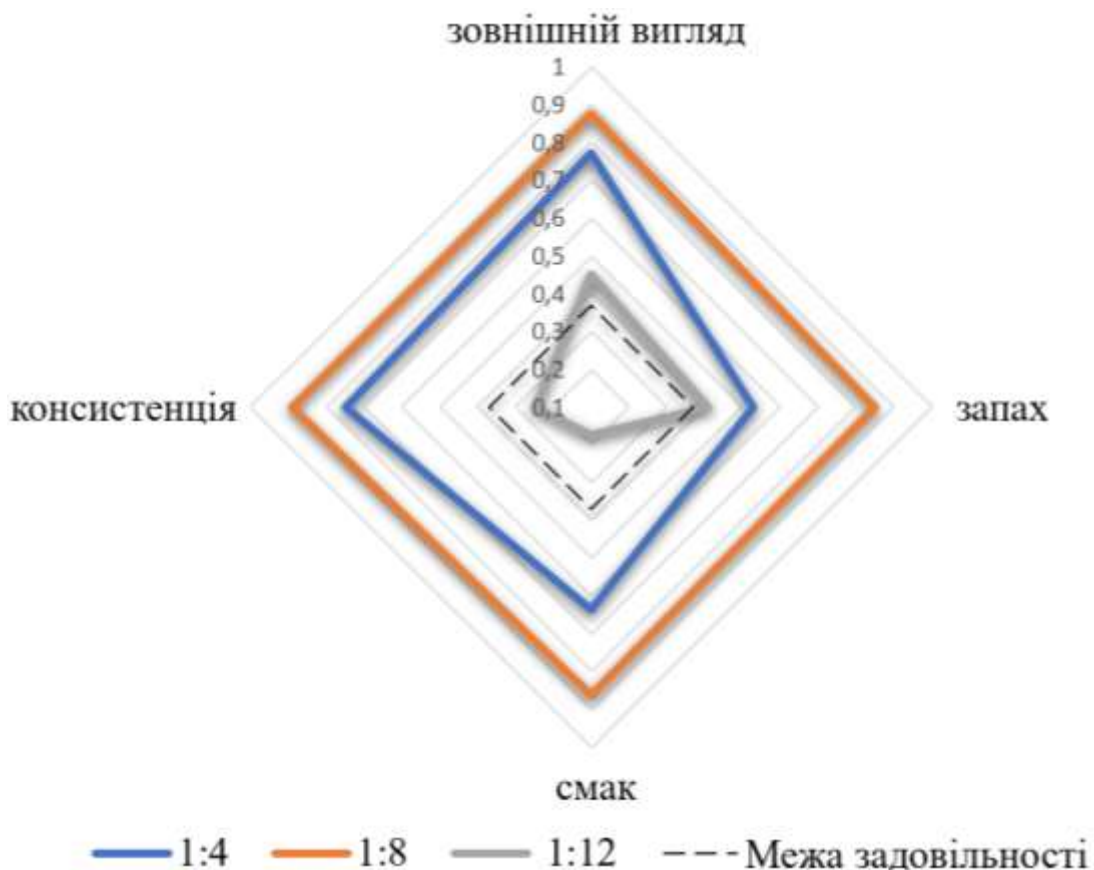


Рисунок. 4.1. Профілі бажаності органолептичних показників екстракту з ядра насіння конопель сорту Глесія за різних гідромодулів

Геометрія та площа пелюсткової діаграми демонструє зв'язок між гідромодулем та якістю отриманих екстрактів. Зокрема, найбільшу площу та найбільш рівномірний розподіл значень часткових відгуків бажаності d_i ілюструє профіль зразка з гідромодулем 1:8. При цьому профілі зразків із гідромодулями 1:4 та 1:12 характеризуються вираженою асиметрією. Для гідромодуля 1:4 характерна деформація профілю в бік зниження бажаності смако-ароматичних характеристик, що пов'язано з надмірним вмістом сухих речовин, як наслідок, надмірна інтенсивність ознак у екстракті. При цьому, для зразка з гідромодулем 1:12 характерне загальне зменшення площі та критичне

наближення до межі задовільності, що математично підтверджує органолептичну неадекватність значного розведення.

Для прийняття остаточного обґрунтованого рішення щодо вибору оптимального гідромодуля необхідно врахувати кумулятивний ефект усіх досліджуваних чинників. З цією метою розраховували середнє геометричне значення одиничних індексів бажаності та визначили узагальнений показник бажаності D (рис. 4.2).

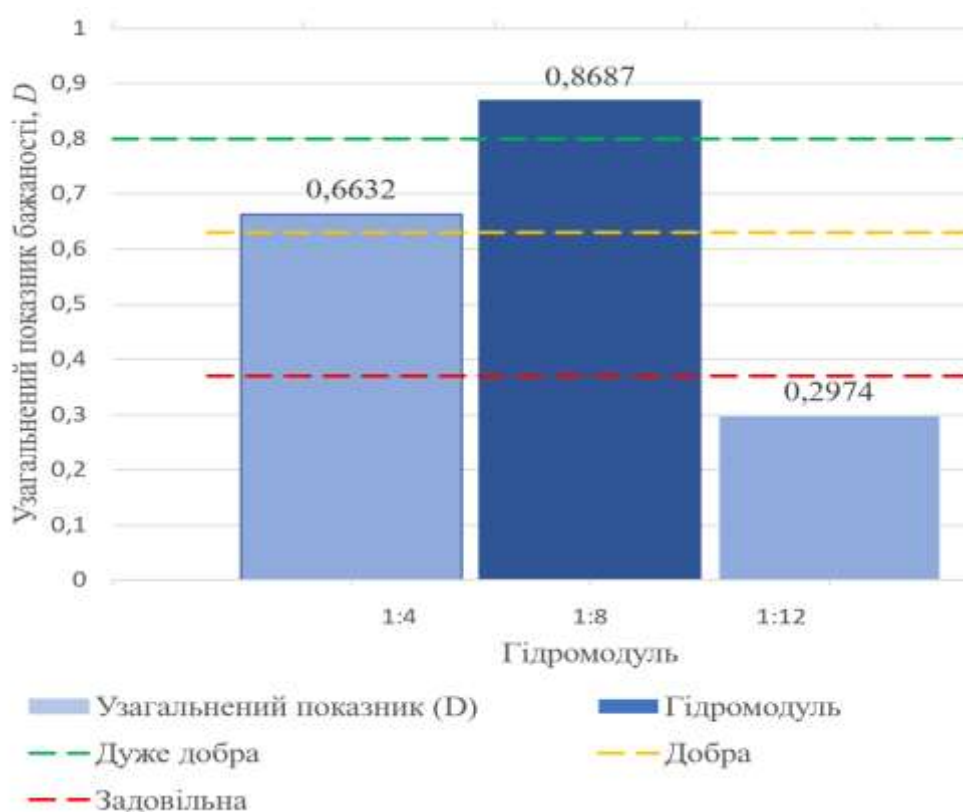


Рисунок 4.2. Вплив гідромодуля на узагальнений показник бажаності D екстрактів із ядра насіння конопель сорту Глесія

Аналіз приведених результатів (рис. 4.2), демонструє екстремум для зразка з гідромодулем 1:8 за значення узагальненого показника бажаності на рівні $D=0,8687$, що відповідно до шкали Харрінгтона відповідає оцінці «дуже добра». Такий результат свідчить про те, що за гідромодуля 1:8 отримано синергетичний ефект між вмістом екстрагованих поживних речовин ядра та формуванням еталонних органолептичних характеристик напою. Для зразка з

гідромодулем 1:4 бажаність на рівні $D=0,6632$ та оцінка «добра». Незважаючи на високу густину та насиченість екстракту нижчий рівень бажаності пов'язано з менш збалансованими показниками смаку та аромату. Це підтверджує доцільність використання помірних ступенів розведення для збереження гармонійного смаку продукту. Критично низький результат зафіксовано для зразка з максимальним розведенням 1:12 для якого $D=0,2974$, що є нижче межі задовільності.

Аналіз отриманих експериментальних даних свідчить, що зміна гідромодуля суттєво та нелінійно впливає на інтегральну якість екстрактів.

Така залежність обумовлює необхідність переходу до наступного етапу дослідження - математичного моделювання та оптимізації якісних характеристик конопляних напоїв. Використання рівнянь квадратичної регресії у поєднанні з аналізом функцій бажаності дозволить встановити точні математичні залежності та визначити оптимальні параметри технологічного процесу, що забезпечать стабільно високу якість готового продукту

На основі експериментальних даних отримано рівняння квадратичної регресії, що описує залежність узагальненого показника бажаності D від величини гідромодуля (x):

$$D = -0,024275x^2 + 0,342675x - 0,3191, \quad (4.1)$$

де x – гідромодуль.

Для наочного представлення встановленої аналітичної залежності у всьому діапазоні варіювання фактору побудовано графічну інтерпретацію отриманого рівняння регресії (рис. 4.3). Графічна модель у формі параболи демонструє зону технологічного оптимуму та дозволяє візуалізувати динаміку зниження якості продукту при відхиленні від раціонального значення гідромодуля.

Геометричне відображення функції підтверджує, що найвища концентрація значень узагальненого показника бажаності D зосереджена в межах співвідношення сировини до екстрагенту від 1:6,5 до 1:8,0, де крива досягає свого піку. Це дозволяє не лише ідентифікувати точку максимуму, а й

визначити межі стійкості технологічного процесу, в яких якість готового конопляного напою залишатиметься стабільно високою.

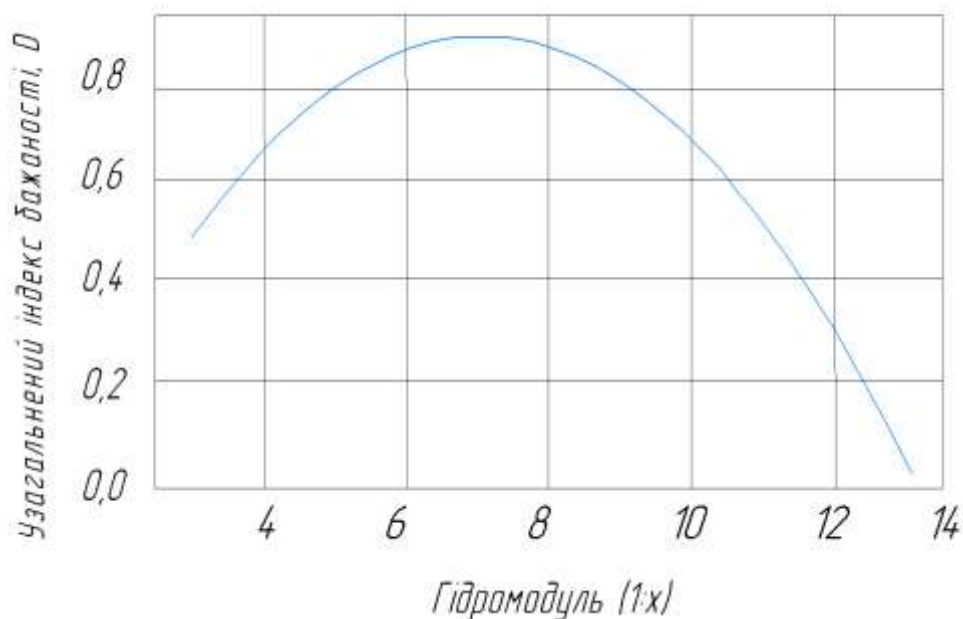


Рисунок 4.3. Залежність узагальненого показника бажаності D від величини гідромодуля екстракції ядра насіння конопель

Процес екстракції цільових компонентів із ядра насіння конопель сорту Глесія має чітко обмежений діапазон раціонального розведення сировини водою. При низьких значеннях гідромодуля 1:4 інтегральний показник D лімітується недостатнім виходом сухих речовин, тоді як при надмірному розведенні 1:12 відбувається критичне зниження органолептичної інтенсивності та енергетичної цінності продукту.

Таким чином, результати комплексної оцінки за використання функції Харрінгтона свідчать, що гідромодуль 1:8 є оптимальним для отримання рослинної основи з високими якісними показниками. Дане співвідношення компонентів прийнято як базове для подальших досліджень процесу стабілізації напою із застосуванням ультразвукової кавітаційної технології.

4.3. Дослідження впливу параметрів ультразвукового оброблення на стабільність та показники якості конопляного напою

Дослідження впливу параметрів ультразвукової дії на процес стабілізації у рослинного напою з насіння конопель сорту Глесія здійснено на основі планування багатофакторного експерименту. Для побудови математичної моделі процесу було обрано три ключові фактори впливу: потужність ультразвукового випромінювання (W , Вт), температура системи ($T_{ст}$, °C) та питома енергія оброблення ($E_{пит}$, кДж/кг). Вибір цих параметрів обумовлений їх роллю у формуванні дисперсного складу системи.

Визначені рівні факторів та інтервали їх варіювання (табл. 2.2) складають основу для побудови матриці планування багатофакторного експерименту за схемою центрального композиційного ротабельного планування. Обраний діапазон значень для кожного параметра охоплює область технологічно доцільних режимів, встановлених під час попередніх досліджень, що дозволяє забезпечити високу інформативність моделі.

4.3.1. Вплив параметрів процесу на середній діаметр жирових кульок

Визначення закономірностей зміни середнього діаметра жирових кульок d_{32} є важливим етапом дослідження, оскільки ступінь дисперсності ліпідної фази безпосередньо зумовлює седиментаційну стійкість та органолептичні характеристики конопляного напою.

Математичне моделювання проводили з метою встановлення функціональних залежностей:

$$d_{32} = f(W, E_{пит}, T_{ст}) \quad (4.2)$$

де d_{32} – середній діаметр жирових кульок, нм; W – потужність, %; $E_{пит}$ – питома енергія, кДж/кг; $T_{ст}$ – температура, °C.

У табл. 4.6 представлено матрицю планування багатофакторного експерименту для дослідження впливу параметрів ультразвукового

Матриця планування експерименту середній діаметр жирових кульок

[illegible]

Для функції відгуку – середній діаметр жирових кульок рівняння регресії згідно проведеного багатофакторного експерименту для кодованих значень має вигляд:

$$y_1 = 247,9 - 15,9x_1 - 58,27x_2 - 17,66x_3 + 3,5x_1x_2 + 1,75x_1x_3 + 2,75x_2x_3 + 0,5605x_1^2 + 11,51x_2^2 + 2,327x_3^2. \quad (4.3)$$

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

Для дійсних значень факторів рівняння регресії для функції відгуку – середній діаметр жирових кульок має вигляд:

$$d_{32} = 754,9 - 2,608W - 0,9454E_{\text{пит}} - 5,803T_{\text{ст}} + 0,00157WE_{\text{пит}} + 0,01271WT_{\text{ст}} + 0,001938E_{\text{пит}}T_{\text{ст}} + 0,00367W^2 + 0,000528E_{\text{пит}}^2 + 0,03137T_{\text{ст}}^2 \quad (4.4)$$

При цьому $S_{\text{відм}}^2 = 0,4$; $S_{\text{ад}}^2 = 1,411$; $F = 3,528 < [F] = 4,784$, отже за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність регресійної моделі (4.4) можна вважати правильною з 95%-ю достовірністю. Коефіцієнт кореляції склав $R=0,9986$, що свідчить про високу точність одержаних результатів.

Встановлено, що за критерієм Стюдента серед досліджуваних факторів впливу найбільше на середній діаметр жирових кульок впливає питома енергія.

Аналіз отриманої математичної залежності дозволяє стверджувати, що процес гомогенізації та стабілізації конопляного напою має складний нелінійний характер. Від'ємні значення лінійних коефіцієнтів при факторах W , $E_{\text{пит}}$ та $T_{\text{ст}}$ свідчать про те, що первинне зростання енергетичних та температурних параметрів сприяє інтенсифікації кавітаційного подрібнення жирової фази та зменшенню розміру жирових кульок. Водночас позитивні значення квадратичних коефіцієнтів вказують на наявність локальних екстремумів, що визначають межі раціонального впливу ультразвуку.

Для детальної оцінки ефектів взаємодії факторів, локалізації зон технологічного оптимуму та наочної інтерпретації встановлених закономірностей за отриманим рівнянням було побудовано графічні моделі у вигляді тривимірних поверхонь відгуку та їхніх двовірних перерізів.

На рис. 4.4-4.6 представлено поверхні відгуків цільових функцій середнього діаметру жирових кульок (d_{32}) від потужності ультразвуку (W), питомої енергії оброблення ($E_{\text{пнт}}$) та температури середовища ($T_{\text{см}}$), а також їхні двовірні перерізи в площинах параметрів впливу, які дозволяють наглядно проілюструвати залежність даних цільових функцій від окремих параметрів впливу.

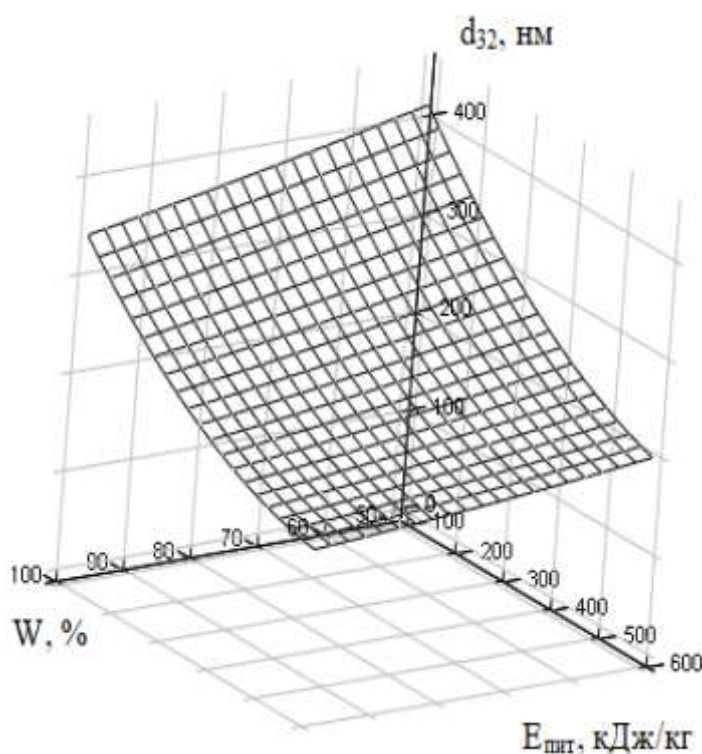


Рисунок 4.4. Поверхня відгуку та її двовірні перерізи для середнього діаметру жирових кульок (d_{32}) від потужності ультразвуку (W) та питомої енергії оброблення ($E_{\text{пнт}}$)

Аналіз графічної залежності, представленої на рис. 4.4, дозволяє встановити характер впливу основних енергетичних параметрів ультразвукового оброблення на ступінь дисперсності жирової фази

конопляного напою. Візуалізація поверхні відгуку свідчить про наявність вираженої оберненої залежності між зростанням потужності ультразвуку та питомої енергії спостерігається інтенсивне зменшення середнього діаметра жирових кульок. Такий характер кривої підтверджує ефективність акустичної кавітації як інструменту дезінтеграції жирових кульок у рослинних екстрактах.

В області мінімальних значень факторів ($W=50\%$, $E_{um}=100$ кДж/кг) показник d_{32} досягає свого максимуму, що становить понад 350-400 нм. Це пояснюється низькою інтенсивністю кавітаційного поля, за якої амплітуда акустичного тиску є недостатньою для подолання сил поверхневого натягу на межі поділу фаз. За таких умов енергії ударних хвиль вистачає лише для первинного грубого диспергування, що не дозволяє отримати систему з високою седиментаційною стійкістю.

Інтенсифікація енергетичного впливу призводить до стрімкого зниження цільової функції. Найбільш виражене подрібнення кульок спостерігається при потужності понад 80 % та питомій енергії оброблення понад 450 кДж/кг. Такий результат зумовлений високою концентрацією кавітаційних бульбашок та потужністю кумулятивних мікропотоків, що забезпечують подрібнення жирових крапель до розмірів, порівняних із товщиною адсорбційного шару білків-емульгаторів.

Аналіз поверхонь відгуку та їхніх двомірних перерізів дозволяє встановити характер сукупного впливу потужності ультразвуку та температури середовища на ступінь дисперсності жирової фази конопляного напою (рис. 4.5). Графічна інтерпретація свідчить про те, що обидва фактори мають суттєвий вплив на величину показника d_{32} , а їхнє одночасне зростання забезпечує суттєве подрібнення жирових кульок. Найвищі значення середнього діаметра понад 250–300 нм фіксуються в зоні низькотемпературної обробки при мінімальній потужності випромінювання, що вказує на недостатність енергетичного потенціалу для ефективного диспергування емульсійної системи.

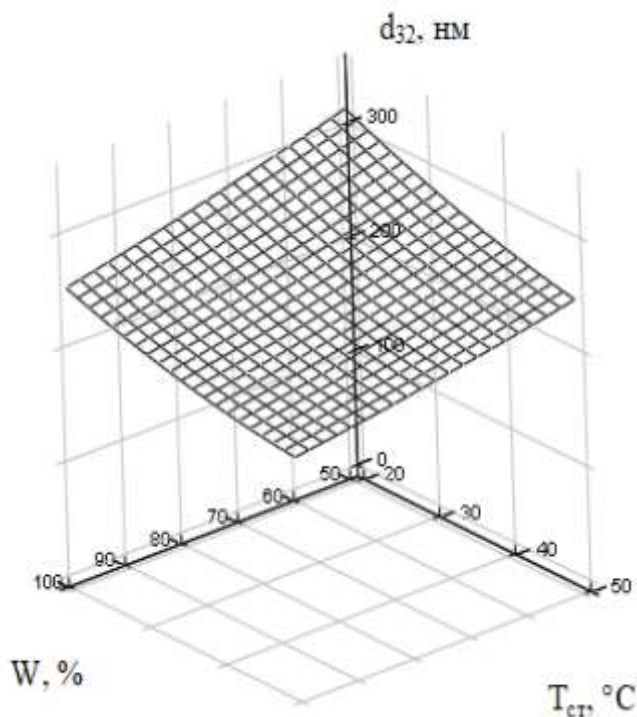


Рисунок 4.5. Поверхня відгуку та її двомірні перерізи для середнього діаметру жирових кульок (d_{32}) від потужності ультразвуку (W) та температури середовища ($T_{ст}$)

Температурний фактор відіграє критичну роль у процесі кавітаційного подрібнення, що чітко простежується за нахилом поверхні відгуку. Підвищення температури середовища з 20 до 50 °С сприяє зниженню динамічної в'язкості конопляного екстракту та зменшенню сил міжфазного натягу. Це полегшує деформацію жирових крапель та їх подальшому диспергуванню під дією ударних хвиль. Крім того, при підвищених температурах інтенсифікується дифузія білків-емульгаторів насіння конопель до новоутворених поверхонь поділу фаз, що запобігає зворотній коалесценції часток.

Вплив потужності ультразвуку W проявляється у зростанні амплітуди акустичного тиску, що є визначальною силою кавітаційного процесу. При збільшенні потужності до 90-100 % спостерігається найбільш інтенсивне зниження показника d_{32} до рівня 100–120 нм. Це зумовлено тим, що висока

енергія випромінювання ініціює виникнення великої кількості кавітаційних зародків, сплескування яких генерує потужні кумулятивні мікрострумені. Саме ці локальні гідродинамічні збурення забезпечують подрібнення жирових кульок до субмікронного розміру.

Аналіз поверхонь відгуку та їхніх двовірних перерізів (рис. 4.6) дає змогу оцінити поєданий вплив питомої енергії оброблення E_{num} та температури середовища T_{cm} на зміну середнього діаметра жирових кульок d_{32} . Отримана графічна залежність описує складну взаємодію термодинамічних та гідродинамічних чинників, що визначають кінцеву дисперсність конопляної емульсії. Встановлено, що обидва фактори мають інтенсивний вплив на цільову функцію, а їхнє одночасне зростання призводить до суттєвого подрібнення ліпідної фази.

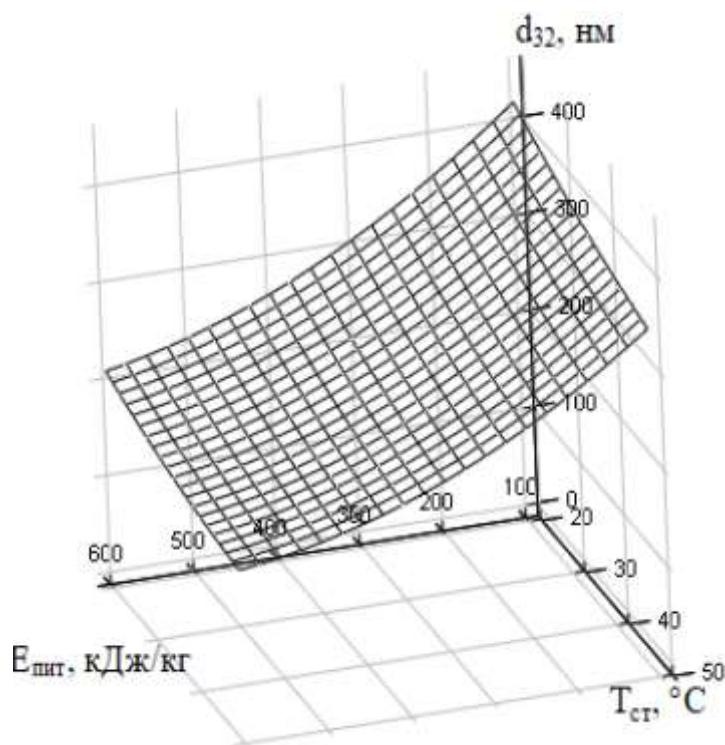


Рисунок 4.6. Поверхня відгуку та її двовірні перерізи для середнього діаметру жирових кульок (d_{50}) від питомої енергії обробки (E_{num}) та температури середовища (T_{cm}).

Максимальні значення показника d_{32} (понад 400 нм) спостерігаються в зоні мінімального енергетичного впливу $E_{num}=100$ кДж/кг та низьких

температур (20 °C). Така картина пояснюється високою в'язкістю системи при низьких температурах та недостатньою кількістю підведеної енергії для подолання внутрішніх зв'язків жирових кульок. Зі збільшенням питомої енергії оброблення до 500-600 кДж/кг спостерігається зменшення розміру часток. Цей ефект посилюється при підвищенні температури системи до 40-50 °C. Фізичний зміст даного явища полягає у зниженні динамічної в'язкості дисперсійного середовища та послабленні міжфазного натягу під дією тепла, що значно полегшує процес дезінтеграції жиру кавітаційними бульбашками. Характер ізоліній свідчить, що в зоні високих температур 45–50 °C навіть помірне зростання питомої енергії дозволяє досягти стабільних значень d_{32} у межах 120-150 нм.

Найбільш раціональна область оброблення з точки зору мінімізації розміру часток знаходиться у діапазоні питомої енергії 450-600 кДж/кг та температурі 40-50 °C. Така висока дисперсність забезпечує тривалу агрегативну стійкість системи, проте подальший аналіз потребує порівняння цих даних із показниками якості ліпідів емульсійної системи, оскільки саме в цій зоні енергетичний вплив є найбільш агресивним.

Таким чином, отримана математична модель та її графічна інтерпретація у вигляді поверхонь відгуку свідчать, що середній діаметр жирових кульок є складною функцією енергетичних та термодинамічних параметрів ультразвукового оброблення. Встановлено, що домінуючим фактором впливу на дисперсність конопляної емульсії є питома енергія, зростання якої у поєднанні з високою потужністю ультразвуку та температурою забезпечує подрібнення ліпідної фази. Нелінійний характер рівняння регресії та наявність зон стабілізації на поверхнях відгуку підтверджують можливість досягнення високого ступеня гомогенізації конопляного напою, що є передумовою його високої седиментаційної стійкості. Раціональні діапазони факторів є підґрунтям для подальшої оптимізації технології з урахуванням показників окиснювальної безпеки продукту.

4.3.2. Закономірності зміни індексу стабільності конопляної емульсії

Забезпечення тривалої седиментаційної стійкості конопляного напою є необхідною умовою, оскільки показник корелює зі споживчою привабливістю продукту. Індекс стабільності I_{cm} дозволяє кількісно оцінити здатність емульсійної системи чинити опір розшаруванню під час зберігання. Дослідження закономірностей зміни I_{cm} у залежності від режимів ультразвукової обробки дозволяє оцінити ефективність диспергування та стабілізації.

Саме на цій основі передбачено визначення раціональних технологічних режимів обробки конопляної емульсії та умов зберігання її стабільності.

Індекс стабільності визначали математичним моделюванням, як функціонал відповідної залежності:

$$I_{ct} = f(W, E_{\text{пит}}, T_{CT}) \quad (4.5)$$

де I_{cm} - індекс стабільності, %; W - потужність, %; $E_{\text{пит}}$ - питома енергія, кДж/кг; T_{CT} - температура, °C.

Матрицю планування експерименту для оцінки індексу стабільності конопляної емульсії I_{cm} , % під дією ультразвукової кавітації та отримані експериментальні дані наведено в табл. 4.7.

Для функції відгуку - індекс стабільності, рівняння регресії згідно проведеного багатofакторного експерименту для кодованих значень має вигляд:

$$y_2 = 96,76 + 0,6516x_1 + 2,322x_2 - 0,4213x_3 - 0,6x_1x_2 + \\ - 0,25x_1x_3 - 0,675x_2x_3 - 0,2868x_1^2 - 1,276x_2^2 - 1,346x_3^2. \quad (4.6)$$

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

**Матриця планування експерименту та результати дослідження
індексу стабільності конопляного напою**

№ дослідду	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	I_{cm}
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	94,9
2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	95,3
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	89,3
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	86,8
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	96,6
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	96
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	90,8
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	85,8
9	+1	-1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0	0	91,9
10	+1	+1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0	0	94,4
11	+1	0	-1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0	84,3
12	+1	0	+1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0	97,1
13	+1	0	0	-1,681	0	0	0	0	0	+2,83	90,7
14	+1	0	0	+1,681	0	0	0	0	0	+2,83	91,3
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95,6
16	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	96,3
17	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94,4
18	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95,1
19	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	96,3
20	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	96,7

Для дійсних значень факторів рівняння регресії для функції відгуку –
індекс стабільності має вигляд:

$$I_{CT} = 42,51 + 0,3068W + 0,08837E_{\text{пит}} + 1,34T_{CT} - 0,0002563WE_{\text{пит}} - \\ - 0,001905WT_{CT} - 0,0005018E_{\text{пит}}T_{CT} - 0,000711W^2 - 5,17 \cdot 10^{-5}E_{\text{пит}}^2 - \\ - 0,01527T_{CT}^2 \quad (4.7)$$

При цьому $S_{\text{відм}}^2 = 0,048$; $S_{\text{ад}}^2 = 0,1582$; $F = 3,296 < [F] = 4,784$, отже за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність регресійної моделі (4.7) можна вважати правильною з 95%-ю достовірністю. Коефіцієнт кореляції склав $R=0,9848$, що свідчить про високу точність результатів. Встановлено, що за критерієм Стюдента серед досліджуваних факторів впливу найбільше на індекс стабільності впливає питома енергія, а найменше – температура.

Додатні значення лінійних коефіцієнтів при факторах потужності W , питомої енергії $E_{\text{пит}}$ та температури T_{CT} свідчать про те, що їхнє зростання сприяє підвищенню індексу стабільності. Такі результати мають пряму кореляцію з попередніми дослідженнями діаметра жирових кульок. Нелінійний характер моделі вказує на те, що подальше зростання величини факторів призведе до зміни показника стабільності.

За рівнянням було побудовано тривимірні поверхні відгуку та їхні двовірні перерізи (рис. 4.7-4.9).

Аналіз графічної залежності, представленої на рис. 4,7 дозволяє оцінити характер впливу потужності ультразвуку W та питомої енергії обробки $E_{\text{пит}}$ на седиментаційну стійкість конопляної емульсії. Візуалізація поверхні відгуку свідчить про наявність прямої кореляції. Інтенсифікація енергетичного впливу призводить до зростання індексу стабільності, що підтверджує ефективність обраного методу обробки.

В області мінімальних значень факторів показник індексу стабільності знаходиться на рівні близько 90 %. Таке значення свідчить про схильність системи до повільного розшарування з часом. Це пояснюється недостатньою інтенсивністю обробки для досягнення цільового діаметру жирової фази.

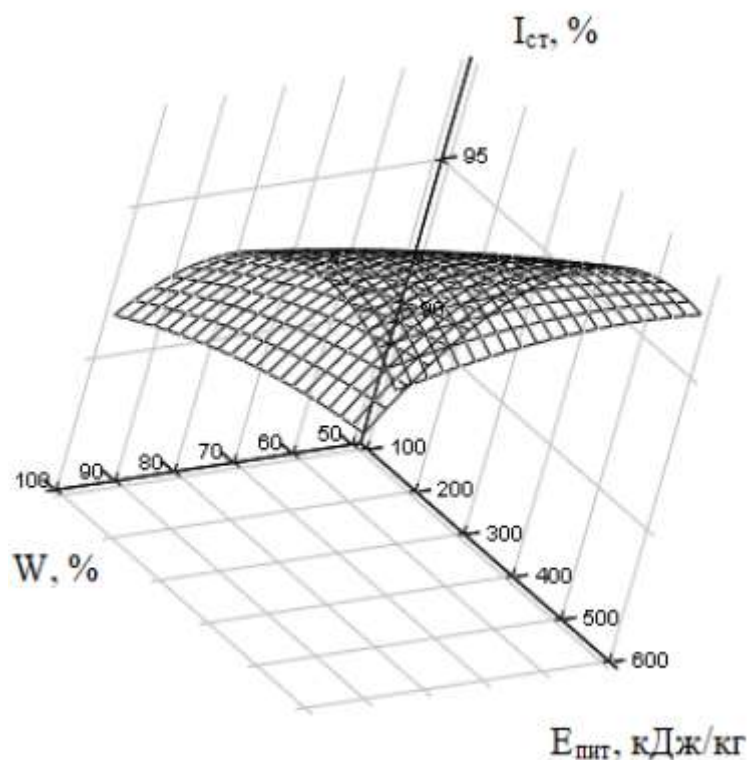


Рисунок 4.7. Поверхня відгуку та її двомірні перерізи для залежності індексу стабільності ($I_{ст}$) від потужності ультразвуку (W) та питомої енергії оброблення ($E_{пит}$)

Зі збільшенням потужності понад 80% та питомої енергії до 400-600 кДж/кг індекс стабільності сягає 95–97 %. Висока седиментаційна стійкість зумовлена тим, що за такого розміру частинок сили броунівського руху починають переважати над гравітаційними силами та забезпечують тривалу агрегативну стабільність напою.

Характер двомірних перерізів поверхні відгуку вказує на те, що для досягнення стабільності понад 95 % раціональним є поєднання потужності ультразвуку в межах 85-90 % та енергії оброблення не менше 450 кДж/кг. Що можна пояснити, як забезпечення необхідної амплітуди ударних хвиль для дезінтеграції жиру за високої потужності, а рівень питомої енергії - необхідну тривалість, і в сукупності формування стійкої гетерогенної системи.

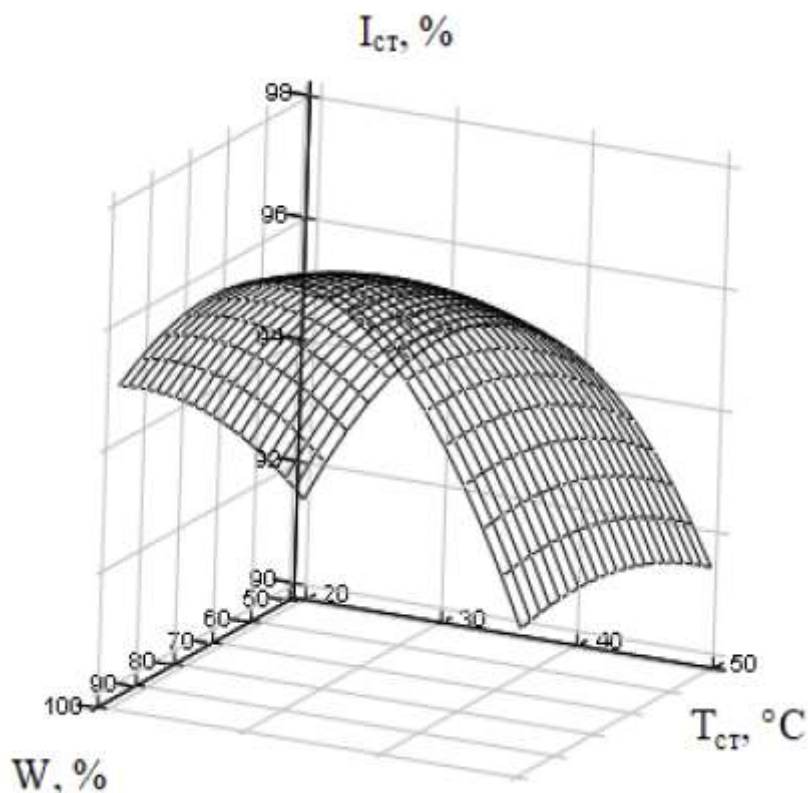


Рисунок 4.8. Поверхня відгуку та її двомірні перерізи для залежності індексу стабільності (I_{cm}) від потужності ультразвуку (W) та температури (T_{cm})

Графічна інтерпретація (рис. 4.8) свідчить про те, що обидва фактори відіграють важливу роль у формуванні агрегативної стійкості рослинного напою. Спостерігається тенденція до зростання індексу стабільності за одночасного підвищення енергетичних та температурних параметрів обробки.

У зоні низьких температур та помірної потужності ультразвуку значення I_{cm} коливаються в межах 88–92 %. Це зумовлено високою в'язкістю системи при нижчих температурах, як наслідок вплив на інтенсивність кавітаційних мікропотоків. За таких умов енергії ударних хвиль недостатньо для досягнення того необхідного для стабільності рівня дисперсності. Присутність у системі відносно більших жирових глобул створює передумови для кремування.

Підвищення температури середовища до 40–50 °С пришвидшує процес диспергування. Завдяки зниженню динамічної в'язкості дисперсійного середовища опір розриву рідини зменшується, розвивається більш інтенсивна кавітація та підвищуються дифузійні властивості білків насіння конопель. Це забезпечує швидке формування адсорбційного захисного шару на поверхні жирових крапель, запобігаючи їхній коалесценції та підвищуючи загальний I_{cm} до 95–97 %. Найбільш раціональна область, що забезпечує максимальні значення індексу стабільності локалізована в діапазоні потужності ультразвуку 85-100 % та температурі 45–50 °С.

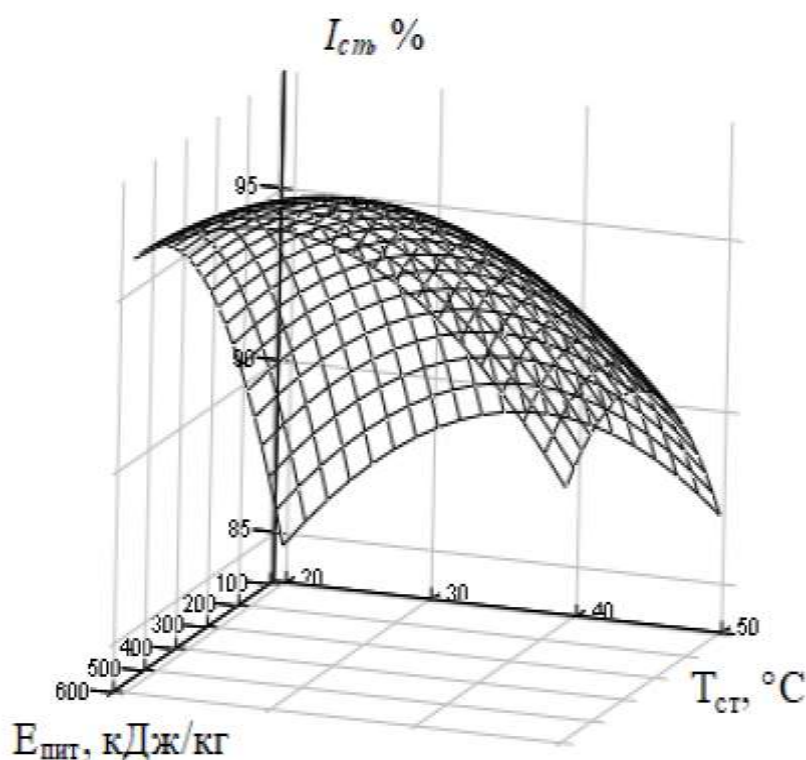


Рисунок 4.9. Поверхня відгуку та її двомірні перерізи для залежності індексу стабільності (I_{cm}) від питомої енергії обробки ($E_{пит}$) та температури середовища (T_{cm}).

Аналіз поверхні відгуку (рис. 4.9) демонструє, що максимальні значення індексу стабільності досягаються при одночасному зростанні обох факторів, що вказує на їх виражену синергетичну взаємодію в процесі диспергування. В області мінімальних значень факторів показник I_{cm} є найнижчим. Такий стан

емульсійної системи зумовлений недостатнім рівнем підведеної енергії та високою динамічною в'язкістю екстракту. Збільшення питомої енергії до 400-500 кДж/кг за умови підвищення температури до 45 °С призводить до зростання індексу стабільності до рівня 95-97 %.

Фактично для досягнення стабільності понад 95 % оптимальним є підтримання температури в межах 45 °С за рівня питомої енергії не менше 450 кДж/кг. Подальше зростання енергетичного впливу не призводить до суттєвого підвищення $I_{ст}$, оскільки система досягає стану насичення. Таким чином, встановлені параметри забезпечують формування стійкої емульсійної структури рослинного напою, яка здатна зберігати стабільність протягом часу зберігання.

Таким чином, результати досліджень свідчать, що індекс стабільності рослинного напою з насіння конопель сорту Глесія є інтегральним показником, який залежить від синергетичної взаємодії енергетичних та термічного факторів ультразвукового диспергування. Встановлено, що для формування стійкої емульсійної системи раціональним є підтримання потужності ультразвуку в межах 85-90%, питомої енергії оброблення 400-450 кДж/кг та температури середовища 45-50 °С.

4.3.3. Оцінка показників окиснення при різних режимах впливу

Обґрунтування раціональних режимів ультразвукового диспергування жирової емульсії в технології виробництва рослинного напою з насіння конопель передбачає обов'язковий контроль хімічної стабільності ліпідної фракції. Високий вміст поліненасичених жирних кислот у ядрі насіння конопель сорту Глесія обумовлює високу чутливість до інтенсивної кавітації та термічного впливу. Для системного оцінювання якості жирової фази емульсії використано інтегральний показник окиснення *TOTOX*, який враховує сумарну концентрацію первинних та вторинних продуктів змін тригліцеридів. Визначення математичних залежностей цього показника від факторів оброблення дозволяє встановити гранично допустимі режими

інтенсифікації процесу, що забезпечують збереження біологічної цінності та органолептичних властивостей напою.

Дослідження здійснювали шляхом встановлення функціональних залежностей:

$$TOTOX = f(W, E_{\text{пит}}, T_{\text{СТ}}) \quad (4.8)$$

де $TOTOX$ – показник окиснення.

В таблиці 4.8 наведено матрицю планування експерименту для оцінки показника окиснення конопляної емульсії ($TOTOX$, ум.од.) під дією ультразвукової кавітації.

Рівняння регресії, що враховує залежність показника окиснення від досліджуваних факторів представлено наступною математичною моделлю:

$$y = 5,47 + 0,3539x_1 + 1,455x_2 + 1,655x_3 + 0,07875x_1x_2 + 0,08875x_1x_3 + 0,2788x_2x_3 + 0,02256x_1^2 + 0,08084x_2^2 + 0,3334x_3^2 \quad (4.9)$$

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

Для дійсних значень факторів вихідне рівняння регресії (4.9) для функції відгуку – показник загального окиснення ($TOTOX$) отримано у вигляді [186]:

$$\begin{aligned} TOTOX = & 5,383 - 0,0302W - 0,002866E_{\text{пит}} - 0,2353T_{\text{СТ}} + \\ & + 3,517 \cdot 10^{-5}WE_{\text{пит}} + 0,0006574WT_{\text{СТ}} + 0,0002067E_{\text{пит}}T_{\text{СТ}} + \\ & + 0,0001236W^2 + 3,9 \cdot 10^{-6}E_{\text{пит}}^2 + 0,00426T_{\text{СТ}}^2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Статистична оцінка отриманих результатів за допомогою критерію Стюдента 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 розробленої моделі реальним умовам процесу стабілізації конопляної емульсії.

**Матриця планування експерименту та результати дослідження
показника окиснення конопляної емульсії**

№ дослід	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	<i>TOTOX,</i> <i>ум.од.</i>
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	9,84
2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	8,79
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	6,2
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	5,47
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	6,78
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	5,09
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	3,26
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	2,88
9	+1	-1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0	0	4,94
10	+1	+1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0	0	6,12
11	+1	0	-1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0	3,26
12	+1	0	+1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0	8,13
13	+1	0	0	-1,681	0	0	0	0	0	+2,83	3,64
14	+1	0	0	+1,681	0	0	0	0	0	+2,83	9,18
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,44
16	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,46
17	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,43
18	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,45
19	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,47
20	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,45

Аналіз одержаного рівняння регресії (4.10) дозволяє встановити характер та ступінь впливу параметрів ультразвукового оброблення на інтенсивність окиснювальних процесів у ліпідній фракції. Математична модель описує зміну показника окиснення як нелінійну функцію. Характер

отриманої залежності свідчить про наявність чітко окресленої технологічної межі. Вихід за межі якої призводить до деструкції поліненасичених жирних кислот насіння конопель сорту Глесія. Найбільш вагомий вплив на зростання показника окиснення має температура середовища та потужність акустичного впливу. Знаки лінійних коефіцієнтів та квадратичних членів рівняння вказують на параболічну форму поверхні відгуку. Підвищення потужності ультразвуку та питомої енергії оброблення за високої температури призводить до утворення гідроперекисів. Тому необхідно дотримувати температурний режим, який разом з високою інтенсивністю кавітації є визначальним для збереження біологічної цінності ліпідів рослинного напою з насіння конопель.

Графічна інтерпретація результатів дозволяє детально проаналізувати динаміку зміни показника окиснення у всьому діапазоні варіювання потужності ультразвуку, питомої енергії та температури середовища. Такий підхід важливий для встановлення значень безпечного акустичного впливу. За якого висока ефективність гомогенізації ліпідної фази насіння конопель сорту Глесія поєднується з мінімальним накопиченням продуктів деградації жирів.

За допомогою пакету прикладних програм MathCAD було проведено оптимізацію функції відгуку – показник загального окиснення шляхом її максимізації (рис. 4.10 - 4.12).

Аналіз графічної залежності (рис. 4.10), свідчить про поступове зростання показника окиснення зі збільшенням інтенсивності акустичного впливу. Характер поверхні відгуку підтверджує, що потужність ультразвуку та питома енергія оброблення мають прямий вплив на швидкість накопичення продуктів окиснення у ліпідній фазі напою. Порівняльний аналіз нахилу поверхні відгуку вздовж осей факторів вказує на те, що питома енергія оброблення має більший вплив на хімічну деградацію ліпідів порівняно з потужністю. Оскільки тривалий вплив навіть при помірній потужності створює умови для глибшої трансформації компонентів напою. Отже, для забезпечення окисдаивної стабільності напою раціональним є обмеження питомої енергії оброблення на рівні, що не перевищує 500 кДж/кг.

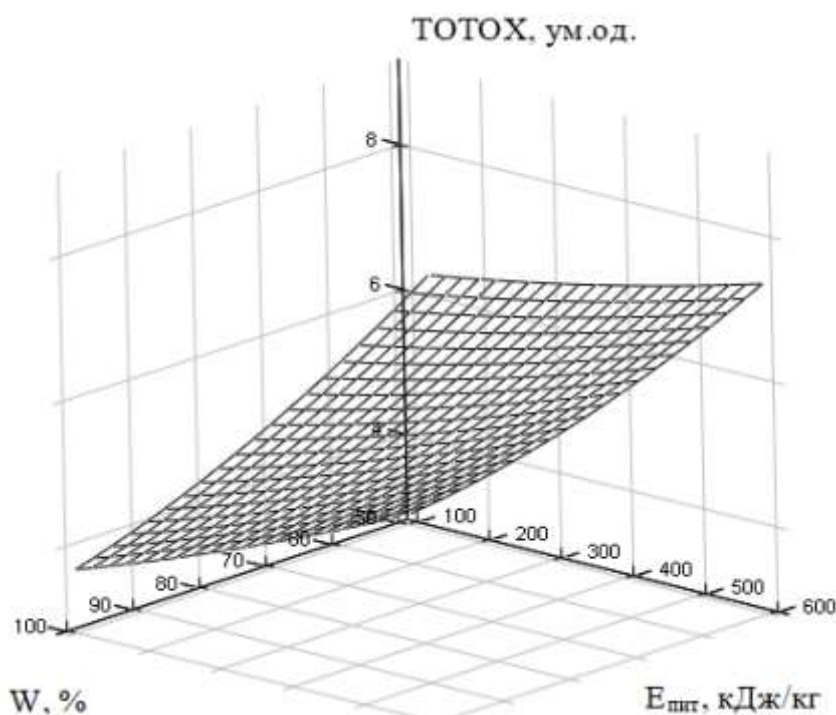


Рисунок 4.10. Поверхня відгуку та її двомірні перерізи для залежності показника загального окиснення (показник *TOTOX*) від потужності ультразвуку (*W*) та питомої енергії оброблення *E_{пит}*)

Встановлені закономірності вказують на необхідність пошуку технологічного компромісу. Збереження якості рослинного напою з насіння конопель сорту Глесія можливе за умови ультразвукового диспергування в межах, що не призводять до виходу показника окиснення за критичні значення.

Аналіз поверхонь відгуку та їхніх двомірних перерізів (рис. 4.11) дозволяє встановити характер впливу потужності ультразвукового оброблення та температури середовища на інтенсивність накопичення продуктів окиснення. Характер отриманої залежності має виражений нелінійний вигляд.

Встановлено, що в діапазоні температур від 20 до 35⁰С навіть за досить великої потужності ультразвуку показник окиснення залишається на низькому рівні. Це вказує на те, що сама по собі механічна дія кавітації без значного нагрівання не призводить до критичної деструкції тригліцеридів. Однак, при

підвищенні температури понад 35°C спостерігається стрімке зростання цільової функції.

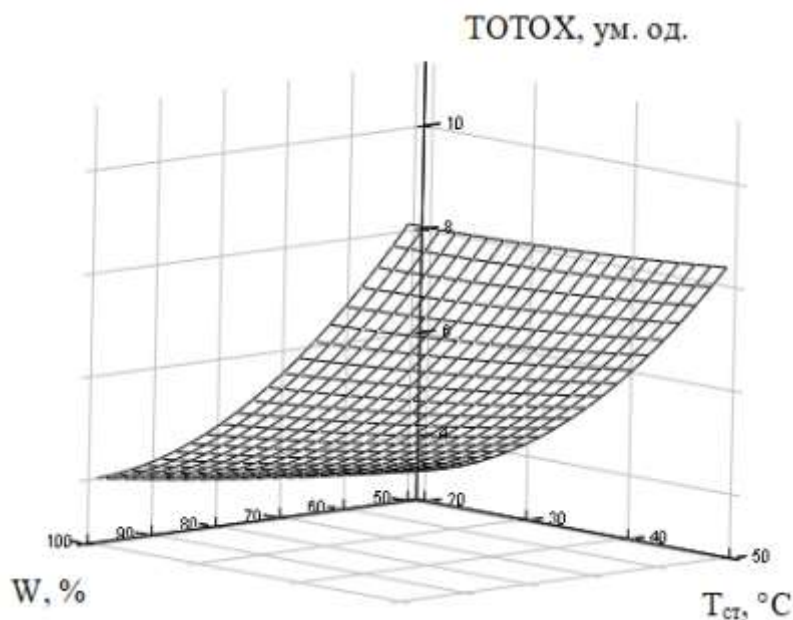


Рисунок 4.11. Поверхня відгуку та її двомірні перерізи для залежності показника загального окиснення (показник *TOTOX*) від потужності ультразвуку (*W*) та температури середовища (*T_{ст}*)

Для забезпечення високої якості продукту раціональним є обмеження температурного режиму до 40°C . Навіть при максимальній потужності диспергування підтримання температури на цьому рівні дозволяє зберегти показник окиснення в межах безпечних значень до 6,0 ум. од.

За результатами аналізу поверхні відгуку та її двомірних перерізів (рис. 4.12) встановлено, що питома енергія оброблення та температура середовища мають суттєвий кумулятивний вплив на показник окиснення ліпідів напою. Встановлено, що найменшу швидкість накопичення продуктів деградації ліпідів отримано за умов мінімального теплового впливу незалежно від рівня питомої енергії, що підкреслює роль температурного фактору.

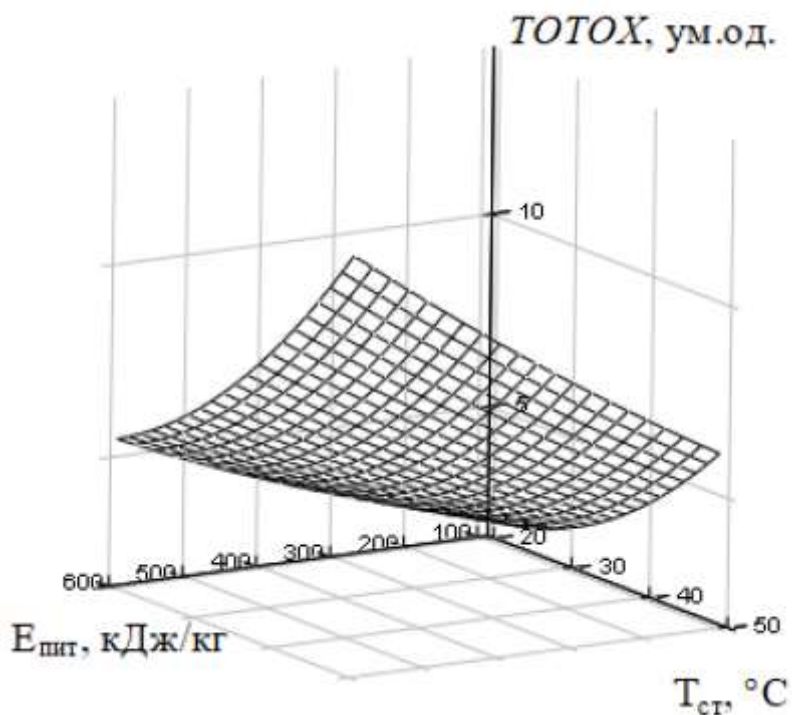


Рисунок 4.12. Поверхня відгуку та її двомірні перерізи для залежності показника загального окиснення (показник *TOTOX*) від питомої енергії обробки ($E_{\text{пит}}$) та температури середовища ($T_{\text{ст}}$).

При підвищенні температури спостерігається збільшення швидкості окиснювальних процесів, яка значно зростає при збільшенні питомої енергії до 600 кДж/кг. За такого значення показник окиснення максимальна, що свідчить про глибоку хімічну трансформацію ліпідної фази.

Таким чином, результати досліджень засвідчують, що показник окиснення рослинного напою є функцією сукупного енергетичного та термічного впливу, де температура середовища виступає домінуючим фактором щодо деструктивних процесів. Встановлено, що для збереження високої хімічної стабільності ліпідної фази насіння конопель сорту Глесія та запобігання інтенсивному накопиченню продуктів окиснення, технологічні параметри обробки слід обмежити температурою не вище 40 °C та питомою енергією до 450 кДж/кг. Дотримання цих меж дозволяє отримати продукт із прийнятним рівнем окислативної деградації до 6,0-6,5 ум. од. За таких значень досягається технологічний компроміс між седиментаційною стійкістю

системи та збереженням її біологічної цінності й органолептичних показників протягом терміну зберігання. Одержана модель має важливе практичне значення для розроблення технологічного регламенту виробництва.

Таким чином, обмеження питомої енергії оброблення та контроль температури в процесі ультразвукового диспергування дозволить отримати якісний продукт.

4.4. Розробка технології виробництва рослинного напою з насіння конопель сорту Глесія

Технологія розроблена з урахуванням сучасних вимог до натуральності компонентного складу та орієнтована на максимальне збереження біологічної цінності вихідної сировини.

Технологічний процес розпочинається з етапу підготовки. Відповідно до схеми (рис. 4.13), як вихідна сировина використовується ціле насіння конопель, яке потребує обов'язкового обрешування. Спочатку відбувається очищення насіння від механічних домішок. Наступним етапом є обрешування, яке полягає в руйнуванні твердої зовнішньої оболонки цілого насіння, з подальшим видаленням лущиння, як правило, сепаруванням. Цей етап є критично важливим для забезпечення якісних органолептичних показників. Відповідно до проведених досліджень для виробництва доцільно використовувати лише ядро, оскільки в оболонці локалізується основна частка антиаліментарних факторів. Завершується підготовка стадія інспекцією отриманих ядер, під час якої вилучають залишки оболонки та пошкоджене насіння.

Після підготовки очищене ядро піддають механічному подрібненню для руйнування клітинної структури та збільшення площі контакту фаз. Подрібнену сировину змішують з підготовленою водою у співвідношенні 1:8. Для забезпечення максимальної ефективності процесу температурний режим екстрагування жорстко підтримується на рівні 35-40 °C. Такий температурний рівень створює сприятливі умови для переходу водорозчинних білкових

фракцій у дисперсійне середовище, водночас повністю виключаючи ризик їхньої теплової денатурації. Після екстрагування суміш розділяють шляхом фільтрування з відведенням осаду для отримання чистого екстракту.

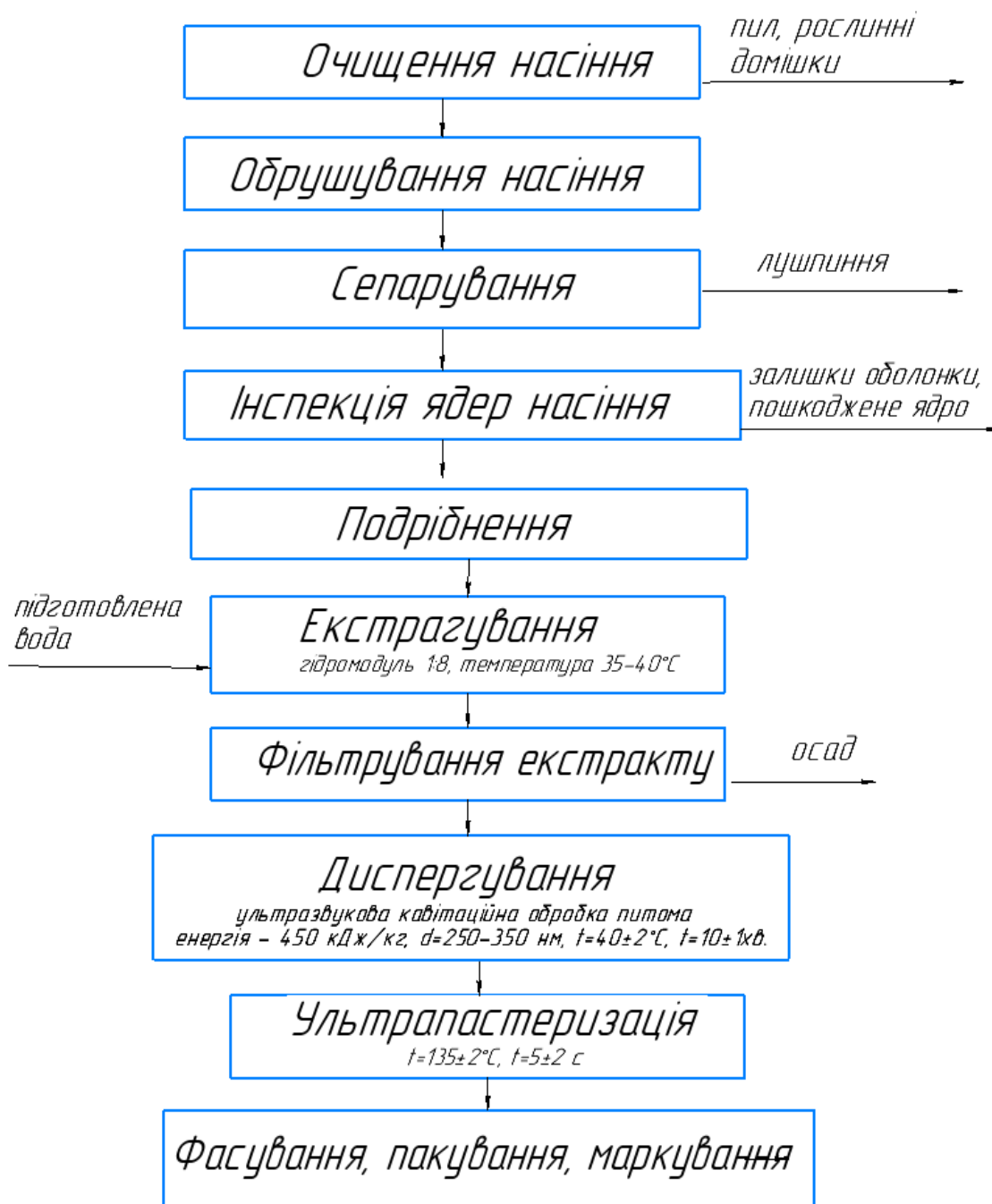


Рисунок 4.13. Технологічна схема виробництва рослинного напою з насіння конопель сорту Глесія

Для забезпечення кінетичної та агрегативної стійкості готового продукту застосовано метод фізико-механічної стабілізації шляхом ультразвукової кавітаційної обробки. Процес диспергування здійснюється за робочих параметрів: питома енергія обробки – 450 кДж/кг, температура 40 °С, тривалість обробки 10 хв. За інтенсивного впливу ультразвукової кавітації відбувається ефективне подрібнення дисперсної фази, ефективний розмір для стабільної емульсії - 250–350 нм. Саме така дисперсність забезпечує тривалу стабільність емульсії без використання екзогенних стабілізаторів. Оскільки кавітаційні явища супроводжуються дисипацією енергії та перетворення її на теплову, для запобігання руйнуванню біологічно активних речовин загальна температура системи під час обробки підтримується на рівні не вище 40 °С (завдяки системі циркуляційного охолодження робочої камери).

Для забезпечення мікробіологічної безпеки та подовження термінів зберігання продукту проводять ультрапастеризацію за температури 135 ± 2 °С з експозицією 5 ± 2 секунди. Такий короткочасний високотемпературний режим ефективно знищує патогенну мікрофлору, мінімізуючи при цьому термічну деградацію термолабільних нутрієнтів та запобігаючи автоокисленню поліненасичених жирних кислот. Завершальним етапом є фасування, пакування та маркування готового продукту за дотримання асептичних умов.

Запропонована технологія дозволяє отримувати високоякісний, стабільний рослинний напій, максимально реалізуючи функціонально-технологічний потенціал конопляної сировини.

Висновки до розділу 4

1. Обґрунтовано використання ядра насіння технічних конопель вітчизняної селекції сорту Глесія, як перспективної сировини для виробництва рослинних напоїв. Встановлено характер впливу гідромодуля на нутрієнтний склад екстрактів у діапазоні від 1:4 до 1:12. За показниками харчової цінності

зразок із гідромодулем 1:8 є найбільш наближеним до коров'ячого молока із жирністю 3,2%.

2. За використання методу узагальненої функції бажаності Харрінгтона проведено кваліметричну оцінку сенсорних властивостей напою. Аналіз профілів бажаності та інтегрального показника D підтвердив, що еталонним є гідромодуль 1:8 за якого $D=0,8687$. Зразки з гідромодулем 1:4 характеризуються надмірною інтенсивністю ознак, а 1:12 – незадовільними органолептичними характеристиками через значне розведення.

3. За результатами проведеного багатофакторного експерименту розроблено математичні моделі, що адекватно описують зміну показників якості рослинного напою з ядра насіння конопель залежно від параметрів ультразвукової обробки. Встановлено, що функції відгуку, які характеризують фізичну стабільність I_{cm} та хімічну безпеку $TOTOX$ системи, мають нелінійний характер і визначаються синергетичною взаємодією потужності ультразвуку, питомої енергії та температури середовища.

4. Агрегативна стійкість рослинного напою на рівні 95-97% досягається за умов інтенсифікації акустичного впливу при потужності 85-95 % та питомій енергії 450-500 кДж/кг. За такого рівня енергії ультразвукової обробки відбувається інтенсивне руйнування жирової фази та розгортання глобул білка едестину, що забезпечує високу седиментаційну стійкість. Водночас встановлено, що подальше нарощування енергетичних параметрів є технологічно недоцільним.

5. Аналіз показника окиснення дозволив визначити межу технологічної безпеки процесу диспергування. Встановлено, що температура середовища понад 45-50 °C ініціює ланцюгові реакції автоокиснення поліненасичених жирних кислот. За умови тривалого ультразвукового та термічного впливу спостерігається стрімке накопичення продуктів окиснення понад 9-10 ум. од. Це обґрунтовує необхідність жорсткого температурного контролю та обмеження тривалості оброблення для збереження біологічної цінності продукту.

6. Визначено раціональні режими ультразвукової обробки на рівні потужність – 85-95 %, питома енергія – 450-500 кДж/кг, температура – 40 °С. Зазначені параметри забезпечують отримання стабільного гомогенного напою з показником окиснення не вище 6,5 ум. од. Отримані результати є науковим підґрунтям для розроблення нормативної документації та впровадження ультразвукової технології у промислове виробництво напоїв із ядра насіння конопель сорту Глесія.

7. Науково обґрунтовано технологію виробництва рослинного напою з насіння конопель сорту Глесія. Доведено ефективність попереднього обрушування сировини. Формування кінетично та агрегативно стійкої емульсії без внесення стабілізаторів відбувається під дією ультразвукової кавітації за встановлених параметрів та досягнення розміру жирових глобул до 250-350 нм. Завершальна термічна обробка забезпечує мікробіологічну безпеку та якість продукту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.

Робота присвячена вирішенню важливої науково-практичної задачі удосконалення процесу стабілізації рослинного напою з насіння конопель за використання ультразвукової кавітаційної технології. Досягнення мети здійснено рішенням визначених задач в результаті яких отримані нові теоретичні та практичні результати, що викладені у наступних висновках.

1. Приведений аналіз засвідчив актуальність проблеми та необхідність пошуку рішень удосконалення процесу стабілізації рослинних жирових емульсій. Детальний аналіз процесів попередньої обробки сировини, подрібнення та екстракції, емульгування та стабілізації, ароматизації та збагачення, пастеризації, упаковки та зберігання, а також контроль якості засвідчив, що саме процеси стабілізації стримують широке використання рослинного молока.

2. Широка гама застосування різних інгредієнтів не повною мірою задовольняють сучасні вимоги стабілізації та збереження рослинних напоїв, оскільки потребують застосування допоміжних емульгаторів. Висловлена ідея, що використання насіння конопель як інгредієнта, доведена системним аналізом її властивостей та незаперечним доказом отримання найбільш ефективного механізму забезпечення стійкості рослинного молока шляхом застосування ультразвукової кавітаційної обробки. Застосування ультразвукової кавітаційної обробки дозволяє не лише забезпечити стабільність емульсійної системи без застосування емульгаторів, а й відкриває шлях для використання внутрішніх резервів самої сировини.

3. Обґрунтовано комплексну структурно-логічну схему та методологію досліджень, яка базується на системному аналізі емульсійної системи з ядра насіння конопель сорту Глесія. Основу методичного підходу становить керована морфологічна трансформація складових компонентів насіння за ультразвукового кавітаційного впливу з метою отримання кінетично стійкого рослинного напою. Для теоретичного моделювання процесів формування та агрегативної стійкості емульсії обрано положення мікрогідродинаміки та

класичної теорії ДЛФО. Аналіз стабільності системи базується на дослідженні балансу сил електростатичного відштовхування та Ван-дер-Ваальсового притягання між жировими глобулами. Динаміка кавітаційного впливу описується модифікованими рівняннями типу Релея-Плессета.

4. Розроблено експериментальний стенд на базі циліндричної кавітаційної камери для дослідження впливу акустичного поля на емульсійну систему. Обґрунтовано фактори керування процесом стабілізації - потужність ультразвукового випромінювання, питома енергія обробки, температура середовища та комплекс фізико-хімічних та інструментальних методів оцінки якості конопляної емульсії.

5. Для оптимізації конструктивно-технологічних параметрів процесу ультразвукової стабілізації та отримання адекватних математичних моделей обрано метод планування багатфакторного експерименту. Застосування ротатбельного центрального композиційного планування другого порядку за методом Бокса-Уілсона дозволило отримати квадратичні регресійні моделі цільових функцій при мінімізації кількості дослідів. Адекватність отриманих моделей та значимість коефіцієнтів регресії оцінювали за критеріями Фішера та Стюдента.

6. Встановлено, що кінетична стабільність конопляної емульсії досягається завдяки інтенсивному диспергуванню жирової фази та модифікації білка едестину під дією ультразвукової кавітації. Доведено, що денатураційна активація едестину сприяє вивільненню сульфгідрильних груп та утворенню міжмолекулярних дисульфідних містків, що призводить до формування навколо жирових крапель суцільної в'язко-пружної оболонки.

7. Встановлена залежність для визначення агрегативної стабільності напою $V_{\max} \geq 20k_B T$ на основі використання умови розширеної теорії ДЛФО. Підтверджено седиментаційну стійкість, що зумовлена домінуванням енергії теплового броунівського руху над гравітаційними силами згідно із законом Стокса.

8. Досліджено та експериментально підтверджено, що оптимальний діапазон дисперсності жирової фази конопляного молока сорту «Глесія»,

отриманого методом ультразвукової кавітації, знаходиться в межах 250–350 нм, в якому досягається раціональний баланс між фізико-хімічною стійкістю системи та її органолептичними показниками. Доведено, що кінетична стабільність напою при зазначеному діаметрі часток забезпечує мінімальну швидкість гравітаційного розшарування згідно із законом Стокса, що дозволяє зберігати гомогенність системи без використання додаткових синтетичних емульгаторів.

9. Досліджено використання ефектів резонансу системи « кавітаційний апарат - бульбашка» на стадії сплескування бульбашки із забезпеченням режимів і параметрів ефективної взаємодії із жировою кулькою. Шляхом математичного моделювання процесів кавітаційної взаємодії та встановлення аналітичних залежностей динаміки руху компонентів визначено раціональні режими ультразвукової дезінтеграції жирових кульок.

10. За результатами проведеного багатофакторного експерименту розроблено математичні моделі, що адекватно описують зміну показників якості рослинного напою з ядра насіння конопель залежно від параметрів ультразвукової обробки. Встановлено, що функції відгуку, які характеризують фізичну стабільність I_{cm} та хімічну безпеку $TOTOX$ системи, мають нелінійний характер і визначаються синергетичною взаємодією потужності ультразвуку, питомої енергії та температури середовища.

11. Визначено раціональні режими функціонування ультразвукової системи на рівні параметрів: потужність – 85-95 %, питома енергія – 450-500 кДж/кг, температура – 40-45 °С. Зазначені параметри забезпечують отримання стабільного гомогенного напою з показником окиснення не вище 6,5 ум. од., що є оптимальним компромісом для технології рослинних аналогів молока.

12. Розроблені алгоритми та методики розрахунків режимів та параметрів, отриманих в дисертаційній роботі, є науковим підґрунтям для розроблення нормативної документації та впровадження ультразвукової технології у промислове виробництво напоїв із ядра насіння конопель сорту Глесія.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Paul A. A., Kumar S., Kumar V., Sharma R. Milk Analog: Plant based alternatives to conventional milk, production, potential and health concerns. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2019. P. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1674243>.
2. Chalupa-Krebzdak S., Long C. J., Bohrer B. M. Nutrient density and nutritional value of milk and plant-based milk alternatives. *Int. Dairy J.* 2018. Vol. 87. P. 84–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.07.018>.
3. Jukkola A., Rojas J. O. Milk fat globules and associated membranes: Colloidal properties and processing effects. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2017. Vol. 245. P. 92–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.04.010>.
4. Aydar E. F., Tutuncu S., Ozcelik B. Plant-based milk substitutes: bioactive compounds, conventional and novel processes, bioavailability studies, and health effects. *J. Funct. Foods.* 2020. Vol. 70. 103975. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103975>.
5. McClements D. J., Grossmann L. The science of plant-based foods: constructing next-generation meat, fish, milk, and egg analogs. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.* 2021. Vol. 20. P. 4049–4100. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12771>.
6. Рyc M., Cai Y. Q., Greer M. S., Yurchenko O., Chapman K. D., Dyer J. M., Mullen R. T. Turning over a New Leaf in Lipid Droplet Biology. *Trends Plant Sci.* 2017. Vol. 22. P. 596–609. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.03.012>.
7. Nikiforidis C. V. Structure and functions of oleosomes (oil bodies). *Adv. Colloid Interface Sci.* 2019. Vol. 274. 102039. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102039>.
8. Берник І. М., Драчук І. О. Оцінка та аналіз методів отримання рослинного аналога молока. *Здоров'я людини та нації.* 2025. № 3 (3). С. 137–148. DOI: <https://doi.org/10.31548/humanhealth.3.2025.137>.

9. Romulo A. Nutritional contents and processing of plant-based milk: a review. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 998, No. 1. 012054. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/998/1/012054>.
10. Penha C. B., Santos V. D. P., Speranza P., Kurozawa L. E. Plant-based beverages: ecofriendly technologies in the production process. Innovative Food Sci. And Emerg. Technol. 2021. Vol. 72. 102760. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102760>.
11. Popova A., Mihaylova D., Lante A. Insights and Perspectives on Plant-Based Beverages. Plants. 2023. Vol. 12 (19). 3345. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12193345>.
12. Rachtan-Janicka J., Gajewska D., Szajewska H., Włodarek D., Weker H., Wolnicka K., Wiśniewska K., Socha P., Hamulka J. The Role of Plant-Based Beverages in Nutrition: An Expert Opinion. Nutrients. 2025. Vol. 17 (9). 1562. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu17091562>.
13. Craig W. J., Fresán U. International Analysis of the Nutritional Content and a Review of Health Benefits of Non-Dairy Plant-Based Beverages. Nutrients. 2021. Vol. 13 (3). 842. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu13030842>.
14. Zhang Y. Y., Hughes J., Grafenauer S. Got Mylk? The emerging role of Australian plant-based milk alternatives as a cow's milk substitute. Nutrients. 2020. Vol. 12. 1254. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu12051254>.
15. Sousa A., Kopf-Bolanz K. A. Nutritional Implications of an Increasing Consumption of Non-Dairy Plant-Based Beverages Instead of Cow's Milk in Switzerland. J. Adv. Dairy Res. 2017. Vol. 5. 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9050682>.
16. EFSA NDA Panel. Scientific Opinion on Dietary Reference Values for Fats, Including Saturated Fatty Acids, Polyunsaturated Fatty Acids, Monounsaturated Fatty Acids, Trans Fatty Acids, and Cholesterol. EFSA J. 2010. Vol. 8. 1461. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2010.1461>.

17. O'Donnell-Megaró A. M., Barbano D. M., Bauman D. E. Survey of the Fatty Acid Composition of Retail Milk in the United States Including Regional and Seasonal Variations. *J. Dairy Sci.* 2011. Vol. 94. P. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3571>.
18. Harris M., Hutchins A., Fryda L. The impact of virgin coconut oil and high-oleic safflower oil on body composition, lipids, and inflammatory markers in postmenopausal women. *J. Med. Food.* 2017. Vol. 20. P. 345–351. DOI: <https://doi.org/10.1089/jmf.2016.0114>.
19. Neelakantan N., Seah J. Y. H., van Dam R. M. The effect of coconut oil consumption on cardiovascular risk factors. A systematic review and meta-analysis of clinical trials. *Circulation.* 2020. Vol. 141. P. 803–814. DOI: <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.119.043052>.
20. Angelino D., Rosi A., Vici G., Russo M. D., Pellegrini N., Martini D. Nutritional Quality of Plant-Based Drinks Sold in Italy: The Food Labelling of Italian Products (FLIP) Study. *Foods.* 2020. Vol. 9, No. 5. 682. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9050682>.
21. McCarthy K. S., Parker M., Ameerally A., Drake S. L., Drake M. A. Drivers of choice for fluid milk versus plant-based alternatives: What are consumer perceptions of fluid milk? *Journal of Dairy Science.* 2017. Vol. 100. P. 6125–6138. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12519>.
22. Rodriguez-Leyva D., Pierce G. N. The Cardiac and Haemostatic Effects of Dietary Hempseed. *Nutr. Metab.* 2010. Vol. 7. 32. DOI: <https://doi.org/10.1186/1743-7075-7-32>.
23. Pabich M., Materska M. Biological effect of soy isoflavones in the prevention of civilization diseases. *Nutrients.* 2019. Vol. 11. 1660. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu11071660>.
24. Besir A., Awad N., Mortas M., Yazici F. A Plant-Based Milk Type: Hemp Seed Milk. *Akademik Gıda.* 2022. Vol. 20, No. 2. P. 170–181. DOI: <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.1149875>.

25. Fructuoso I., Romão B., Han H., Raposo A., Ariza-Montes A., Araya-Castillo L., Zandonadi R. P. An Overview on Nutritional Aspects of Plant-Based Beverages Used as Substitutes for Cow's Milk. *Nutrients*. 2021. Vol. 13 (8). 2650. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu13082650>.
26. Jeske S., Zannini E., Arendt E. K. Past, present and future: The strength of plant-based dairy substitutes based on gluten-free raw materials. *Food Research International*. 2018. Vol. 110. P. 42–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.03.045>.
27. Munekata P. E. S., Domínguez R., Budaraju S., Roselló-Soto E., Barba F. J., Mallikarjunan K., Roohinejad S., Lorenzo J. M. Effect of innovative food processing technologies on the physicochemical and nutritional properties and quality of non-dairy plant-based beverages. *Foods*. 2020. Vol. 9, No. 3. 288. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9030288>.
28. Sethi S., Tyagi S. K., Anurag R. K. Plant-based milk alternatives an emerging segment of functional beverages: A review. *Journal of Food Science and Technology*. 2016. Vol. 53, No. 9. P. 3408–3423. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2328-3>.
29. Kumar A., Kaur A., Tomer V., Rasane P., Gupta K. Development of nutricereals and milk-based beverage: Process optimization and validation of improved nutritional properties. *J. Food Process Eng.* 2020. Vol. 43. 13025. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.13025>.
30. Lee P. Y., Leong S. Y., Oey I. The role of protein blends in plant-based milk alternative: A review through the consumer lens. *Trends Food Sci. Technol.* 2024. Vol. 143. 104268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104268>.
31. Lima R. G. H., Mercês Z. d. C. d., Souza A. K. F. d., Oliveira V. R. d. Current Scenario and New Approaches for the Chemical, Technological, and Sensory Qualities of Plant-Based Milk and Fermented Milk Substitutes. *Beverages*. 2026. Vol. 12 (1). 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/beverages12010006>.

32. Peters O. O., Afolabi M. O., Makinde F. M. Chemical, physico-chemical and sensory properties of yoghurt and yoghurt simulates produced from the blends of cow milk and coconut milk. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1219, No. 1. 012020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1219/1/012020>.
33. Padma M., Jagannadarao P. V. K., Edukondalu L., Ravibabu G., Aparna K. Physico-Chemical Analysis of Milk Prepared from Broken Rice. Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci. 2018. Vol. 7, No. 2. P. 426–428. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.702.054>.
34. Khamzaeva N., Kunz C., Schamann A., Pferdmenges L., Briviba K. Bioaccessibility and digestibility of proteins in plant-based drinks and cow's milk: antioxidant potential of the bioaccessible fraction. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2024. Vol. 72. P. 2300–2308. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c07221>.
35. Plamada D., Teleky B.-E., Nemes S. A., Mitrea L., Szabo K., Călinoiu L.-F., Pascuta M. S., Varvara R.-A., Ciont C., Martău G. A., Simon E., Barta G., Dulf F. V., Vodnar D. C., Nătescu M. Plant-Based Dairy Alternatives—A Future Direction to the Milky Way. Foods. 2023. Vol. 12 (9). 1883. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12091883>.
36. Xie A., Dong Y., Liu Z., Li Z., Shao J., Li M., Yue X. A Review of Plant-Based Drinks Addressing Nutrients, Flavor, and Processing Technologies. Foods. 2023. Vol. 12 (21). 3952. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12213952>.
37. Tangyu M., Muller J., Bolten C. J. [et al.]. Fermentation of plant-based milk alternatives for improved flavour and nutritional value. Applied Microbiology and Biotechnology. 2019. Vol. 103. P. 9263–9275. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10175-9>.
38. Bocker R., Silva E. K. Innovative technologies for manufacturing plant-based non-dairy alternative milk and their impact on nutritional, sensory and safety aspects. Future Foods. 2022. Vol. 5. 100098. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100098>.

39. Wuyts S., Van Beeck W., Allonsius C. N., van den Broek M. F. L., Lebeer S. Applications of plant-based fermented foods and their microbes. *Current Opinion in Biotechnology*. 2020. Vol. 61. P. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.09.023>.
40. Pua A., Tang V. C. Y., Goh R. M. V., Sun J., Lassabliere B., Liu S. Q. Ingredients, processing, and fermentation: addressing the organoleptic boundaries of plant-based dairy analogues. *Foods*. 2022. Vol. 11 (6). 875. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11060875>.
41. Ferawati F., Hefni M., Östbring K., Witthöft C. The application of pulse flours in the development of plant-based cheese analogues: proximate composition, color, and texture properties. *Foods*. 2021. Vol. 10. 2208. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10092208>.
42. Zheng B., Zhou H., McClements D. J. Nutraceutical-fortified plantbased milk analogs: bioaccessibility of curcumin-loaded almond, cashew, coconut, and oat milks. *LWT - Food Sci. Technol.* 2021. Vol. 147. 111517. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111517>.
43. Guo X., McClements D. J., Chen J., He X., Liu W., Dai T. [et al.]. The nutritional and physicochemical properties of whole corn slurry prepared by a novel industry-scale microfluidizer system. *LWT - Food Science and Technology*. 2021. Vol. 144. 111096. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111096>.
44. Silva A. R. A., Silva M. M. N., Ribeiro B. D. Review: health issues and technological aspects of plant-based alternative milk. *Food Research International*. 2020. Vol. 131. 108972. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108972>.
45. Луговський О. Ф., Шульга А. В., Берник І. М., Гришко І. А., Мовчанюк А. В., Зілінський А. І. Ультразвукові технологічні процеси. Розпилення та екстрагування : монографія. Вінниця : Видавець ФОП Кушнір Ю. В., 2022. 288 с.
46. Patra T., Rinnan Å., Olsen K. The physical stability of plant-based drinks and the analysis methods thereof. *Food Hydrocolloids*. 2021. Vol. 118. 106770. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106770>.

47. Pérez-Rodríguez M. L., Serrano-Carretero A., García-Herrera P., Cámara-Hurtado M., Sánchez-Mata M. C. Plant-based beverages as milk alternatives? Nutritional and functional approach through food labelling. *Food Research International*. 2023. Vol. 173, Part 1. 113244. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113244>.
48. Ramsing R., Santo R., Kim B. F. [et al.]. Dairy and Plant-Based Milks: Implications for Nutrition and Planetary Health. *Curr. Envir. Health Rpt.* 2023. Vol. 10. P. 291–302. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40572-023-00400-z>.
49. Liu X., Le Bourvellec C., Yu J., Zhao L., Wang K., Tao Y. [et al.]. Trends and challenges on fruit and vegetable processing: insights into sustainable, traceable, precise, healthy, intelligent, personalized and local innovative food products. *Trends in Food Science & Technology*. 2022. Vol. 125. P. 12–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.016>.
50. McClements D. J. *Food Emulsions: Principles, Practices, and Techniques*. Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2015. 715 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b18868>.
51. Gibbs J. W. *Collected Papers of J. Willard Gibbs: Thermodynamics*. New York, USA : Dover Publications, 1961.
52. Mendoza Y., Rahn-Chique K., García-Valera N., Cruz-Barrios E., Rojas C., Urbina-Villalba G. On the physical significance of the adjusting parameters in the evaluation of the flocculation rate of an oil-in-water nanoemulsion. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2015. Vol. 36, Iss. 2. P. 260–267.
53. McClements D. J., Rao J. Food-Grade Nanoemulsions: Formulation, Fabrication, Properties, Performance, Biological Fate, and Potential Toxicity. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2011. Vol. 51, No. 4. P. 285–330. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.559558>.
54. McClements D. J., Newman E., McClements I. F. Plant-based Milks: A Review of the Science Underpinning Their Design, Fabrication, and Performance. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2019. Vol. 18. P. 2047–2067.

55. Emulsion Formation and Stability / ed. by Tharwat Tadros. Weinheim : Wiley-VCH, 2013. 272 p.
56. Food Colloids: Interactions, Microstructure and Processing / ed. by Eric Dickinson. Cambridge : Royal Society of Chemistry, 2005. 497 p.
57. McClements D. J. Protein-stabilized emulsions. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2004. Vol. 9, Iss. 5. P. 305–313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2004.09.003>.
58. McClements D. J. Development of Next-Generation Nutritionally Fortified Plant-Based Milk Substitutes: Structural Design Principles. *Foods*. 2020. Vol. 9 (4). 421. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9040421>.
59. Ravera F., Dziza K., Santini E., Cristofolini L., Liggieri L. Emulsification and emulsion stability: The role of the interfacial properties. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021. Vol. 288. 102344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102344>.
60. Tian Y., Zhou J., He C., He L., Li X., Sui H. The Formation, Stabilization and Separation of Oil–Water Emulsions: A Review. *Processes*. 2022. Vol. 10 (4). 738. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10040738>.
61. Li W., Jiao B., Li S., Faisal S., Shi A., Fu W., Chen Y., Wang Q. Recent Advances on Pickering Emulsions Stabilized by Diverse Edible Particles: Stability Mechanism and Applications. *Front. Nutr.* 2022. Vol. 9. 864943. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.864943>.
62. Yang H., Hua C. C., Huang P. H. Effect of Xanthan, Guar, and Carrageenan Gums on the Physicochemical Properties of Hypoallergenic Pea Protein-Based Dysphagia-Friendly Matrices. *Foods*. 2026. Vol. 15 (2). 284. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods15020284>.
63. Hossain K. M. Z., Deeming L., Edler K. J. Recent progress in pickering emulsions stabilised by bioderived particles. *RSC Advances*. 2021. Vol. 11, No. 61. P. 39027–39044. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1RA08086E>.

64. Li N., Wang T., Yang X., Qu J., Wang N., Wang L., Yu D., Han C. Effect of high-intensity ultrasonic treatment on the emulsion of hemp seed oil stabilized with hemp seed protein. *Ultrason Sonochem.* 2022. Vol. 86. 106021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106021>.
65. Karabulut G., Kahraman O., Pandalaneni K. [et al.]. A comprehensive review on hempseed protein: Production, functional and nutritional properties, novel modification methods, applications, and limitations. *International Journal of Biological Macromolecules.* 2023. Vol. 253, Part 7. 127240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127240>.
66. Jin Y., Adhikari A. Recent Developments and Applications of Food-Based Emulsifiers from Plant and Animal Sources. *Colloids and Interfaces.* 2025. Vol. 9, Iss. 5. 61. DOI: <https://doi.org/10.3390/colloids9050061>.
67. Sarkar A., Dickinson E. Sustainable food-grade Pickering emulsions stabilized by plant-based particles. *Current Opinion in Colloid & Interface Science.* 2020. Vol. 49. P. 69–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.04.004>.
68. Wang Z., Li J., Peng C., Li B., Shen Q., Chen Y. Physicochemical Quantitative Analysis of the Oil-Water Interface as Affected by the Mutual Interactions between Pea Protein Isolate and Mono- and Diglycerides. *Foods.* 2024. Vol. 13 (1). 176. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13010176>.
69. Loveday S. M. Food Proteins: Technological, Nutritional, and Sustainability Attributes of Traditional and Emerging Proteins. *Annual Review of Food Science and Technology.* 2019. Vol. 10. P. 311–339. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-food-032818-121128>.
70. Lopez C., Weber M., Rabesona H., Pérez J., Artzner F., Bizien T. Emulsions stabilized by pea protein-rich ingredients as an alternative to dairy proteins for food sustainability: Unveiling the key role of pea endogenous lipids in the surface-induced crystallization of milk fat. *Curr. Res. Food Sci.* 2024. Vol. 9. 100921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100921>.

71. Avramenko N. A., Low N. H., Nickerson M. T. The effects of limited enzymatic hydrolysis on the physicochemical and emulsifying properties of a lentil protein isolate. *Food Research International*. 2013. Vol. 51, Iss. 1. P. 162–169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.11.020>.
72. Ghribi A. M., Gafsi I. M., Sila A. [et al.]. Effects of enzymatic hydrolysis on conformational and functional properties of chickpea protein isolate. *Food Chemistry*. 2015. Vol. 187. P. 322–330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.109>.
73. Xiang H., Sun-waterhouse D., Cui C. [et al.]. Modification of soy protein isolate by glutaminase for nanocomplexation with curcumin. *Food Chemistry*. 2018. Vol. 268. P. 504–512. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.059>.
74. Peng W., Kong X., Chen Y., Zhang C., Yang Y., Hua Y. Effects of heat treatment on the emulsifying properties of pea proteins. *Food Hydrocolloids*. 2016. Vol. 52. P. 301–310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.06.025>.
75. Mata S., Maté J. I., Angós I. Combined Effects of Carrageenan and Konjac Gums on the Physicochemical Properties of a Plant-Based Smoked Salmon Analog. *Foods*. 2025. Vol. 14 (21). 3793. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14213793>.
76. Xu Y., Wang S., Xin L., Zhang L., Liu H. Interfacial mechanisms, environmental influences, and applications of polysaccharide-based emulsions: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.139420>.
77. Li M., Sun Y., McClements D. J., Yao X., Ma C., Liu X., Liu F. Interfacial engineering approaches to improve emulsion performance: Properties of oil droplets coated by mixed, multilayer, or conjugated lactoferrin-hyaluronic acid interfaces. *Food Hydrocolloids*. 2022. Vol. 133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107938>.
78. Sagis L. M. C., Yang J. Protein-stabilized interfaces in multiphase food: comparing structure-function relations of plant-based and animal-based proteins.

Current Opinion in Food Science. 2022. Vol. 43. P. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.11.003>.

79. Albert C., Beladjine M., Tsapis N. [et al.]. Pickering emulsions: Preparation processes, key parameters governing their properties and potential for pharmaceutical applications. *Journal of Controlled Release*. 2019. Vol. 309. P. 302–332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.07.003>.

80. Calabrese V., Courtenay J. C., Edler K. J., Scott J. L. Pickering emulsions stabilized by naturally derived or biodegradable particles. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2018. Vol. 12. P. 83–90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.07.002>.

81. Yang Y., Fang Z., Chen X. [et al.]. An Overview of Pickering Emulsions: Solid-Particle Materials, Classification, Morphology, and Applications. *Frontiers in Pharmacology*. 2017. Vol. 8. 287. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2017.00287>.

82. Lagaly G., Reese M., Abend S. Smectites as colloidal stabilizers of emulsions: I. Preparation and properties of emulsions with smectites and nonionic surfactants. *Applied Clay Science*. 1999. Vol. 14, Iss. 1–3. P. 83–103. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(98\)00051-9](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(98)00051-9).

83. Cai X., Li C., Tang Q. [et al.]. Assembling kaolinite nanotube at water/oil interface for enhancing Pickering emulsion stability. *Applied Clay Science*. 2019. Vol. 172. P. 115–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.02.021>.

84. Shahrousvand M., Ahmadi Tabar F., Shahrousvand E., Babaei A., Hasani-Sadrabadi M. M., Mir Mohamad Sadeghi G., Jafari H., Salimi A. High aspect ratio phospho-calcified rock candy-like cellulose nanowhiskers of wastepaper applicable in osteogenic differentiation of hMSCs. *Carbohydrate Polymers*. 2017. Vol. 175. P. 293–302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.001>.

85. Linke C., Drusch S. Pickering emulsions in foods – opportunities and limitations. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018. Vol. 58, Iss. 12. P. 1971–1985. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1290578>.

86. Zhou L., Zhang W., Wang J. [et al.]. Comparison of oil-in-water emulsions prepared by ultrasound, high-pressure homogenization and high-speed homogenization. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. Vol. 82. 105885. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105885>.

87. Sokolov Yu. V. Nanoemulsion formation by low-energy methods: a review. *News of Pharmacy*. 2014. № 3 (79). P. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.24959/nphj.14.1981>.

88. Espitia P. J. P., Fuenmayor C. A., Otoni C. G. Nanoemulsions: Synthesis, Characterization, and Application in Bio-Based Active Food Packaging. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2019. Vol. 18 (1). P. 264–285. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12405>.

89. Liu Q., Huang H., Chen H., Lin J., Wang Q. Food-Grade Nanoemulsions: Preparation, Stability and Application in Encapsulation of Bioactive Compounds. *Molecules*. 2019. Vol. 24 (23). 4242. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24234242>.

90. Håkansson A., Rayner M. General Principles of Nanoemulsion Formation by High-Energy Mechanical Methods. *Nanoemulsions: Formulation, Applications, and Characterization* / ed. S. Jafari, D. J. McClements. Amsterdam : Elsevier, 2018. P. 103–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811838-2.00004-7>.

91. Gazolu-Rusanova D., Lesov I., Tcholakova S. [et al.]. Food grade nanoemulsions preparation by rotor-stator homogenization. *Food Hydrocolloids*. 2020. Vol. 102. 105579. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105579>.

92. Juttulapa M., Piriyaprasarth S., Takeuchi H. [et al.]. Effect of high-pressure homogenization on stability of emulsions containing zein and pectin. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2017. Vol. 12, Iss. 1. P. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2016.09.004>.

93. Paquin P. Technological properties of high pressure homogenizers: the effect of fat globules, milk proteins, and polysaccharides. *International Dairy*

Journal. 1999. Vol. 9, Iss. 3–6. P. 329–335. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(99\)00083-7](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(99)00083-7).

94. Jiang S., Chen H., Zhang S. [et al.]. Evaluating the effects of ultrasonic and high-pressure homogenization on the flavor profile of Wuliang Mountain black-boned chicken soup. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2026. Vol. 128. 107810. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2026.107810>.

95. Semenoglou I., Katsouli M., Giannakourou M. [et al.]. Effect of High-Pressure Homogenization and Wall Material Composition on the Encapsulation of Polyunsaturated Fatty Acids from Fish Processing. *Molecules*. 2025. Vol. 30, Iss. 7. 1434. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules30071434>.

96. Mesa J., Hinestroza-Córdoba L. I., Barrera C., Seguí L., Betoret E., Betoret N. High Homogenization Pressures to Improve Food Quality, Functionality and Sustainability. *Molecules*. 2020. Vol. 25 (14). 3305. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25143305>.

97. Flourey J., Desrumaux A., Lardières J. Effect of high-pressure homogenization on droplet size distributions and rheological properties of model oil-in-water emulsions. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2000. Vol. 1, Iss. 2. P. 127–134. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(00\)00012-6](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(00)00012-6).

98. Calligaris S., Plazzotta S., Bot F. [et al.]. Nanoemulsion preparation by combining high pressure homogenization and high power ultrasound at low energy densities. *Food Research International*. 2016. Vol. 83. P. 25–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.01.033>.

99. Kumar P., Sharma N., Ranjan R., Kumar S., Bhat Z. F., Jeong D. K. Perspective of membrane technology in dairy industry: a review. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 2013. Vol. 26, No. 9. P. 1347–1358. DOI: <https://doi.org/10.5713/ajas.2013.13082>.

100. Ribeiro H., Janssen J., Kobayashi I. [et al.]. Application of membrane and microchannel emulsification in the food industry. 16th IUFoST – World Congress of Food Science and Technology. Brazil, Foz do Iguaçu, 5–9 August 2012. 2012.

101. Giorno L., De Luca G., Figoli A., Piacentini E., Drioli E. Membrane Emulsification: Principles and Applications. Encyclopedia of Membrane Science and Technology / ed. by E. M. V. Hoek, V. V. Tarabara. Wiley, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118522318.emst085>.

102. Берник І. М. Інтенсифікація технологічних процесів обробки харчових середовищ. Вібрації в техніці та технологіях. 2013. № 3 (71). С. 109–115.

103. Luhovskyi O., Bernyk I., Gryshko I., Abdulina D., Zilinskyi A. Mobile equipment for ultrasonic cavitation inactivation of microorganisms in the liquid environment. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. Vol. 24. P. 272–281. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-59509-8_24.

104. Dubovkina I., Myronchuk A. Alternating impulses of pressure for new technologies in food production. Ukrainian Journal of Food Science. 2024. Vol. 12, Issue 1. P. 67–80. DOI: <https://doi.org/10.24263/2310-1008-2024-12-1-8>.

105. Voroshchuk V., Kravets O., Drozdziel P., Rudawska A. Specific aspects of hydrodynamic cavitation in water treatment. An overview. Economics and Environment. 2025. Vol. 95, No. 4. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.34659/eis.2025.95.4.1363>.

106. Dubovkina I. Influence of alternating impulses of pressure on sensory characteristics in fermentation technology. Ukrainian Journal of Food Science. 2022. Vol. 10, Issue 1. P. 43–53. DOI: <https://doi.org/10.24263/2310-1008-2022-10-1-6>.

107. Берник І. М., Драчук І. О. Теоретичні аспекти енергетичної складової ультразвукового диспергування емульсії. Здоров'я людини та нації. 2025. № 3 (4). С. 113–124. DOI: <https://doi.org/10.31548/humanhealth.4.2025.113>.

108. Dubovkina I. Modeling of alternating impulses of pressure for hydrodynamic conditions in mixing technology. Ukrainian Journal of Food Science. 2024. Vol. 12, Issue 2. P. 148–160. DOI: <https://doi.org/10.24263/2310-1008-2024-12-2-6>.

109. Voroshchuk V., Kravets O., Drozdziel P., Rudawska A. Specific aspects of hydrodynamic cavitation in water treatment. An overview. *Economics and Environment*. 2025. Vol. 95, No. 4. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.34659/eis.2025.95.4.1363>.

110. Nazarenko I., Bernyk I. Research of the processes of acoustic cavitation technology for processing dispersed media. *Dynamic processes in technological technical systems*. 2021. P. 94–109. DOI: <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-49-7.ch6>.

111. Luhovskyi O. F., Bernyk I. M. Ultrasonic cavitation apparatus for the implementation of environmentally safe technology for pectin extraction from secondary plant raw materials. *Visnyk NTUU "KPI". Seriia Mashynobuduvannia*. 2010. № 58. P. 82–86.

112. Bernyk I. M. An innovative approach to obtaining high-quality raw milk. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. 2019. № 3. P. 46–55. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2019-3-6>.

113. Luhovskyi O. F., Gryshko I. A., Zilinskyi A. I., Shulha A. V., Movchaniuk A. V., Bernyk I. M. Ultrasonic cavitation technologies: Disinfection and filtration. *Vinnytsia : Kushnir Yu. V.*, 2022.

114. O’Sullivan J., Murray B., Flynn C., Norton I. Comparison of batch and continuous ultrasonic emulsification processes. *Journal of Food Engineering*. 2015. Vol. 167, Part B. P. 114–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.001>.

115. Ganguly M., Debraj D., Mazumder N. [et al.]. 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*. 2024. Vol. 63, Iss. 23. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c00506>.

116. Chemat F., Grondin I., Costes P. [et al.]. High power ultrasound effects on lipid oxidation of refined sunflower oil. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2004. Vol. 11, Iss. 5. P. 281–285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2003.07.004>.

117. Carpenter J., George S., Saharan V. K. Ultrasonic cavitation assisted synthesis of multilayer emulsions as encapsulating and delivery systems for bioactive compounds. Encapsulation of Active Molecules and Their Delivery System / ed. S. H. Sonawane, B. A. Bhanvase, M. Sivakumar. Elsevier, 2020. P. 23–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819363-1.00003-X>.

118. Abdirym A., Wu X., Liu B. Comparison Between Ultrasound and High-Pressure Homogenization for Encapsulation of β -Carotene in CNF-Stabilized Pickering Emulsions. Polymers. 2025. Vol. 18 (1). 126. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym18010126>.

119. Gulzar S., Martín-Belloso O., Soliva-Fortuny R. Tailoring the Techno-Functional Properties of Fava Bean Protein Isolates: A Comparative Evaluation of Ultrasonication and Pulsed Electric Field Treatments. Foods. 2024. Vol. 13 (3). 376. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods13030376>.

120. Rege S., Momin S., Bhowmick D. Effect of ascorbic acid on the oxidative stability of water-in-oil emulsion in the presence of lipophilic antioxidants. International Journal of Food Properties. 2015. Vol. 18 (2). P. 259–265. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2012.675609>.

121. Горбаненко С. Скiфи i cannabis sativa 1. Health Technology Assessment. 2019. № 3–4. С. 24–29.

122. Мохер Ю. В., Жуплатова Л. М., Дудукова С. В. Промислові коноплі для сталого розвитку. Луб'яні та технічні культури. 2020. Вип. 8 (13). С. 66–75. DOI: [https://doi.org/10.48096/btc.2020.8\(13\).66-75](https://doi.org/10.48096/btc.2020.8(13).66-75).

123. Марченко Ж. Ю., Примаков О. А. Коноплярство України – сучасний етап розвитку та можливостей. Луб'яні та технічні культури. 2020. Вип. 8 (13). С. 76–88. DOI: [https://doi.org/10.48096/btc.2020.8\(13\).76-88](https://doi.org/10.48096/btc.2020.8(13).76-88).

124. Виробництво та переробка промислових конопель: сучасний стан, тренди, виклики / О. Николук, К. Сич ; за ред. М. Богонос. Житомир : Поліський національний університет, 2025. (Серія «Євроінтеграція 1.0»).

125. Salentijn E. M. J., Zhang Q., Amaducci S., Yang M., Trindade L. New developments in fiber hemp (*Cannabis sativa* L.) breeding. *Ind. Crops Prod.* 2015. Vol. 68. P. 32–41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.08.011>.

126. European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction (EMCDDA). *Cannabis Legislation in Europe: An Overview*. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2018.

127. Про внесення змін до деяких законів України щодо державного регулювання обігу рослин роду коноплі (*Cannabis*) для використання у навчальних цілях, освітній, науковій та науково-технічній діяльності, виробництва наркотичних засобів, психотропних речовин та лікарських засобів з метою розширення доступу пацієнтів до необхідного лікування : Закон України від 21.12.2023 р. № 3528-IX. Відомості Верховної Ради України. 2024. № 3. Ст. 18.

128. Про затвердження переліку наркотичних засобів, психотропних речовин і прекурсорів : Постанова Кабінету Міністрів України від 06.05.2000 р. № 770. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/770-2000-%D0%BF> (дата звернення: 23.01.2026).

129. Regulation (EU) No 1307/2013 of the European Parliament and of the Council of 17 December 2013 establishing rules for direct payments to farmers under support schemes... *Off. J. Eur. Union*. 2013. L 347/608.

130. Кабінет Міністрів виключив канабіс, його смолу, екстракти й настоянки з переліку особливо небезпечних речовин. Урядовий портал. 2026. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/kabinet-ministriv-vykliuchyv-kanabis-ioho-smolu-ekstrakty-i-nastoianky-z-pereliku-osoblyvo-nebezpechnykh-rechovyn> (дата звернення: 04.04.2026).

131. Зелена книга. Ринок технічних конопель / І. Грузінська, А. Смагіна, О. Перепелиця, Н. Герасименко, А. Попсуй ; ред. кол.: О. Дорогань, Р. Кобець. Київ : Офіс ефективного регулювання BRDO, 2020. 125 с.

132. Oseyko M., Sova N., Lutsenko M., Kalyna V. Chemical aspects of the composition of industrial hemp seed products. *Ukrainian Food Journal*. 2019. Vol. 8, Iss. 3. P. 544–559. DOI: <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2019-8-3-11>.

133. Sirangelo T. M., Diretto G., Fiore A., Felletti S., Chenet T., Catani M., Spadafora N. D. Nutrients and Bioactive Compounds from Cannabis sativa Seeds: A Review Focused on Omics-Based Investigations. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025. Vol. 26, No. 11. 5219. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms26115219>.

134. Farinon B., Molinari R., Costantini L., Merendino N. The Seed of Industrial Hemp (Cannabis sativa L.): Nutritional Quality and Potential Functionality for Human Health and Nutrition. *Nutrients*. 2020. Vol. 12 (7). 1935. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu12071935>.

135. Mikulec A., Kowalski S., Sabat R., Skoczylas Ł., Tabaszewska M., Wywrocka-Gurgul A. Hemp flour as a valuable component for enriching physicochemical and antioxidant properties of wheat bread. *LWT*. 2019. Vol. 102. P. 164–172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.028>.

136. Yalcin H., Konca Y., Durmuscelebi F. Effect of dietary supplementation of hemp seed (Cannabis sativa L.) on meat quality and egg fatty acid composition of Japanese quail (Coturnix coturnix japonica). *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 2018. Vol. 102. P. 131–141. DOI: <https://doi.org/10.1111/jpn.12670>.

137. Zając M., Świątek R. The effect of hemp seed and linseed addition on the quality of liver pâtés. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*. 2018. Vol. 17, Iss. 2. P. 169–176. DOI: <https://doi.org/10.17306/J.AFS.2018.0566>.

138. Коноплі : монографія / В. Г. Вировець [та ін.] ; за ред. М. Д. Мигалія, В. М. Кабанця. Суми : Видавничий будинок «Еллада», 2011. 384 с.

139. Rupasinghe H. P. V., Davis A., Kumar S. K., Murray B., Zheljaskov V. D. Industrial Hemp (Cannabis sativa subsp. sativa) as an Emerging Source for Value-Added Functional Food Ingredients and Nutraceuticals. *Molecules*. 2020. Vol. 25, No. 18. 4078. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25184078>.

140. Fordjour E., Manful C. F., Khalsamehta T. S. K., Armah A., Cheema M., Thomas R. Cannabis-infused foods: Phytonutrients, health, and safe product innovations. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2024. Vol. 23, No. 5. e70021. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70021>.
141. Kanabus J., Bryła M., Roszko M., Modrzewska M., Pierzgański A. Cannabinoids-Characteristics and Potential for Use in Food Production. *Molecules*. 2021. Vol. 26 (21). 6723. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26216723>.
142. Thakur A., Morya S., Kasankala L. M. Hemp Seed and Its Milk Analog: A Review on Specialties, Significance and Emerging Needs. *Journal of Natural Fibers*. 2025. Vol. 22, No. 1. 2474136. DOI: <https://doi.org/10.1080/15440478.2025.2474136>.
143. Wang X.-S., Tang C.-H., Yang X.-Q., Gao W.-R. Characterization, amino acid composition and in vitro digestibility of hemp (*Cannabis sativa* L.) proteins. *Food Chemistry*. 2008. Vol. 107, Iss. 1. P. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.06.064>.
144. Tang C.-H., Ten Z., Wang X.-S., Yang X.-Q. Physicochemical and Functional Properties of Hemp (*Cannabis sativa* L.) Protein Isolate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2006. Vol. 54. P. 8945–8950. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf0619176>.
145. Malomo S. A., He R., Aluko R. E. Structural and functional properties of hemp seed protein products. *Journal of Food Science*. 2014. Vol. 12 (7). DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12537>.
146. Pavlovic R., Panseri S., Giupponi L., Leoni V., Citti C., Cattaneo C., Cavaletto M., Giorgi A. Phytochemical and Ecological Analysis of Two Varieties of Hemp (*Cannabis sativa* L.) Grown in a Mountain Environment of Italian Alps. *Front. Plant Sci*. 2019. Vol. 10. 1265. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01265>.
147. Mattila P., Mäkinen S., Eurola M. [et al.]. Nutritional Value of Commercial Protein-Rich Plant Products. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2018. Vol. 73. P. 108–115. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11130-018-0660-7>.

148. Callaway J. C. Hempseed as a nutritional resource: An overview. *Euphytica*. 2004. Vol. 140. P. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-004-4811-6>.
149. Russo E. History of Cannabis and Its Preparations in Saga, Science, and Sobriquet. *Chemistry & Biodiversity*. 2007. Vol. 4. P. 1614–1648. DOI: <https://doi.org/10.1002/cbdv.200790144>.
150. House J. D., Neufeld J., Leson G. Evaluating the Quality of Protein from Hemp Seed (*Cannabis sativa* L.) Products Through the use of the Protein Digestibility-Corrected Amino Acid Score Method. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2010. Vol. 58, Iss. 22. P. 11801–11807. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf102636b>.
151. Frassinetti S., Moccia E., Caltavuturo L., Gabriele M., Longo V., Bellani L., Giorgi G., Giorgetti L. Nutraceutical potential of hemp (*Cannabis sativa* L.) seeds and sprouts. *Food Chemistry*. 2018. Vol. 262. P. 56–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.078>.
152. Zhou Y., Wang S., Lou H., Fan P. Chemical constituents of hemp (*Cannabis sativa* L.) seed with potential anti-neuroinflammatory activity. *Phytochemistry Letters*. 2018. Vol. 23. P. 57–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2017.11.013>.
153. Siano F., Moccia S., Picariello G., Russo G. L., Sorrentino G., Di Stasio M., La Cara F., Volpe M. G. Comparative Study of Chemical, Biochemical Characteristic and ATR-FTIR Analysis of Seeds, Oil and Flour of the Edible Fedora Cultivar Hemp (*Cannabis sativa* L.). *Molecules*. 2019. Vol. 24 (1). 83. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24010083>.
154. Simopoulos A. P. The Importance of the Omega-6/Omega-3 Fatty Acid Ratio in Cardiovascular Disease and Other Chronic Diseases. *Exp. Biol. Med.* 2008. Vol. 233. P. 674–688.
155. Girgih A. T., He R., Malomo S., Offengenden M., Wu J., Aluko R. E. Structural and functional characterization of hemp seed (*Cannabis sativa* L.) protein-

derived antioxidant and antihypertensive peptides. Journal of Functional Foods. 2014. Vol. 6. P. 384–394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2013.11.005>.

156. Mihoc M., Pop G., Alexa E. [et al.]. Nutritive quality of romanian hemp varieties (*Cannabis sativa* L.) with special focus on oil and metal contents of seeds. Chemistry Central Journal. 2012. Vol. 6. 122. DOI: <https://doi.org/10.1186/1752-153X-6-122>.

157. Lan Y., Zha F., Peckrul A., Hanson B., Johnson B., Rao J., Chen B. Genotype x Environmental Effects on Yielding Ability and Seed Chemical Composition of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) Varieties Grown in North Dakota, USA. J. Am. Oil Chem. Soc. 2019. Vol. 96. P. 1417–1425. DOI: <https://doi.org/10.1002/aocs.12291>.

158. ДСТУ 7695:2015. Насіння конопель. Технічні умови. [Чинний від 2016–08–01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 18 с.

159. ДСТУ ISO 6658:2005. Дослідження сенсорне. Методологія. Загальні настанови (ISO 6658:1985, IDT). [Чинний від 2006–07–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 26 с.

160. ДСТУ ISO 5492:2006. Дослідження сенсорне. Словник термінів (ISO 5492:1992, IDT). [Чинний від 2007–10–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 42 с.

161. ДСТУ 8840:2019. Насіння олійних культур. Методи визначення кольору та запаху. [Чинний від 2020–09–01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 12 с.

162. ДСТУ ISO 665:2008. Насіння олійних культур. Визначення вмісту вологи та летких речовин (ISO 665:2000, IDT). [Чинний від 2008–09–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 14 с.

163. ДСТУ ISO 2171:2009. Зернові, бобові та продукти їх помелу. Визначення загальної золи методом озолювання (ISO 2171:2007, IDT). [Чинний від 2011–01–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 16 с.

164. ДСТУ ISO 5983-1:2014. Корм для тварин. Визначення вмісту азоту та обчислення вмісту сирого протеїну. Частина 1. Метод К'ельдаля (ISO 5983-1:2005, IDT). [Чинний від 2015–07–01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2014. 18 с.

165. Harrington E. C. Jr. The Desirability Function. Industrial Quality Control. 1965. April. P. 494–498.

166. ДСТУ ISO 659:2007. Насіння олійне. Визначення вмісту олії (контрольний метод) (ISO 659:1998, IDT). [Чинний від 2009–01–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 18 с.

167. ДСТУ 8839:2019. Насіння олійних культур. Методи визначення кислотного числа олії. [Чинний від 2020–09–01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 12 с.

168. ДСТУ EN ISO 6865:2022. Корми для тварин. Визначення вмісту сирогої клітковини. Метод із проміжною фільтрацією (EN ISO 6865:2000, IDT; ISO 6865:2000, IDT). [Чинний від 2023–12–31]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 16 с.

169. ДСТУ ISO 658:2006. Насіння олійних культур. Метод визначення вмісту домішок (ISO 658:2002, IDT). [Чинний від 2008–01–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 14 с.

170. ДСТУ ISO 6731:2007. Молоко, вершки та згущене молоко. Визначення масової частки сухих речовин (контрольний метод) (ISO 6731:1989, IDT). [Чинний від 2009–01–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 12 с.

171. ДСТУ EN ISO 1211:2022. Молоко. Визначення вмісту жиру. Гравіметричний метод (еталонний метод) (EN ISO 1211:2010, IDT; ISO 1211:2010, IDT). [Чинний від 2023–12–31]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 18 с.

172. ДСТУ EN ISO 8968-1:2022. Молоко та молочні продукти. Визначення вмісту азоту. Частина 1. Принцип К'ельдаля та розрахунок сирого протеїну (EN ISO 8968-1:2014, IDT; ISO 8968-1:2014, IDT). [Чинний від 2023–12–31]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 22 с.

173. ДСТУ EN ISO 3960:2019. Жири тваринні і рослинні та олії. Визначення пероксидного числа. Йодометричне (візуальне) визначення за кінцевою точкою (EN ISO 3960:2017, IDT; ISO 3960:2017, IDT). [Чинний від 2019–09–01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 16 с.

174. ДСТУ EN ISO 6885:2019. Жири тваринні і рослинні та олії. Визначення анізидинового числа (EN ISO 6885:2016, IDT; ISO 6885:2016, IDT). [Чинний від 2019–09–01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 14 с.

175. ДСТУ ISO 6564:2005. Дослідження сенсорне. Методологія. Методи створювання спектра флейвору (ISO 6564:1985, IDT). [Чинний від 2006–10–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 16 с.

176. Моделювання та оптимізація об'єктів та систем управління : навч. посіб. / уклад.: Д. М. Складанний, Ю. А. Запорожець, С. Л. Мердух, С. В. Плашихін. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 99 с.

177. Березюк О. В. Планування багатофакторного експерименту для дослідження вібраційного гідроприводу ущільнення твердих побутових відходів. Вібрації в техніці та технологіях. 2009. № 3 (55). С. 92–97.

178. Bereziuk O., Petrov O., Vishtak I. The Impact of the Parameters of the Briquetting Process Using a Hydraulic Press on the Density Briquettes of Plant Waste. Advances in Design, Simulation and Manufacturing VIII. DSMIE 2025. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2025. P. 83–97. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-95218-0_8.

179. Основи наукових досліджень і теорія експерименту : навч. посіб. / укл.: Ю. Б. Капаціла, П. О. Марущак, В. Б. Савків, О. П. Шовкун. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2023. 186 с.

180. Сусліков Л. М., Студеняк І. П. Метрологія та вимірювання : навч. посіб. Ужгород : Видавництво УжНУ, 2014. 292 с.

181. Берник І., Драчук І. Фізична модель формування стабільної харчової матриці в конопляній емульсії за дії ультразвукової кавітації. Здоров'я людини та нації. 2026. Т. 4, № 1. С. 139–153. DOI: <https://doi.org/10.31548/humanhealth.1.2026.139>.

182. Методи математичної фізики / С. С. Піх, О. М. Попель, А. А. Ровенчак, І. І. Тальянський. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2011. 404 с.

183. Берник І. М., Назаренко І. І., Луговський О. Ф. Дослідження та визначення акустичних параметрів руху кавітаційної бульбашки в рідинному середовищі за дискретною та континуальною моделями. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2022. Vol. 6, № 2. Р. 195–202. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.2.269921>.

184. 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, № 3. Р. 351–358. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250180>.

185. Драчук І. О. Дослідження впливу гідромодуля на нутрієнтний склад та кваліметричну оцінку сенсорних властивостей конопляного напою. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2026. № 2 (2).

186. Берник І. М., Драчук І. О. Моделювання впливу режимів ультразвукової кавітації на якість жирової фази у технології рослинного напою з насіння конопель. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2026. № 1 (120). С. 154–163. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2026-1-17>.

ДОДАТКИ

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Берник І. М., Драчук І. О. Оцінка та аналіз методів отримання рослинного аналога молока. Здоров'я людини та нації. 2025. Т. 3. № 3. С. 137–148. *(Берник І. М. проведено загальне наукове керівництво, вибір критеріїв оцінки ефективності існуючих технологій. Драчук І. О. проведено аналіз літературних джерел щодо світового досвіду виробництва рослинних аналогів молока, оцінки особливостей техніко-технологічних рішень).*

2. Берник І. М., Драчук І. О. Теоретичні аспекти енергетичної складової ультразвукового диспергування емульсій. Здоров'я людини та нації. 2025. Т. 3. № 4. С. 113–124. *(Берник І. М. здійснено теоретичне обґрунтування характеристик ультразвукового поля. Драчук І. О. проведено моделювання розподілу акустичного тиску та розрахунків зон максимальної інтенсивності кавітації).*

3. Берник І. М., Драчук І. О. Фізична модель формування стабільної харчової матриці конопляної емульсії за ультразвукового кавітаційного впливу. Здоров'я людини та нації. 2026. Т. 4. № 1. С. 139–153. *(Берник І. М. пропозиція наукової ідеї та мети дослідження, визначення основних напрямів роботи. Драчук І. О. розробка теоретичних положень щодо механізму механохімічної активації білка едестину, обґрунтування морфологічної трансформації компонентів під дією ультразвукової кавітаційної обробки).*

4. Берник І. М., Драчук І. О. Моделювання впливу режимів ультразвукової кавітації на якість жирової фази у технології рослинного напою з насіння конопель. Вібрації в техніці та технологіях. 2026. № 1 (120). С. 154–163. *(Берник І. М. здійснено обґрунтування параметрів та методології досліджень. Драчук І. О. проведено експериментальні дослідження та обробку отриманих даних відповідно до методики).*

5. **Драчук І. О.** Дослідження впливу гідромодуля на нутрієнтний склад та кваліметричну оцінку сенсорних властивостей конопляного напою. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 2026. Вип. 2. Ч. 2. С. 49-56.

Тези наукових доповідей

6. Берник І. М., **Драчук І. О.** Енергоефективні ультразвукові кавітаційні технології обробки технологічних середовищ. Енергоощадні машини і технології: VI Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 20–21 травня 2025 року: тези доповіді. Київ, 2025. С. 193–195. (*Берник І.М. визначено актуальність проведення досліджень. Драчук І.О. взято участь у виконанні досліджень, підготовлено матеріали до друку*).

7. **Драчук І. О.** Обґрунтування методики застосування ультразвукової кавітаційної технології для дослідження процесів диспергування емульсії. Інтеграційні та інноваційні напрямки розвитку харчової індустрії: IX Міжнародна науково-практична конференція, м. Черкаси, 18–19 листопада 2025 року: тези доповіді. Черкаси, 2025. С. 49–52.

8. **Драчук І.** Інноваційна технологія виробництва рослинного напою з ядра насіння сорту Глесія. Стратегії, інновації, проблеми підприємництва, торгівлі та маркетингу: II Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Ірпінь, 19 березня 2026 року: тези доповіді. Ірпінь, 2026. С. 153–155.

9. **Драчук І. О.** Моделювання седиментаційної стабільності конопляної емульсії за умов ультразвукової кавітаційної обробки. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: XIV Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 30 квітня – 1 травня 2026 року: тези доповіді. Київ, 2026. С. 272-273.

ПОГОДЖЕНО**Проректор з науково-педагогічної
роботи та цифрової трансформації**

 **Олена ГЛАЗУНОВА**
(підпис) (Ім'я та прізвище)

« 07 » 04 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ**Проректор з наукової роботи та
інноваційної діяльності**

 **Оксана ТОНХА**
(підпис) (Ім'я та прізвище)

« 02 » 04 2026 р.

АКТ

про впровадження результатів науково-дослідної роботи,
виконаної за темою «Удосконалення процесу ультразвукової кавітаційної
стабілізації рослинного напою з насіння конопель»
у навчальний процес кафедри технології м'ясних, рибних та морепродуктів
факультету харчових наук, нутриціології та управління якістю Національного
університету біоресурсів і природокористування України

Цим актом підтверджується, що отримані Драчуком Ігорем Олеговичем
результати наукової роботи з удосконалення технології та режимів
ультразвукової кавітаційної стабілізації дисперсних середовищ використані в
навчальному процесі підготовки фахівців ОС «Магістр» та PhD при
викладанні таких дисциплін:

- «Сучасні технології м'ясних, молочних та продуктів з гідробіонтів» -
при вивченні сучасних технологічних підходів та способів стабілізації
харчових емульсій типу «олія у воді», зокрема механізмів дії емульгаторів на
основі білків;

- «Інноваційні технології у харчовій промисловості» - під час вивчення
застосування ультразвукових кавітаційних технологій для стабілізації
складних рослинних емульсій, що забезпечує інтенсифікацію масообміну та
диспергування, зниження енерговитрат, а також дозволяє досягати природної
термодинамічної стійкості дисперсних систем без використання сторонніх
добавок.

В.о. декана факультету
харчових наук, нутриціології
та управління якістю
д.т.н., проф.

В.о. завідувача кафедри
технології м'ясних, рибних та
морепродуктів, к.т.н., доцент

 **Лариса БАЛЬ-ПРИЛИПКО**

 **Олександр САВЧЕНКО**

Погоджено
Проректор з наукової роботи та
інноваційної діяльності

Оксана ТОНХА
(підпис) (Ім'я та
прізвище)
«04» 03 2026 р.



Затверджую

Микола ВОЗНЮК
«04» 03 2026 р.



АКТ

про впровадження результатів науково-дослідної роботи
за темою «Удосконалення процесу ультразвукової кавітаційної стабілізації
рослинного напою з насіння конопель»,
виконаної в Національному університеті біоресурсів і природокористування
України

Даним актом стверджується, що були проведені промислові випробування способу та апробація раціональних режимів ультразвукової кавітаційної стабілізації жирової емульсії у технології виробництва рослинного напою з насіння конопель сорту Глесія. Зазначений спосіб та раціональні режими його реалізації були розроблені при виконанні наукових досліджень здобувача ступеня доктора філософії за спеціальністю 181 Харчові технології Драчука Ігоря Олеговича. Наукове консультування здійснювали професор кафедри технології м'ясних, рибних та морепродуктів Слободянюк Н. М. та професор кафедри процесів та обладнання переробки продукції АПК Берник І.М.

Отримані результати промислового випробування, у порівнянні з існуючими технологіями, підтверджують достатньо високу ефективність представленої наукової розробки.

Внаслідок впровадження наукової розробки здобувача було реалізовано процес стабілізації рослинного напою з насіння конопель сорту Глесія, який дозволяє використати внутрішні резерви сировини. Під дією ультразвукової кавітації відбувається інтенсивне диспергування жирової фази та денатураційна модифікація едестину, що дозволяє використовувати власні білки сировини як емульгатори.

Впроваджений спосіб дозволяє отримати рослинний напій, який відповідає сучасним вимогам якості та безпечності. Відмова від використання додаткових стабілізаторів на користь природних емульгуювальних властивостей сировини суттєво підвищує натуральність та екологічність кінцевого продукту. А підтверджені під час випробувань раціональні режими

процесу, зокрема потужність, питома енергія та температура забезпечують технологічний баланс між стабільністю дисперсної системи та якості жирової фази, а також відмінними сенсорними властивостями.

Акт не є підставою для проведення взаємних фінансових розрахунків.

Представники

НУБІП України

Начальник науково-дослідної частини

Володимир ОТЧЕНАШКО
«04» 03 2026 р.

В.о. декана факультету харчових наук,
нутриціології та управління якістю

Лариса БАЛЬ-ПРИЛИПКО
«03» 03 2026 р.

Ігор ДРАЧУК
(підпис) (Ім'я та прізвище)
«03» 03 2026 р.

Від підприємства



Директор ТОВ "Брусилівський
маслозавод"

Микола ВОЗНІЮК
(підпис)

«04» 03 2026 р.