УДК 664.1.049
https://doi.org/10.31548/humanhealth.2.2025.40

ФОРМУВАННЯ ЛАМЕЛЯРНОЇ СТРУКТУРИ ЕМУЛЬСІЙ НА ОСНОВІ ГІДРОЛІЗОВАНОГО ЛЕЦИТИНУ ТА СТЕАРАТУ САХАРОЗИ

Мар'яна Тарасівна Овчарук
аспірантка кафедри технології м'яса і м'ясних продуктів
https://orcid.org/0009-0000-4922-6324
e-mail: newkraftbeer@ukr.net
Національний університет харчових технологій
01033 м. Київ, вул. Володимирська, 68, Україна
Оксана Анатоліївна Топчій
кандидатка технічних наук, доцентка, доцентка кафедри технології м'яса і м'ясних продуктів
https://orcid.org/0000-0002-4832-2709
e-mail: oksanatopchiy@ukr.net
Національний університет харчових технологій
01033 м. Київ, вул. Володимирська, 68, Україна
Алла Богданівна Петрина
кандидатка технічних наук, доцентка, доцентка кафедри технології м'яса і м'ясних продуктів
https://orcid.org/0009-0007-5366-5742
e-mail: alabogd@ukr.net
Національний університет харчових технологій
01033 м. Київ, вул. Володимирська, 68, Україна

Анотація. Емульсійні технології відіграють ключову роль у сучасній харчовій індустрії як засіб текстурування та інкапсуляції активів. Ламелярні емульсії можуть використовуватися у харчовій промисловості як стабілізатори, текстуроутворювачі та носії біоактивних речовин. Основні напрямки – це функціональні продукти з контрольованим вивільненням вітамінів, антиоксидантів, омега-3 жирних кислот та пробіотиків. Водночас проблема підбору ефективних емульгуючих систем, зокрема на основі відомих поверхнево-активних речовин природного походження, залишається актуальною.

Для дослідження було використано моделі емульсій із різними комбінаціями емульгаторів. Вимірювали поверхневий натяг у системах, що містили 2% гідролізованого лецитину, 2% стеарату сахарози та їхню комбінацію. Також проведено оптичну мікроскопію для підтвердження формування ламелярних структур. Спостереження здійснювали одразу після охолодження емульсії до температури 22 ± 2 °C та через 24 години після приготування, щоб оцінити процес самовпорядкування.

Виявлено, що комбінація гідролізованого лецитину та стеарату сахарози демонструє виражену синергічну дію: спостерігається ефективніше зниження міжфазного натягу порівняно з використанням кожного емульгатора окремо. Оптимальне співвідношення компонентів становить 1,00 % гідролізованого лецитину та 0,75 % стеарату сахарози. Емульсія з 30 % жирової фази, створена на основі цієї системи, характеризується високою в'язкістю, пластичною текстурою, стабільністю та задовільними органолептичними властивостями. Мікроскопічні дослідження підтвердили наявність ламелярних структур, які утворюються в процесі охолодження емульсії.

Отримані результати свідчать про синергічну взаємодію між лецитином і стеаратом сахарози, що зумовлює формування термодинамічно стабільних ламелярних структур. Такі емульсії демонструють добру адгезію до поверхонь, що є важливим для застосування у

харчових продуктах — зокрема в намазках і кондитерських начинках. Завдяки термостабільності ці системи можуть бути використані в технологічних процесах із помірним нагріванням, таких як пастеризація чи інкапсуляція біоактивів без руйнування структурної організації.

Ключові слова: ламелярна харчова емульсія, сурфактант, косурфактант, синергетична суміш, поверхневий натяг, стабільність емульсії

UDC 664.1.049
https://doi.org/10.31548/humanhealth.2.2025.40

FORMATION OF THE LAMELLAR STRUCTURE OF EMULSIONS BASED ON HYDROLYZED LECITHIN AND STEARATE SUCROSE

Maryana Ovcharuk
Postgraduate student of the Department of Meat and Meat Products Technology
https://orcid.org/0009-0000-4922-6324
e-mail: newkraftbeer@ukr.net
National University of Food Technologies
01033, 68 Volodymyrska Str., Kyiv, Ukraine
Oksana Topchii
Ph.D. (Engineering)
https://orcid.org/0000-0002-4832-2709
e-mail: oksanatopchiy@ukr.net
National University of Food Technologies
01033, 68 Volodymyrska Str., Kyiv, Ukraine
Alla Petryna
Ph.D. (Engineering)
https://orcid.org/0009-0007-5366-5742
e-mail: alabogd@ukr.net
National University of Food Technologies
01033, 68 Volodymyrska Str., Kyiv, Ukraine

Abstract. Emulsion technologies play a key role in the modern food industry as a means of texturizing and encapsulating assets. Lamellar emulsions can be used in the food industry as stabilizers, texturizers and carriers of bioactive substances. The main directions are functional products with controlled release of vitamins, antioxidants, omega-3 fatty acids and probiotics. Today, the problem of finding active emulsifying systems, in particular based on known surfactants, remains relevant.

Model emulsions containing different combinations of emulsifiers were prepared and analyzed. Surface tension was measured in systems containing 2% hydrolyzed lecithin, 2% sucrose stearate, and their combination. Optical microscopy was employed to confirm the formation of lamellar structures. Observations were carried out immediately after cooling the emulsions to 22 ± 2 °C and after 24 hours of storage to evaluate self-assembly processes.

The combination of hydrolyzed lecithin and sucrose stearate exhibited pronounced synergistic behavior, resulting in more efficient interfacial tension reduction compared to each emulsifier used separately. The optimal emulsifier ratio was determined as 1.00% hydrolyzed lecithin and 0.75% sucrose stearate. The emulsion with a 30% fat phase prepared on this basis demonstrated high viscosity, plastic texture, stability, and satisfactory organoleptic properties. Microscopic analysis confirmed the presence of lamellar structures formed during the cooling process.

The results indicate a synergistic interaction between lecithin and sucrose stearate, leading to the formation of thermodynamically stable lamellar structures. Such emulsions exhibit strong

adhesion to surfaces, which is advantageous for applications in food systems such as spreads and confectionery fillings. Due to their thermal stability, these emulsions can also be used in processing operations involving moderate heating, such as pasteurization or encapsulation of bioactives, without structural degradation.

Keywords: lamellar food emulsion, surfactant, cosurfactant, synergistic mixture, surface tension, emulsion stability

ВСТУП. Емульсії як дисперсні системи, в яких одна рідка фаза (зазвичай жирової природи) диспергована у другій (водній) у вигляді краплин певного розміру, мають фундаментальне значення в харчовій промисловості. В харчовій промисловості емульсії широко застосовуються як носії жиророзчинних інгредієнтів, текстуроутворювачі й засоби контролю ротового відчуття. За останні два десятиліття зростає інтерес до емульсій не лише як технологічної матриці, але й як систем інкапсуляції, що підвищують стабільність і біодоступність функціональних компонентів (омега-3, вітаміни, антиоксиданти, пробіотики) (Xu et al., 2024).

Ламелярними (lamellar liquid crystals, LLC) називають емульсії або гібридні системи, у яких поверхнево активні молекули самовкладаються у паралельні двошари (ламели) у безперервній фазі або навколо краплин, що призводить до появи гель-подібної структурованої системи (Moraes et al., 2018). Такі емульсії здатні надавати йогуртам, соусам, морозиву чи кремам ніжну, стабільну структуру без додаткових жирів чи модифікованого крохмалю (Leser, 2017).

Ламелярні структури можуть забезпечувати повільне/контрольоване вивільнення активу та стати основою спеціальних продуктів харчування. Вони можуть інкапсулювати жиророзчинні вітаміни (A, D, E, K), каротиноїди, поліненасичені жирні кислоти (омега-3) і забезпечувати їх захист від окиснення та повільне вивільнення у травному тракті. Зокрема, перспективним є застосування LLC як носіїв пробіотиків, які дозволяють доставляти активи саме в кишківник (Bufalini and Campardelli, 2025).

В харчовій промисловості конкретні застосування емульсій включають соуси і майонези (покращення текстури, стабілізація жирової фази, доставка жиророзчинних вітамінів), молочні та рослинні напої/крімери (інкапсуляція жиророзчинних вітамінів, заміна жиру, поліпшення ротового відчуття), кондитерські наповнювачі й креми (контроль реології, термостійкість у випічці) та функціональні батончики чи енергетичні продукти (емульсійні прошарки для доставки омега-3 чи антиоксидантів).

Традиційний майонез – класичний приклад стабілізованої O/B-емульсії, де жирові краплини диспергованi у водній фазі; емульгування забезпечують фосфоліпіди яєчного жовтка та інші поверхнево-активні компоненти. Емульсійна структура визначає реологічні характеристики, сенсорні відчуття і стабільність до фазового розшарування під час зберігання (Taslikh et al., 2022).

Емульсійні гелі застосовують для відтворення жирової фази в продуктах-аналогах м’яса: тонкодисперсні жирові краплини у білково-полісахаридній матриці формують структуру, що під час термічної обробки демонструє подібну до жиру плавність і соковитість (Kothuri et al., 2025). Такий підхід дозволяє зменшити кількість твердих тваринних жирів, керувати випаровуванням води під час приготування і знижувати кулінарні втрати.

Наявні роботи (Uriho et al., 2024) демонструють, що емульсії на основі білкових оболонок можуть ефективно захищати як вітамінні, так і ліпофільні компоненти під час випічки; такі системи зберігають антиоксидантну активність і покращують утримання поліненасичених жирів у готовому продукті.

Серед поверхнево-активних речовин, що застосовуються у харчовій промисловості, особливе місце належить фосфоліпідам, зокрема лецитину E322 (Mortensen et al., 2017.). Стандартний лецитин є сумішшю фосфоліпідів, тоді як гідролізований лецитин утворює лізофосфоліпіди, що змінюють гідрофільно-ліпофільний баланс та можуть підвищувати

термостабільність емульсійних систем, сприяючи формуванню гідратованих ламелярних фаз (Rahim et al., 2025). У свою чергу, сахарозні ефіри – наприклад стеарати сахарози – є неіонними емульгаторами харчового призначення, які відзначаються варіабельністю HLB (гідрофільно-ліпофільного балансу) залежно від ступеня етерифікації та довжини жирного ланцюга (Cholakova and Tcholakova, 2024).

Використання синергетичних емульгуючих сумішей, тобто комбінацій двох або більше емульгаторів із різними структурно-функціональними властивостями, має низку суттєвих переваг порівняно з використанням моноемульгаторів. Такі суміші дозволяють створювати більш стабільні, пластичні та функціональні емульсійні системи, що особливо важливо у харчовій промисловості.

З точки зору регуляторики, лецитини та сахарозні ефіри широко дозволені як харчові добавки, проте у відкритих джерелах відсутня інформація про колоїдно-хімічні властивості їх сумішей та властивості виготовлених на їх основі емульсій.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ – дослідити формування та стабільність ламелярної емульсії, створеної на основі синергетичної суміші гідролізованого лецитину та стеарату сахарози, з’ясувати їх взаємодію в міжфазному шарі, вплив співвідношення емульгаторів на міжфазний натяг і структурно-текстурні властивості емульсії, а також виявити процеси самоукладання ламелярних структур під час охолодження системи.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ. Для одержання ламелярної структури в роботі використано суміш з основного емульгатора та косурфактанта. Обраний основним емульгатором гідролізований лецитин формує плоскі бішари, аналогічні біомембранам, що забезпечують контрольоване вивільнення активів та утворює стійкі гідратовані фази типу Lα при кімнатній температурі.

Гідролізований лецитин є сумішшю фосфоліпідів фосфатидилхоліну, фосфатидилетаноламіну та фосфатидилсерину, а також продуктів їх розщеплення, як показано на рисунку 1.

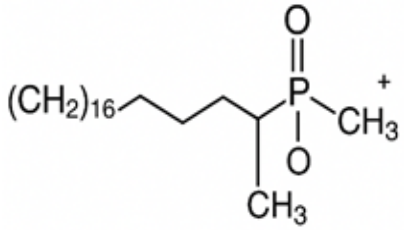

Рисунок 1. Структурна формула молекули лецитину (фрагмент)

Гідролізований лецитин краще розчиняється у воді (у порівнянні з нативним лецитином), що обумовлює його використання в харчовій промисловості в якості емульгатора. Традиційно норма внесення лецитину знаходиться на рівні 2,0–10,0 % і може бути знижена при використанні косурфактанта.

Косурфактант стеарат сахарози завдяки полігідроксильній частині сахарози формує водневі зв’язки з водною фазою, а стеариновий ланцюг – з ліпідною, що сприяє високій стабільності та пластичності ламелярного шару (Uchiyama et al. (2016). Його хімічна формула не має одного конкретного запису через те, що це полімер, де сахароза може бути естерифікована стеариновою кислотою по-різному. Структурна формула стеарату сахарози на рисунку 2 представлена в загальному вигляді і показує один з варіантів будови сполуки, утвореної з сахарози та стеаринової кислоти, де стеаринова кислота приєднується до сахарози через складноефірний зв'язок.

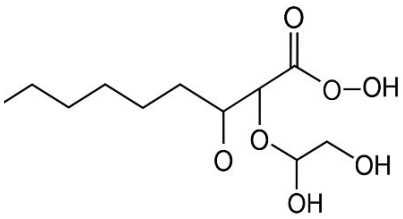

Рисунок 2. Структурна формула молекули стеарату сахарози (один з можливих варіантів)

Виготовлення емульсій проводили згідно наступного порядку:

1. Нагрівали водну і олійну фазу з емульгаторами до температури 65–70 °С.
2. Механічна обробка проводилась за повільного перемішування на швидкості 60 хв$^{-1}$.
3. Охолоджували до температури 22±2 °С зі швидкістю не більше 1 °С/хв.

Органолептичну оцінку зразків емульсій проводили за показниками зовнішнього вигляду, кольору та запаху. Визначення здійснювали в дегустаційній кімнаті за нейтрального освітлення (денне дифузне світло) при температурі 20–22 °С. Проби об’ємом близько 50 мл відбирали у прозорі скляні ємності. Колір оцінювали на білому фоні, запах – шляхом короткого вдиху з відстані 2–3 см від поверхні зразка. Оцінювання здійснювала комісія з восьми експертів. Результати фіксували за якісними ознаками «відповідає» / «не відповідає».

Визначення pH проводили потенціометричним методом за допомогою електронного pH-метра з комбінованим скляним електродом. Калібрування приладу виконували за двома або двома буферними розчинами з pH 4,01; 6,86 при температурі аналізу. Перед вимірюванням 50 мл г емульсії ретельно перемішували до однорідності. Електрод занурювали у пробу так, щоб активна частина була повністю покрита зразком, уникаючи утворення повітряних бульбашок. Відлік pH здійснювали після стабілізації показів (15–30 с). Кожен зразок аналізували тричі, результати подано як середнє арифметичне ± стандартне відхилення.

Колоїдну та термостабільність оцінювали відповідно до вимог ДСТУ 4560:2006 «Майонези. Правила приймання та методи випробування». Стійкість визначали як відсутність розшарування після впливу фізичного та термічного чинників, що моделюють умови руйнування емульсії. Для цього зразки емульсії об'ємом 10 мл піддавали термічному впливу / центрифугуванню, передбаченому методикою стандарту. Після охолодження проби візуально оцінювали на наявність ознак коалесценції, флокуляції чи виокремлення олійної фази. Емульсія вважалася стабільною за відсутності будь-яких проявів розшарування.

В’язкість емульсії визначали за допомогою ротаційного віскозиметра при температурі 20 ± 0,5 °С. Зразки попередньо витримували протягом 30 хв для стабілізації температури. Вимірювання проводили при різних швидкостях обертання шпинделя (10–100 об/хв), фіксуючи ефективну в’язкість при кожному значенні градієнта зсуву. Для кожного зразка виконували три повторні вимірювання, результати усереднювали та виражали у Паскаль-секундах (Па·с). Прилад калібрували стандартними в’язкісними еталонами перед початком кожної серії досліджень.

Визначення поверхневого натягу проводили шляхом зважування крапель рідини, які повільно відриваються від носика капіляра, що занурений у досліджувану рідину. Вага однієї краплі використовується для розрахунку коефіцієнта поверхневого натягу за відповідною формулою, що враховує вагу краплі, довжину зовнішнього кола капіляра та силу тяжіння, обчислюється коефіцієнт поверхневого натягу.

Мікроструктуру емульсії досліджували за допомогою монокулярного біологічного мікроскопа SIGETA UNITY 40×–400×. Для аналізу на предметне скло наносили невелику краплю емульсії (~10 мкл), накривали покривним скельцем і спостерігали під збільшенням 100–400×. Зразок попередньо розводили дистильованою водою 1:10 для уникнення скупчення краплин. Зображення фіксували цифровою камерою, після чого аналізували морфологію і розмірну дистрибуцію краплин за допомогою програмного забезпечення ImageJ. Для кожного

зразка досліджували не менше десяти полів зору, визначаючи середній діаметр, медіану та стандартне відхилення розміру частинок.

Усі вимірювання проводили не менше ніж у трьох повторностях ($n \geq 3$). Результати статистично обробляли методами описової статистики з використанням середнього арифметичного (M) та стандартного відхилення (SD). Для перевірки достовірності відмінностей між вибірками застосовували однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA) з подальшим тестом Тьюкі. Відмінності вважали статистично значущими при рівні $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБГОВОРЕННЯ. Для оцінки взаємного впливу двох емульгаторів на стабільність емульсії побудовано математичну модель повного факторного експерименту другого порядку ПФЕ 2^2. Математична модель залежності функції відгуку (стабільності емульсії Y) від концентрацій двох емульгаторів (x_1 і x_2) у вигляді полінома другого порядку має такий вигляд: $Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$ (рисунок 3).

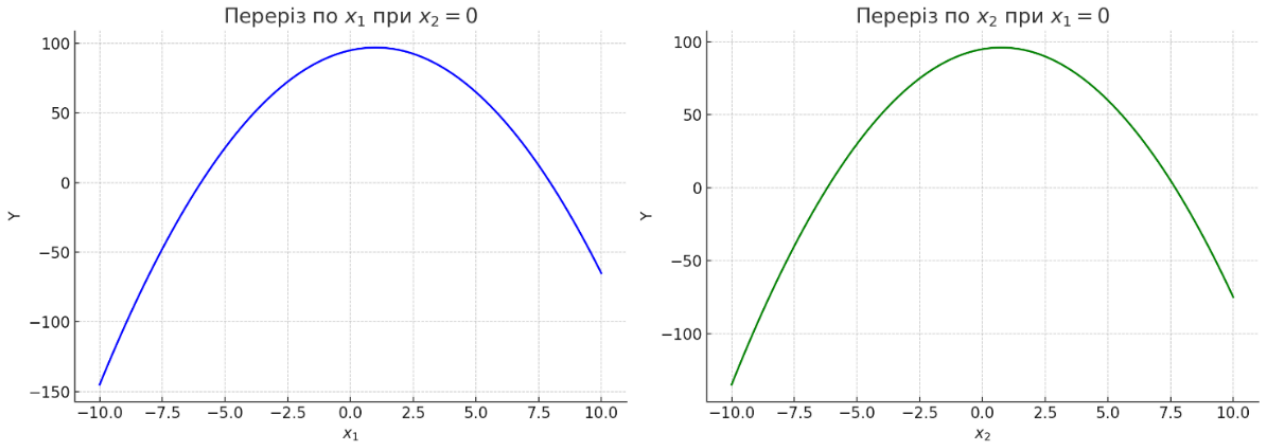

Рисунок 3. Залежність функції відгуку від змінних факторів
Джерело: розроблено автором

Позитивні значення b_1 і b_2 свідчать, що збільшення кожного з емульгаторів підвищує стабільність. Позитивний b_{12} означає, що їхня спільна дія синергетична – суміш стабілізує систему краще, ніж кожен емульгатор окремо. Одночасне збільшення обох концентрацій дає більше, ніж простий сумарний ефект лінійних членів. Практично це означає, що суміш емульгаторів може працювати краще, ніж кожен окремо.

За фіксованого значення x_2=0 (ліва панель) крива має виражену вгнуту форму, при цьому максимум спостерігається поблизу x_1=1, після чого значення *Y* поступово знижується. За фіксованого x_1=0 (права панель) також простежується вгнута парабола з максимумом приблизно при x_2=0,75, після чого відбувається спад. Отже, оптимальним співвідношенням досліджуваних емульгаторів є: гідролізований лецитин – 1,00 %, стеарат сахарози – 0,75 %.

Для перевірки одержаних значень було виготовлено емульсію з вмістом жирової фази 30%.

Емульсія представляє собою однорідну, кремоподібну масу світложовтого кольору без видимих домішок і повітряних бульбашок. Колоїдна стабільність та термостабільність виготовленої емульсії високі, отже система зберігає структурну цілісність при термічних обробках і під час зберігання. Оскільки емульсія без запаху, вона добре приймає ароматизатори, а жиророзчинні аромати та кольори будуть інкапсульовані й стабільні. В'язкість 38,5 Па·с відповідає густій, пластичній текстурі (аналог консистенції щільного крем-спреду або густого майонезу), що забезпечує хорошу формоутримуючу здатність і повільне текуче вивільнення активів.

Таблиця 1. Органолептичні і фізико-хімічні показники емульсії

Показник	Значення
Зовнішній вигляд	Однорідна кремоподібна маса без домішок і пухирців повітря
Колір	Світложовтий
Запах	Без запаху
pH	5,7
Колоїдна стабільність	Стабільна
Термостабільність	Стабільна
В'язкість, Па·с	38,5

Така емульсія може бути використана для виробництва соусів і заправок густої текстури, придатних для намазування, з жиророзчинними вітамінами або омега-3. Висока в'язкість і пластичність емульсії дають однорідну консистенцію в паштетах і крем-спредах та забезпечує захист активів від псування киснем повітря. Емульсія також може стати ідеальною основою для молочно-рослинних десертів кремоподібної текстури та пластичних кондитерських кремів і начинок.

Певні відмінності спостерігаються у порівнянні з дослідженням Kothuri et al., (2025), які вивчали емульсійні гелі як структуроутворювачі в *рослинних м'ясних аналогах*. Хоча обидва дослідження розглядають стабільність емульсій, ця робота фокусується на *ламелярних системах*, придатних для використання у спредах і кондитерських начинках, тоді як дослідження Kothuri орієнтоване на білкові матриці рослинного походження.

Великий інтерес становить вивчення впливу емульгаторів на зміну поверхневого натягу на межі поділу фаз емульсії, що визначає структуру та стабільність емульсійного харчового продукту. Тому наступні дослідження проводили на межі олія–вода, оскільки саме адсорбція поверхнево-активних речовин на цій межі відіграє ключову роль у стабілізації емульсійних систем. Для проведення експерименту готували серію емульсій, стабілізованих досліджуваними поверхнево-активними речовинами в їх мінімальній активній кількості, рекомендованій виробником. А саме: гідролізований лецитин 2% (рекомендовано 2–6%) і стеарат сахарози 2% (рекомендовано 2–10%). Варіювання концентрації емульгаторів дозволяло оцінити їхній вплив на міжфазний натяг та формування стабільної міжфазної плівки. На рисунку 4 наведені величини міжфазного натягу систем, що містять різні кількості гідролізованого лецитину та стеарату сахарози, а також їх синергетичної суміші 1:0,75 одразу після охолодження емульсії до температури оточуючого середовища та через 24 години після виходу на температуру 22±2 ºС.

На поданому графіку наведено значення міжфазного натягу на межі поділу фаз для систем, стабілізованих різними емульгаторами: гідролізованим лецитином, стеаратом сахарози та їхньою сумішшю. Як видно з результатів, одразу після виготовлення емульсії 2% гідролізований лецитин забезпечує зниження міжфазного натягу до приблизно 17 мН/м, тоді як 2% стеарат сахарози демонструє дещо вищий показник – близько 24 мН/м. Найнижче значення міжфазного натягу спостерігається для комбінованої системи, що містить 1% гідролізованого лецитину та 0,75% стеарату сахарози – приблизно 2 мН/м.

Окремі емульгатори знижують міжфазний натяг лише до певного рівня, але у комбінації їхні молекули можуть більш щільно адсорбуватись на межі поділу фаз. Це призводить до утворення більш щільного і стабільного міжфазного шару. Таким чином, поєднання двох емульгаторів в оптимальному співвідношенні сприяє значному зниженню міжфазного натягу на межі олія–вода, що вказує на синергічний ефект у процесі стабілізації емульсій. Отримані результати підтверджують доцільність використання змішаних систем поверхнево-активних речовин для підвищення стабільності емульсійних структур.

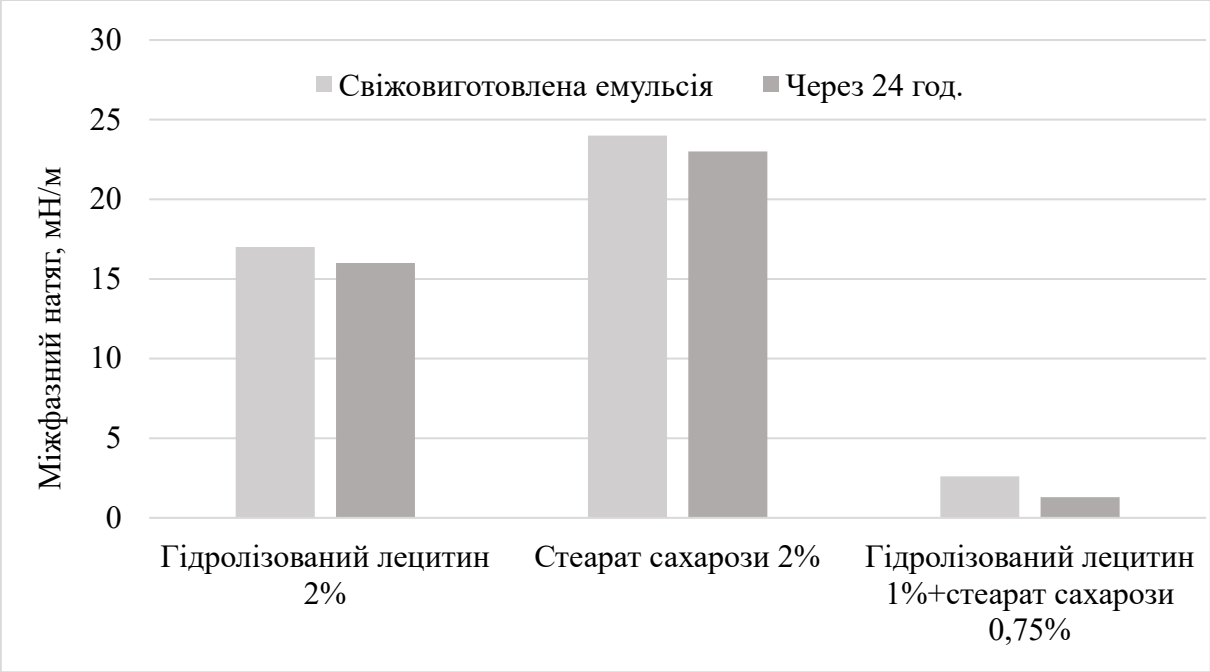

Рисунок 4. Значення поверхневого натягу сумішей емульгаторів
Джерело: розроблено автором

На поданому графіку наведено значення міжфазного натягу на межі поділу фаз для систем, стабілізованих різними емульгаторами: гідролізованим лецитином, стеаратом сахарози та їхньою сумішшю. Як видно з результатів, одразу після виготовлення емульсії 2% гідролізований лецитин забезпечує зниження міжфазного натягу до приблизно 17 мН/м, тоді як 2% стеарат сахарози демонструє дещо вищий показник – близько 24 мН/м. Найнижче значення міжфазного натягу спостерігається для комбінованої системи, що містить 1% гідролізованого лецитину та 0,75% стеарату сахарози – приблизно 2 мН/м.

Окремі емульгатори знижують міжфазний натяг лише до певного рівня, але у комбінації їхні молекули можуть більш щільно адсорбуватись на межі поділу фаз. Це призводить до утворення більш щільного і стабільного міжфазного шару. Таким чином, поєднання двох емульгаторів в оптимальному співвідношенні сприяє значному зниженню міжфазного натягу на межі олія–вода, що вказує на синергічний ефект у процесі стабілізації емульсій. Отримані результати підтверджують доцільність використання змішаних систем поверхнево-активних речовин для підвищення стабільності емульсійних структур.

Це узгоджується з оглядом Cholakova and Tcholakova (2024), які розглядали сахарозні естери як багатофункціональні емульгатори. Обидва дослідження відзначають синергічну взаємодію сахарозних ефірів з іншими амфіфільними сполуками, однак відмінністю цієї роботи є акцент на гідрофільно-ліпофільному балансі (HLB), що визначає здатність до утворення ламелярних структур у харчових емульсіях.

Мінімальний міжфазний натяг спостерігається після 24 годин витримування. Це вказує на високу термодинамічну стабільність системи та її потенційну придатність для створення ламелярних емульсій у харчовій промисловості.

Подібно до висновків Rahim et al., 2025, які досліджували ліпосомальні системи інкапсуляції з підвищеною стабільністю, результати цього дослідження також підтверджують високу стабільність емульсій під час зберігання та при помірному нагріванні. Водночас, на відміну від роботи (Rahim et al., 2025), у цій роботі основна увага приділяється *харчовим емульсійним системам*, а не наноліпосомам, характерним для фармацевтичних або косметичних застосувань.

Під час охолодження ламелярної емульсії відбувається низка фізико-хімічних процесів, які зумовлюють формування впорядкованої структури з високою стабільністю. На початковому етапі, коли температура системи поступово знижується після емульгування, зменшується кінетична енергія молекул як у водній, так і в жировій фазі. Це призводить до зниження рухливості молекул емульгаторів (наприклад, гідролізованого лецитину чи стеарату сахарози) і сприяє їхній саморганізації на межі поділу фаз.

Молекули амфіфільних емульгаторів, що мають як гідрофільні, так і гідрофобні ділянки, орієнтуються таким чином, щоб гідрофільні головки контактували з водною фазою, а гідрофобні хвости – із жировою. При зниженні температури ентропійний внесок зменшується, і система прагне до мінімізації вільної енергії. У результаті молекули емульгатора самоукладаються у впорядковані двошарові структури – ламели, які чергуються з тонкими прошарками води.

Цей процес супроводжується поступовим ущільненням міжфазного шару, формуванням кристалоподібних або рідкокристалічних структур. Внаслідок цього підвищується механічна міцність міжфазного бар'єра, зменшується швидкість коалесценції жирових крапель, а отже, зростає колоїдна і термічна стабільність емульсії.

Одержані дані добре корелюють з результатами інших дослідників. Tippetts M. and Martini S. (2009) на прикладі емульсії типу О/В, де ліпідна фаза являла собою суміш безводного молочного жиру та соєвої олії, а сироватковий білок використовувався як емульгатор виявили, що швидкість охолодження є одним з важливих факторів дестабілізації.

Anne-Laure Fameau et al., 2024, на прикладі емульсії з довголанцюгових жирних спиртів C16, C18 та їх суміші, поєднаних з поверхнево-активною речовиною цетилтриметиламонію хлоридом встановили, що швидкість охолодження має вирішальне значення для утворення мікроструктури та властивостей пластинчастої гелевої мережі.

Reiner et al., (2022) виявили, що охолодження з повільними та помірними швидкостями (0,1–50 К/хв$^{-1}$), як це спостерігається в типових резервуарах з перемішуванням, викликало самоформування крапель під час кристалізації і призводило до утворення пластинкоподібних частинок та волокон, форма яких помітно відрізнялась від сферичної. Навпаки, швидке охолодження, яке спостерігається в теплообмінниках, призводило до появи переважно сферичних форм.

Таким чином, типовий технологічний сценарій одержання ламелярної емульсії може бити описаний наступним чином:

1. Для початку формування ламелярної фази потрібне нагрівання до температури плавлення емульгатора (часто 60–75 °C).

2. Як вказано в роботі (Wu et al., 2023), на відміну від класичних емульсій О/В та В/О, надмірно високі зсувні зусилля на етапі гомогенізації можуть руйнувати ламелярну структуру. Використана нами швидкість 60 хв$^{-1}$ виявилась достатньою для утворення ламелярної структури через 24 години після завершення емульгування.

3. Синергетична суміш з 1% гідролізованого лецитину і 0,75% стеарату сахарози спочатку остаточно формує емульсію під час охолодження і дозрівання, коли відбувається перехід у ламелярний стан. При повільному охолодженні молекули емульгатора самоукладаються у ламелярні двошари, формуючи гелеву мережу, що підтверджено зображеннями поляризованої світлової мікроскопії/

На рисунку 5 представлені характерні об'єкти, які демонструють візерунок у формі «мальтійського хреста», що є результатом подвійного променезаломлення в сфероліті емульсії. Візерунок «мальтійського хреста» виникає саме під поляризаційним мікроскопом під час проходження світла крізь сфероліт тому, що структури всередині сфероліту орієнтовані радіально.

Аналогічні закономірності простежуються у дослідженні Taslikh et al., (2022), присвяченому мікроструктурі та реологічним властивостям майонезоподібних емульсій. У

обох випадках стабільність емульсій зумовлена формуванням впорядкованих міжфазних шарів, що перешкоджають коалесценції жирових крапель.

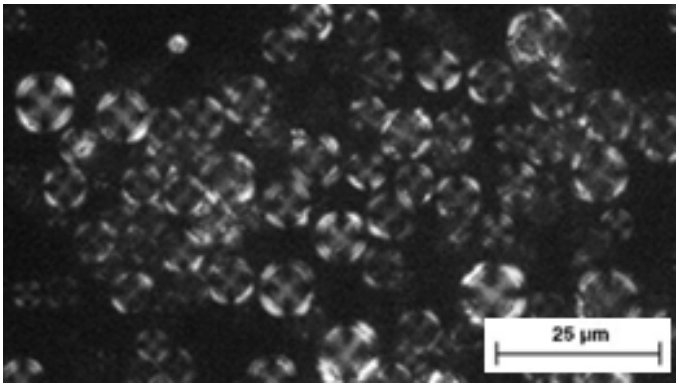

Рисунок 5. Оптична мікрофотографія X400 зразку досліджуваної емульсії
Джерело: розроблено автором

Отримані спостереження також узгоджуються з висновками Moraes et al., (2018), які досліджували ламелярні емульсії на основі олії з насіння *Dipteryx Alata* і встановили, що їх формування зумовлене самовпорядкуванням амфіфільних молекул під час охолодження. Обидва дослідження підтверджують вирішальну роль термодинамічного самоукладання для стабільності та текстурних характеристик ламелярних систем.

Оптимальне поєднання температурного режиму, помірних зсувних зусиль та синергетичної дії емульгаторів забезпечує самовпорядкування молекул у впорядковані бішари під час охолодження. Поступове зниження температури сприяє переходу системи з рідкокристалічного у гелеподібний стан, у якому ламелярні пласти стабілізують водно-олійні домени. Внаслідок цього утворюється структурована емульсія з гелевою мережею, що характеризується підвищеною в’язкістю, термостійкістю та пролонгованим вивільненням активних речовин.

У технологічному аспекті результати перегукуються з роботою Bufalini and Campardelli (2025), де наголошено на масштабованості процесів інкапсуляції функціональних інгредієнтів. Розроблена система на основі лецитину та стеарату сахарози потенційно сумісна з масштабованими харчовими процесами – пастеризацією, термічною інкапсуляцією чи екструзією.

Крім того, утворені ламелярні двошари виконуватимуть функцію депо для води, що забезпечує контрольоване її вивільнення та сприяє вологоутримувальним властивостям готового продукту. Згідно з результатами Uriho et al. (2024), які вивчали інкапсуляцію вітамінів у багатокомпонентних системах, спільним аспектом є *захист і стабілізація біоактивних сполук* у структурованих матрицях. Для систем, що містять гідролізований лецитин і стеарат сахарози, така структурна організація особливо характерна, оскільки обидва емульгатори мають здатність формувати стабільні рідкокристалічні фази.

Крім того, дослідження підтверджує положення Xu et al. (2024) щодо контрольованого вивільнення активних речовин. Формування ламелярної структури в емульсії може забезпечити кероване вивільнення біоактивних компонентів, що розширює можливості її використання у функціональних харчових продуктах.

ВИСНОВКИ. Наразі суттєвий інтерес харчових технологів викликають сучасні типи емульсійних систем, серед яких варто виділити ламелярні системи, які дозволяють більш ефективно контролювати вивільнення активів. Комбінації емульгаторів дозволяють проектувати стабільні ламелярні та дрібнодисперсні системи, здатні забезпечити високу стабільність структури при мінімальній витраті поверхнево-активних речовин. Запропонована нами ламелярна емульсія на системі емульгаторів: гідролізований лецитин 1,00 % + стеарат

сахарози 0,75 % – це стійка, густопластична система, яка може бути використана як носій для жиророзчинних біоактивів у широкому спектрі харчових продуктів: соусах, спредах, начинках, десертах і функціональних харчових продуктах. Наявність характерних анізотропних текстур під поляризованим світлом підтверджує ламелярну організацію емульсії. Завдяки синергізму вдається досягти кращої стабільності при меншій кількості поверхнево-активних речовин, що є економічно та токсикологічно вигідним. Наступні дослідження, спрямовані на комерціалізацію розробки, будуть направлені на валідацію стабільності, оптимізацію упаковки й системи консервації, а також адаптацію текстури під конкретну продуктову матрицю.

Подяки. Немає.
Конфлікт інтересів. Немає.

References

Bufalini, C., & Campardelli, R. (2025). Versatile emulsion-based encapsulation system production processes: A review. *Processes, 13*(5), 1409. https://doi:10.3390/pr13051409

Cholakova, D., & Tcholakova, S. (2024). Sucrose ester surfactants: Current understanding and emerging perspectives. *Current Opinion in Colloid & Interface Science, 73*, 101832. https://doi:10.1016/j.cocis.2024.101832

EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources Added to Food (ANS), Mortensen, A., Aguilar, F., Crebelli, R., Di Domenico, A., Frutos, M. J., Galtier, P., Gott, D., Gundert-Remy, U., Lambré, C., Leblanc, J. C., Lindtner, O., Moldeus, P., Mosesso, P., Oskarsson, A., Parent-Massin, D., Stankovic, I., Waalkens-Berendsen, I., Woutersen, R. A., Wright, M., Younes, M., Brimer, L., Altieri, A., Christodoulidou, A., Lodi, F., & Dusemund, B. (2017). Re-evaluation of lecithins (E 322) as a food additive. *EFSA Journal, 15*(4), e04742. https://doi:10.2903/j.efsa.2017.4742

Fameau, Anne-Laure, Veronico, Lorenzo, Le Coeur, Clémence, Mahmoudi, Najet, Gentile, Luigi (2024). Shear and cooling effects on lamellar gel network structure: Insights from Rheo-SANS. *Journal of Molecular Liquids*, Volume 414, Part B, 126283. https://doi:10.1016/j.molliq.2024.126283

Kothuri, V., Han, J. H., Keum, D. H., Kwon, H. C., Kim, D. H., & Han, S. G. (2025). Utilization of emulsion gels in plant-based meat analog formulations: A review. *Food Hydrocolloids, 158*, 110499. https://doi:10.1016/j.foodhyd.2024.110499

Leser, M. E. (2017). Lamellar structures and their applications in food systems. *Advances in Colloid and Interface Science, 247*, 546–556.

Moraes, C., Anjos, J. L. V., Maruno, M., Alonso, A., & Rocha-Filho, P. (2018). Development of lamellar gel phase emulsion containing baru oil (*Dipteryx alata* Vog.) as a prospective delivery system for cutaneous application. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences, 13*(2), 183–190. https://doi:10.1016/j.ajps.2017.09.003

Rahim, M. A., Zahran, H. A., Jaffar, H. M., Ambreen, S., Ramadan, M. F., Al-Asmari, F., Castro-Muñoz, R., & Zongo, E. (2025). Liposomal encapsulation in food systems: A review of formulation, processing, and applications. *Food Science & Nutrition, 13*(8), e70587. https://doi:10.1002/fsn3.70587

Reiner, Jasmin & Ly, Tran & Liu, Lingyue & Karbstein, Heike. (2022). Melt Emulsions: Influence of the Cooling Procedure on Crystallization and Recrystallization of Emulsion Droplets and their Influence on Dispersion Viscosity upon Storage. *Chemie Ingenieur Technik*, 94. 10. 1002. https://doi:10.1002/cite.202100143

Taslikh, M., Mollakhalili-Meybodi, N., Alizadeh, A. M., Mousavi, M. M., Nayebzadeh, K., & Mortazavian, A. M. (2022). Mayonnaise main ingredients influence on its structure as an emulsion. *Journal of Food Science and Technology, 59*(6), 2108–2116. https://doi:10.1007/s13197-021-05133-1

Tippetts, M. & Martini, S. (2009). Effect of cooling rate on lipid crystallization in oil-in-water emulsions. *Food Research International,* 42. 847-855. https://doi:10.1016/j.foodres.2009.03.009

Uchiyama, H., et al. (2016). Formation and characterization of lamellar liquid crystalline emulsions using sucrose stearate and lecithin. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 489,* 50–58.

Uriho, M., Laurent, C., & Boucher, M. (2024). Encapsulation of vitamins in multi-component emulsions: Stability and release. *Food Chemistry*, 434, 137236. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.137236

Wu, M., He, X., Feng, D., Li, H., Han, D., Li, Q., Zhao, B., Li, N., Liu, T., & Wang, J. (2023). The Effect of High Pressure Homogenization on the Structure of Dual-Protein and Its Emulsion Functional Properties. *Foods*, *12*(18), 3358. https://doi:10.3390/foods12183358

Xu, Y., Yan, X., Zheng, H., Li, J., Wu, X., Xu, J., Zhen, Z., & Du, C. (2024). The application of encapsulation technology in the food industry: Classifications, recent advances, and perspectives. *Food Chemistry: X, 21*, 101240. https://doi:10.1016/j.fochx.2024.101240

Отримано 26.05.2025 р., прийнято до друку 02.09.2025 р