



UDC 664.36: 664.346

STABILIZATION OF CAMELINA OIL-BASED EMULSION SYSTEMS WITH ROSMARINIC ACID: OXIDATION KINETICS AND INTERFACIAL EFFECTS

Tatyana M. Stepanova¹, Olha O. Vasylenko¹, Tatyana M. Holovko², Maksym L. Zhrebkin²,
Vladyslav O. Herasymenko¹

¹Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine, 160 H. Kondratiev St.

²State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine, 44 Alchevskyykh St.

Received 21 March 2026; accepted 6 May 2026; available online 20 June 2026

Abstract

The work is devoted to solving the problem of oxidative stabilization of emulsion systems based on camelina oil (*Camelina sativa*) – a valuable and sustainable source of ω -3 polyunsaturated fatty acids – by incorporating a natural polar antioxidant, rosmarinic acid. The research is highly relevant in the context of green economy trends focused on developing functional food innovations and extending their shelf life. The distinct feature of this study is the determination of rosmarinic acid's effect on oxidation kinetics and interfacial phenomena in oil-in-water emulsions during storage. The object of the study is the accumulation dynamics of oxidation products and the induction period of accelerated lipid oxidation under modeled conditions. An effective content of structural stabilizers (lecithin – 0.8–1.0 %; xanthan gum – 0.0–0.1 %) is proposed to ensure the physical integrity of the system. The optimal concentration range of rosmarinic acid (0.02–0.04 %) is outlined, the addition of which leads to a synergistic effect with lecithin phospholipids at the interface, thereby increasing the induction period of accelerated lipid oxidation by 2.2–2.8 times. The dynamics of the peroxide value in the lipid fraction were investigated under various temperature conditions (0–15 °C) over 15–60 days of storage. The results confirm the high efficacy of rosmarinic acid in retarding the degradation of polyunsaturated fatty acids. The applied aspect of the obtained results lies in the possibility of targeted modeling of stable functional agro-food, pharmaceutical, and cosmetic formulations based on highly nutritious camelina oil.

Keywords: camelina oil; *Camelina sativa*; rosmarinic acid; emulsion system; interfacial interaction; oxidation kinetics; lecithin; primary oxidation products.

СТАБІЛІЗАЦІЯ ЕМУЛЬСІЙНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ОЛІЇ РИЖІЮ РОЗМАРИНОВОЮ КИСЛОТОЮ: КІНЕТИКА ОКИСНЕННЯ ТА МІЖФАЗНІ ЕФЕКТИ

Тетяна М. Степанова¹, Ольга О. Василенко¹, Тетяна М. Головка², Максим Л. Жеребкін²,
Владислав О. Герасименко¹

¹Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна, вул. Г.Кондратьєва 160

²Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна, вул. Алчевських, 44

Анотація

Робота присвячена вирішенню проблеми стабілізації емульсійних систем на основі олії рижю (*Camelina sativa*), яка є цінним та екологічно стійким джерелом ω -3 поліненасичених жирних кислот, шляхом використання природного полярного антиоксиданту – розмаринової кислоти. Дослідження є актуальним у контексті трендів зеленої економіки щодо розробки функціональних харчових інновацій та подовження терміну їхньої придатності. Особливість роботи полягає в визначенні впливу розмаринової кислоти на кінетику хімічного окиснення та міжфазні явища в олійно-водних емульсіях під час зберігання. Об'єктом дослідження є динаміка накопичення продуктів окиснення та період індукції прискореного окиснення ліпідної складової за модельованих умов. Запропонований ефективний вміст стабілізаторів (лецитин – 0.8–1.0 %; ксантанова камедь – 0.0–0.1 %), що забезпечує структурну цілісність системи. Окреслений оптимальний діапазон концентрацій розмаринової кислоти (0.02–0.04 %), додавання якої приводить до синергетичного ефекту з фосфоліпідами лецитину на межі розділу фаз, що збільшує період індукції прискореного окиснення ліпідів у 2.2–2.8 разів. Досліджена динаміка зміни пероксидного числа ліпідної складової під час зберігання за різних температурних умов (0–15 °C) протягом 15–60 діб. Результати підтверджують високу ефективність розмаринової кислоти в гальмуванні деструкції поліненасичених жирних кислот. Прикладним аспектом є можливість цілеспрямованого моделювання рецептур стабільних функціональних агрохарчових продуктів, фармацевтичних та косметичних засобів на основі цінної олії рижю.

Ключові слова: олія рижю; *Camelina sativa*; розмаринова кислота; емульсійна система; міжфазна взаємодія; кінетика окиснення; лецитин; первинні продукти окиснення.

*Corresponding author: e-mail: tetiana.stepanova@snau.edu.ua

© 2026 Oles Honchar Dnipro National University; doi: 10.15421/jchemtech.v34i2.361671

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді.

Емульсійні жирові системи відіграють ключову роль у сучасному виробництві продуктів харчування, забезпечуючи не лише енергетичну, а й високу біологічну цінність раціону завдяки доставці поліненасичених жирних кислот (ПНЖК) та жиророзчинних вітамінів [1; 2]. У контексті глобального переходу до принципів зеленої економіки та сталого розвитку харчових систем, особливого значення набуває використання кліматично стійких рослинних ресурсів. Одним із таких перспективних екологічних джерел ω -3 ПНЖК є олія рижію (*Camelina sativa*), використання якої здатне суттєво підвищити нутритивну цінність функціональних продуктів.

Проте, головним викликом під час конструювання харчових систем на основі рідких олій, особливо типу «олія-вода», є їхня вкрай низька стійкість до окисного псування. Ланцюгове окиснення ПНЖК не лише знижує харчову цінність, але й призводить до накопичення токсичних первинних та вторинних продуктів деструкції [3; 4], а також стимулює небажані мікробіологічні процеси [5]. Тому подовження терміну придатності таких продуктів вимагає обґрунтованого підбору інгредієнтів, здатних ефективно гальмувати хімічне псування без використання синтетичних консервантів. У промисловості застосовують різні способи збереження якості жирових систем, проте створення продуктів з оптимізованою рецептурою, яка забезпечує одночасно і тривалий термін зберігання, і підвищену харчову цінність, залишається пріоритетним завданням [6].

Для стабілізації емульсійних систем традиційно використовують антиоксиданти, які можна поділити на дві групи. Перша група – це донори електронів або протонів (наприклад, речовини з фенольними гідроксилами), які обривають ланцюгові реакції вільнорадикального окиснення. Друга група зменшує інтенсивність окиснення шляхом хелатування каталітично активних іонів металів або регенерації первинних антиоксидантів [7–9]. Сьогодні особливий інтерес міжнародної наукової спільноти викликають природні поліфеноли, зокрема розмаринова кислота. Завдяки своїй полярності, подібні сполуки здатні концентруватися безпосередньо на межі розділу фаз «олія-вода», вступаючи в

неадитивну взаємодію з фосфоліпідами (зокрема лецитином) та утворюючи потужний захисний бар'єр [6].

З огляду на це, пошук шляхів мінімізації накопичення продуктів окиснення за рахунок синергетичної взаємодії природних стабілізаторів на міжфазній поверхні є надзвичайно актуальним. Створення модельних емульсійних систем на основі олії рижію та розмаринової кислоти дозволяє не лише дослідити фундаментальні механізми гальмування окиснення, а й має виражений соціально-економічний вплив [8; 10]. Це відкриває шлях до розширення асортименту конкурентоспроможних функціональних емульсійних продуктів (наприклад, соусів чи дресингів), що відповідають найвищим європейським стандартам якості та потребам сучасних споживачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження пропонують широкий спектр природних антиоксидантів для стабілізації ліпідних систем. Зокрема, активно вивчається дія рослинних екстрактів (зубрівки, лепехи) [11], ароматичних олій (м'яти, розмарину) та фруктових витяжок, таких як шкірка граната [12; 13]. Проте, використання багатокомпонентних комплексних екстрактів у складі емульсій має суттєві обмеження:

- збільшення концентрації екстрактів (наприклад, понад 0.0005 % для зубрівки) призводить до появи відчутних сторонніх присмаків у готовому продукті [11];
- складність точної ідентифікації найактивніших сполук у витяжках ускладнює прогнозування їхньої дії [12; 13].

Вирішенням цієї проблеми є перехід до використання індивідуальних біоактивних сполук. Доведено, що серед терпеноїдів та фенольних кислот найвищу антиоксидантну ефективність демонструють карнозол, розмаринова, карнозойна та кавова кислоти [14]. Водночас їхня стабілізуюча дія часто має неадитивний (синергетичний) характер у поєднанні з іншими ендogenous компонентами (токоферолами, каротиноїдами), що вимагає детального вивчення їхньої поведінки, особливо за умови підвищених температур зберігання [15].

Ефективність антиоксидантного захисту також критично залежить від жирнокислотного профілю самої ліпідної матриці [16–18]. Дослідження показують, що збереження поліненасичених жирних кислот

(ПНЖК) у купажах вимагає специфічного підходу [17], оскільки олії з високим вмістом α -ліноленової кислоти (наприклад, конопляна) є надзвичайно вразливими до деструкції [18; 19]. У цьому контексті олія рижію (*Camelina sativa*), яка є ще багатшим і екологічно стійким джерелом ω -3 ПНЖК, виступає вкрай перспективною, але технологічно складною основою. Залишається відкритим питання пошуку індивідуальних антиоксидантів, здатних ефективно гальмувати прискорене окиснення рижієвої олії в емульсіях без погіршення споживчих властивостей.

У гетерогенних харчових системах процеси окиснення локалізуються переважно на межі розділу фаз. Дослідження лецитинових емульсій [20] вказують на те, що зміна заряду крапель та присутність прооксидантів різко прискорюють хімічне псування. З іншого боку, введення біоактивних компонентів здатне просторово змінювати структуру на поверхні крапель за рахунок гідрофобних взаємодій, що підтверджено на прикладі β -каротину [21]. Проте механізм міжфазної поведінки чистої розмаринової кислоти в присутності лецитину та стабілізаторів консистенції (ксантанової камеді) досі не з'ясований.

З огляду на вищезазначене, існує гостра необхідність розширення наукових даних щодо стабілізації емульсій на основі біологічно цінної олії рижію. Доцільним є проведення дослідження, присвяченого виявленню впливу полярних антиоксидантів з вираженою міжфазною активністю (розмаринової кислоти) на період індукції прискореного окиснення ліпідної складової. Такий підхід дозволить розширити асортимент конкурентоспроможних емульсійних продуктів, збагачених ω -3 ПНЖК, та забезпечити їхню високу стійкість до окисного псування при зберіганні.

Метою статті є встановлення закономірностей впливу рецептурного складу та міжфазних явищ в емульсійних системах на основі олії рижію (*Camelina sativa*) на кінетику деструкції ліпідів і накопичення продуктів окиснення під час зберігання. Отримані наукові результати створять теоретичне підґрунтя для цілеспрямованого моделювання та розширення асортименту конкурентоспроможних функціональних продуктів підвищеної біологічної та харчової цінності з високим вмістом ω -3 поліненасичених жирних кислот.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані та вирішені такі науково-практичні завдання:

- визначення залежності окисної стійкості модельних олійно-водних емульсій на основі олії рижію від концентрації та співвідношення структурних стабілізаторів (лецитину та ксантанової камеді) в умовах прискореного термоокиснення;

- дослідження ефективності уповільнення процесів хімічної деструкції розробленої ліпідної матриці за рахунок введення природного полярного антиоксиданту – розмаринової кислоти, та оцінка її синергетичного ефекту в поєднанні з лецитином;

- аналіз стабільності оптимізованої за складом емульсійної системи та вивчення кінетики накопичення первинних продуктів окиснення (динаміку пероксидного числа) в процесі тривалого зберігання за різних температурних режимів.

Результати досліджень

Визначення залежності окисної стабільності емульсійної системи на основі олії рижію від вмісту структурних стабілізаторів.

Рецептурний склад модельних гетерогенних систем, представлений у табл. 1, сформований з урахуванням фундаментальних фізико-хімічних закономірностей конструювання прямих олійно-водних емульсій (типу «олія в воді», O/W) із високим вмістом ліпідної фази (70,0 %). Вибір олії рижію (*Camelina sativa*) як монокомпонентної жирової основи обумовлений її унікальним нутрицевтичним профілем, а саме високою концентрацією α -ліноленової кислоти (ω -3), що дозволяє позиціонувати розроблені емульсії як перспективні матриці для функціональних агрохарчових продуктів.

Водне середовище системи (27.0 %) містить 10 %-й водний розчин лимонної кислоти в кількості 2.0 %, що виконує подвійну технологічну роль у гетерогенній системі:

- регулювання рН та стабілізація консистенції: підкислення водної фази є критичним для забезпечення оптимального конформаційного стану та просторової розгортки макромолекул ксантанової камеді, що гарантує формування стабільної тривимірної гідрофільної сітки та запобігає гравітаційному розшаруванню (кремуванню) емульсії;

- хелатування прооксидантів: лимонна кислота виступає як ефективний комплексоутворювач, що зв'язує мікродомішки іонів металів змінної валентності (зокрема заліза), які є потужними каталізаторами розпаду гідропероксидів, тим самим готуючи стабільну технологічну платформу для дії первинних антиоксидантів.

Вміст амфіфільних молекул рідкого соєвого лецитину (0.0–1.0 %) та біополімеру ксантанової камеді (0.0–0.5 %) варіювали з метою створення матриці порівняння та встановлення їхнього ізольованого і кумулятивного внеску в кінетику початкових етапів автоокиснення [12; 14].

Необхідно підкреслити, що наведений у табл. 1 склад відображає базову структурну модель системи. Досліджуваний полярний антиоксидант – розмаринова кислота – не

відносився до фіксованого рецептурного переліку, оскільки є змінним чинником експерименту. Розмаринову кислоту вводили до системи на етапі диспергування водного середовища понад базову масу в раціональних концентраціях (0.02–0.04 %), що дозволило в подальшому чітко диференціювати її індивідуальну та синергетичну ефективність на межі розділу фаз у присутності фосфоліпідів.

З метою створення продукту з фізіологічно значущим вмістом ω -3 поліненасичених жирних кислот, як ліпідну основу було обрано кліматично стійку олію рижю (*Camelina sativa*). На початковому етапі були вироблені модельні зразки емульсійної системи типу «олія-вода», базовий склад яких наведений в табл. 1.

Table 1

Composition of model samples of the emulsion system

Таблиця 1

Склад модельних зразків емульсійної системи	
Найменування компоненту	Вміст, %
Ліпідна фаза: Олія рижю рафінована	70.0
Лимонна кислота (10 %-й водний розчин)	2.0
Дистильована вода	27.0
Лецитин	0.0–1.0
Ксантанова камедь	0.0–0.5

Досліджений вплив концентрації та співвідношення структурних стабілізаторів (лецитину та ксантанової камеді) на період

індукції прискореного окиснення ліпідної матриці. Діаграма отриманої залежності наведена на рис. 1.

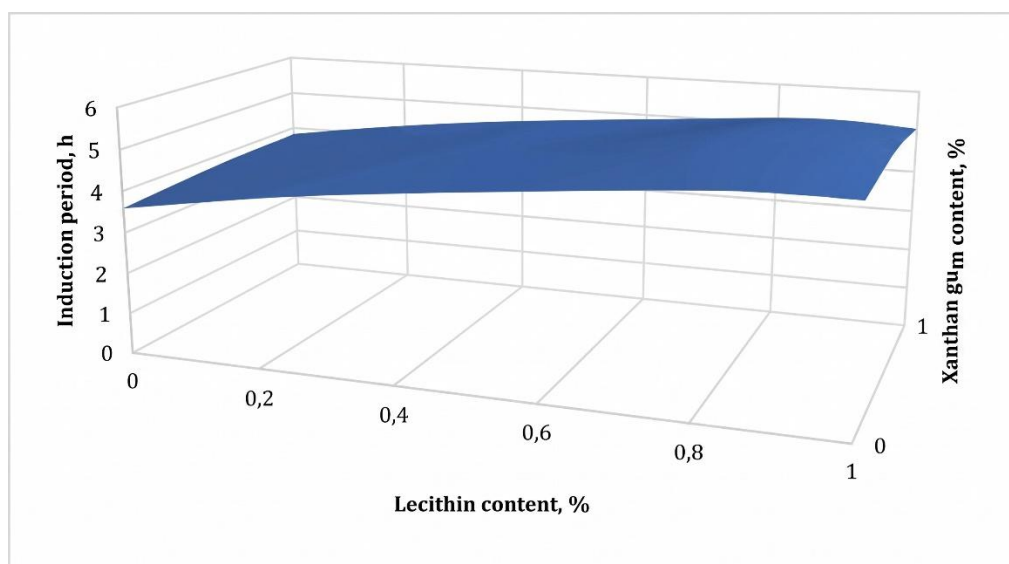


Рис. 1. Залежність періоду індукції прискореного окиснення модельних зразків емульсійної системи від вмісту стабілізаторів

Fig. 1. Dependence of the accelerated oxidation induction period of emulsion system model samples on the stabilizer content

Вміст лецитину в системі варіювали в інтервалі 0.0–1.0 % (з кроком 0.1 %), а ксантанової камеді – 0.0–0.5 % (з кроком

0.05 %). Слід зазначити, що агрегативна стійкість (стабільність до розшарування) в досліджуваних зразках становила близько

100 %. Отримані значення періоду індукції прискореного окиснення ліпідної складової знаходилися в межах 3.6–5.3 год.

Дослідження синергетичного ефекту гальмування окисного псування емульсійної системи за допомогою розмаринової кислоти

Вивчений вплив природного полярного антиоксиданту – розмаринової кислоти – на період індукції прискореного термоокиснення оптимізованого модельного зразка (де структурні стабілізатори становили: лецитин – 0.8 %, ксантанова камедь – 0.1 %).

Оскільки розмаринова кислота є гідрофільною, її додавали на етапі підготовки водної фази в діапазоні концентрацій 0.00–0.06 %. Як контрольний зразок для оцінки синергізму на межі розділу фаз була використана емульсія аналогічного складу, але стабілізовану виключно ксантановою камеддю (0.5 %) без додавання фосфоліпідів лецитину. Графічне відображення отриманих залежностей наведено на рис. 2.

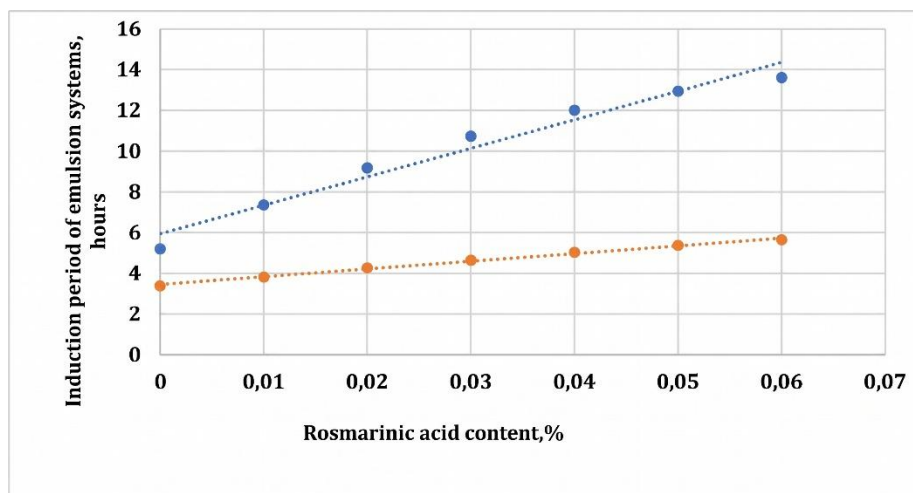


Рис. 2. Залежність періодів індукції прискореного окиснення модельних зразків емульсійної системи від концентрації розмаринової кислоти

Fig. 2. Dependence of the accelerated oxidation induction periods of model emulsion system samples on the concentration of rosmarinic acid

Аналіз графічних залежностей (рис. 2) наочно демонструє принципову різницю в ефективності дії антиоксиданту залежно від архітектури міжфазного шару. В контрольній системі (без лецитину) додавання розмаринової кислоти навіть у максимальній концентрації (0.06 %) призводить лише до помірного зростання періоду індукції ліпідів (з 3.34 до 5.62 год). Натомість у системі, стабілізованій фосфоліпідами лецитину, спостерігається виражений синергетичний ефект: за концентрації розмаринової кислоти 0.04–0.06 % період індукції зростає експоненційно – до 12.0–13.6 год, що перевищує показник базового зразка майже в 2.2–2.8 раза.

Такий неадитивний характер стабілізації повністю узгоджується з теорією просторового розподілу антиоксидантів у гетерогенних матрицях («полярний парадокс»). У контрольній емульсії, де поверхнево-активні речовини відсутні, гідрофільна розмаринова кислота рівномірно розчиняється в об'ємі водної фази,

залишаючись віддаленою від крапель олії рижю, всередині яких та на поверхні яких ініціюється ланцюгове окиснення.

Наявність лецитину кардинально змінює фізико-хімічну ситуацію. Розмаринова кислота завдяки своїй полярності має здатність концентруватися безпосередньо на межі розділу фаз «олія-вода», де вступає в нековалентну взаємодію (зокрема, через утворення водневих зв'язків) з полярними «голівками» фосфоліпідів лецитину [13]. В результаті цього процесу формується щільний міжфазний антиоксидантний комплекс – своєрідний «щит» навколо ліпідної краплі. Цей бар'єр не лише стерично екранує поверхню від доступу кисню та прооксидантів водної фази (наприклад, іонів металів), але й забезпечує миттєве перехоплення вільних радикалів безпосередньо в зоні їхнього зародження, надійно захищаючи вразливі ω -3 поліненасичені жирні кислоти олії рижю.

За допомогою рівнянь представлені апроксимаційні залежності величини періоду індукції прискореного окиснення з модельних

зразків емульсійної системи від вмісту розмаринової кислоти (C_{RA} , %):

-модельної емульсійної системи, стабілізованої лецитином (0,8 %) і

$$PI_{1/c}(C_{RA}) = -1500 \times C_{RA}^2 + 230 \times C_{RA} + 5.2 \quad (1)$$

$$PI_c(C_{RA}) = -200 \times C_{RA}^2 + 50 \times C_{RA} + 3.34 \quad (2)$$

Слід зазначити, що наведені залежності дозволяють адекватно розраховувати величину періоду індукції прискореного окиснення емульсійної системи, що є прямо пропорційним терміну її зберігання в інтервалах концентрацій чистої розмаринової кислоти 0.00–0.06 %.

Дослідження стійкості до окисного псування під час зберігання емульсійної системи розробленого складу.

Для оцінки кінетики деструктивних хімічних процесів та прогнозування стабільності розробленої емульсійної системи

$$PV(T, T) = 1.15 + 0.12T + 0.05T + 0.02T^2 + 0.004 T \times T + 0.001T^2 \quad (3)$$

Графічну інтерпретацію отриманої моделі в вигляді тривимірної поверхні відклику наведено на рис. 3.

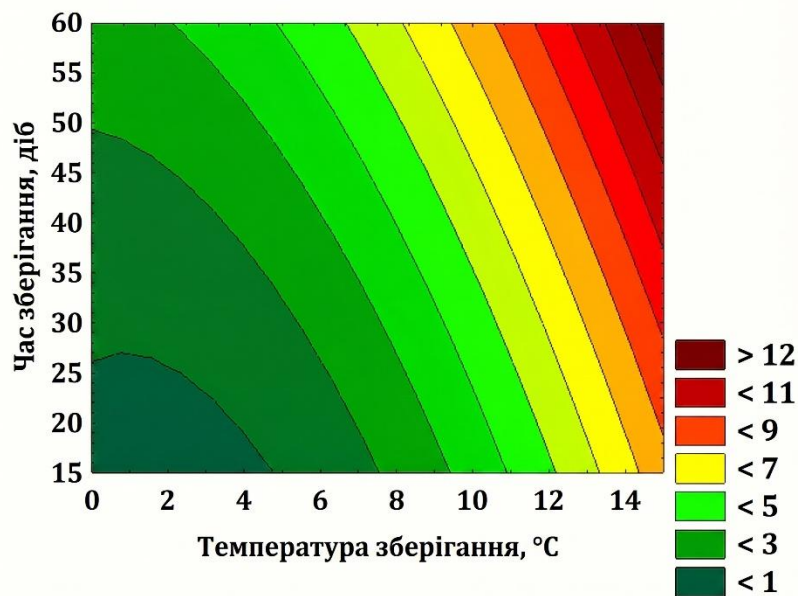


Рис. 3. Залежність величини пероксидного числа ліпідної складової емульсійної системи, стабілізованої розмариновою кислотою, від температури та часу зберігання

Fig. 3. Dependence of the peroxide value of the lipid component of the emulsion system stabilized by rosmarinic acid on temperature and storage time

Характер топографії представленої тривимірної поверхні відклику дозволяє детально проаналізувати закономірності кінетики автоокиснення ліпідів у гетерогенному середовищі. Візуалізація математичної моделі чітко демонструє, що накопичення первинних продуктів деструкції має виражений нелінійний характер. У зоні низьких температур (близько 0 °C) поверхня залишається практично пологою протягом усього періоду спостереження (до 60 діб), що вказує на максимальне уповільнення

ксантановою камеддю (0,1 %) – $PI_{1/c}(C_{RA})$ (1);- модельної емульсійної системи, стабілізованої ксантановою камеддю (0,5 %) – $PI_c(C_{RA})$ (2).

в процесі зберігання була досліджена динаміка накопичення первинних продуктів автоокиснення. Інтенсивність утворення пероксидів і гідрпероксидів у ліпідній матриці на основі олії рижю оцінювали за зміною величини пероксидного числа (PV). За допомогою методів багатофакторного регресійного аналізу була побудована математична модель, яка описує апроксимаційну залежність показника PV від ключових чинників: температури зберігання (T , °C) та тривалості процесу (T , діб):

кінетичної енергії молекул та високу стійкість системи за умов охолодження.

Проте підвищення температури зберігання до 10–15 °C виступає потужним активатором автоокиснення, про що свідчить стрімке зростання крутизни графіка. Наявність помітного вигину поверхні (зумовлена позитивними коефіцієнтами при квадратичних членах T^2 , T^2 та константі перехресної взаємодії $T \times T$ у рівнянні регресії) підтверджує, що тривалість зберігання та температурний чинник діють кумулятивно.

Особливістю отриманої поверхні є відсутність експоненціальних «викидів» пероксидного числа, які зазвичай притаманні незахищеним оліям із високим вмістом ω -3 ПНЖК. Поверхня піднімається плавно, фіксуючи контрольоване та лінійне проходження індукційного періоду.

Розраховане рівняння регресії (3) з високим ступенем адекватності описує кінетику утворення первинних продуктів окиснення в визначеному технологічному діапазоні температур від 0 до 15 °С протягом терміну зберігання від 15 до 60 діб. Експериментально встановлено, що для модельної емульсійної системи, сформованої за участю лецитину (0.8 %), ксантанової камеді (0.1 %) та оптимізованої концентрації розмаринової кислоти (0.04 %), значення пероксидного числа варіюються в безпечних межах 2.1–15.6 ммоль $\frac{1}{2}O_2$ /кг. Отримані результати підтверджують високу ефективність міжфазного захисного бар'єру в стримуванні вільнорадикальних процесів у високоненасиченій ліпідній матриці.

Обговорення результатів

Визначений вплив співвідношення структурних стабілізаторів (лецитину та ксантанової камеді) на окисну стабільність емульсійної системи на основі олії рижію (табл. 1). Пероксидне число обрано ключовим маркером через його високу чутливість до початкових етапів ланцюгового окиснення високоненасичених ліпідних матриць. Графічно визначена залежність періоду індукції прискореного окиснення від вмісту стабілізаторів (рис. 1). На базі експериментальних даних запропонований раціональний вміст емульгаторів, а саме: – лецитин – 0.8–1.0 %; – ксантанова камедь – 0.0–0.1 %.

У вказаних діапазонах період індукції прискореного окиснення становить 5.2–5.3 год., що на 44.4–47.2 % більше порівняно з системою, стабілізованою виключно ксантановою камеддю. Отримані дані свідчать про виражену антиоксидантну дію лецитину, що пояснюється його амфільною природою. Молекули лецитину формують щільний захисний шар на межі розділу фаз, де їхні гідрофобні фрагменти орієнтовані до ліпідних крапель олії рижію, просторово екрануючи вразливі поліненасичені жирні кислоти від взаємодії з киснем. На відміну від робіт [17; 18], отримані результати оптимізують саме синергетичне співвідношення стабілізаторів,

дозволяючи досягти балансу між агрегативною та хімічною стабільністю.

Досліджений ефект гальмування хімічної деструкції ліпідів за рахунок введення природного полярного антиоксиданту – розмаринової кислоти (рис. 2, рівняння (1), (2)). Аналіз даних дозволив окреслити оптимальний діапазон концентрацій розмаринової кислоти (0.02–0.04 %), за якого період індукції прискореного окиснення зростає в 2.2–2.8 рази (рівняння (1)). Доведений потужний неадитивний (синергетичний) вплив розмаринової кислоти та лецитину.

Запропонований оптимізований склад модельної емульсії: лецитин (0.8 %), ксантанова камедь (0.1 %) та розмаринова кислота (0.04 %). Виявлений синергізм можна пояснити явищами міжфазної локалізації: гідрофільна розмаринова кислота концентрується в водному шарі безпосередньо біля поверхні ліпідних крапель, де вступає у взаємодію з полярними «голівками» фосфоліпідів лецитину. Це формує багатошаровий антиоксидантний бар'єр, який ефективно перехоплює вільні радикали до того, як вони проникнуть у ліпідну фазу. На відміну від попередніх досліджень [11–13], використання хімічно чистої речовини дозволило чітко верифікувати цей механізм і уникнути органолептичних недоліків, притаманних комплексним рослинним екстрактам. Залежності (1) і (2) дозволяють адекватно розраховувати період індукції, що корелює з методологічними підходами роботи [7].

Визначена стійкість розробленої системи під час зберігання. Запропоновані графічна (рис. 3) і статистична (3) залежності дозволяють прогнозувати величину пероксидного числа залежно від комплексу умов: температурних режимів та тривалості. На відміну від роботи [18], розрахована математична модель (3) є багатофакторною, що робить її ефективним інструментом контролю безпеки продукції на етапах логістики та зберігання.

Отримані результати формують наукове підґрунтя для конструювання нових функціональних продуктів на основі кліматично стійкої олії рижію. Вони мають значний прикладний потенціал для розширення асортименту харчових, косметичних та фармацевтичних засобів, збагачених ω -3 ПНЖК. Впровадження таких

рецептур повністю відповідає сучасним європейським векторам сталого розвитку харчових систем (Green Economy) та циркулярної економіки. Крім того, розробка подібних матриць на базі передових дослідницьких інфраструктур формату Agro-Food «Living Lab» сприяє інтеграції вітчизняних наукових центрів у глобальний дослідницький простір.

Обмеження застосування результатів дослідження, зокрема залежностей (1)–(3), пов'язані з обраними межами експериментальних умов. Екстраполяція даних на системи з іншим жирнокислотним профілем або рівнем рН вимагатиме додаткової верифікації. Також недоліком поточного етапу є відсутність даних щодо мікробіологічної стабільності. Проте хімічна стабільність ліпідної основи є базовою умовою для визначення загального терміну придатності таких систем. Перспективним напрямком подальших досліджень є масштабування технології на інші типи ліпідних матриць та вивчення впливу розробленого антиоксидантного комплексу на реологічні властивості готових харчових емульсій.

Висновки

Встановлені закономірності впливу концентрації та співвідношення структурних стабілізаторів на окисну стійкість модельних олійно-водних емульсій на основі олії рижю (*Camelina sativa*) в умовах прискореного термоокиснення. Обґрунтований раціональний вміст компонентів

стабілізаційного комплексу (лецитин – 0.8–1.0 %; ксантанова камедь – 0.0–0.1 %), який за рахунок екранування ліпідних крапель забезпечує збільшення періоду індукції прискореного окиснення високоненасиченої матриці на 44.4–47.2 % порівняно з емульсіями, стабілізованими виключно ксантановою камеддю.

Досліджена кінетика гальмування процесів хімічного псування розробленої емульсійної системи за допомогою природного полярного антиоксиданту – розмаринової кислоти. Окреслено оптимальний діапазон її робочих концентрацій (0.02–0.04 %), за якого виявляється виражений неадитивний синергетичний ефект із фосфоліпідами лецитину на межі розділу фаз «олія-вода». Це дозволяє сформувати стійкий міжфазний бар'єр та збільшити період індукції прискореного окиснення ліпідів у 2.2–2.8 рази залежно від архітектури стабілізаційного комплексу.

Оцінено динаміку накопичення первинних продуктів автоокиснення (величина пероксидного числа) ліпідної складової оптимізованої емульсії в процесі зберігання в температурному діапазоні 0–15 °C протягом 15–60 діб. Отриману багатофакторну математичну апроксимаційну залежність рекомендовано для практичного впровадження з метою надійного контролювання, моніторингу та прогнозування хімічної стабільності і термінів придатності інноваційних харчових, косметичних та фармацевтичних продуктів на основі біологічно цінного насіння рижю.

References

- [1] Abdullahi, A., Khairulmazmi, A., Yasmeen, S., Ismail, I. S., Norhayu, A., Sulaiman, M. R., Ahmed, O. H., Ismail, M. R. (2020). Phytochemical profiling and antimicrobial activity of ginger (*Zingiber officinale*) essential oils against important phytopathogens. *Arabian Journal of Chemistry*, 13, 8012–8025. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.09.031>
- [2] Aguirre-Joya, J. A., De Leon-Zapata, M. A., Alvarez-Perez, O. B., Torres-León, C., Nieto-Oropeza, D. E., Ventura-Sobrevilla, J. M., Aguilar, M. A., Ruelas-Chacón, X., Rojas, R., Ramos-Aguilera, M. E., Aguilar, C. N. (2018). Basic and applied concepts of edible packaging for foods. In *Food Packaging and Preservation*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811516-9.00001-4>
- [3] Ahari, H., Naeimabadi, M. (2021). Employing nanoemulsions in food packaging: Shelf life enhancement. *Food Engineering Reviews*, 13, 858–883. <https://doi.org/10.1007/s12393-021-09282-z>
- [4] Alamri, S. A. M., Hashem, M., Alqahtani, M. S. A., Alshehri, A. M. A., Mohamed, Z. A., Ziedan, E. S. H. (2020). Formulation of mint and thyme essential oils with Arabic gum and Tween to enhance their efficiency in the control of postharvest rots of peach fruit. *J. Indian Dent. Assoc.*, 42, 330–343. <https://doi.org/10.1080/07060661.2019.1686654>
- [5] Alliod, O., Almouazen, E., Nemer, G., Fessi, H., Charcosset, C. (2019). Comparison of three processes for parenteral nanoemulsion production: Ultrasounds, microfluidizer, and premix membrane emulsification. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 108, 2708–2717. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2019.03.026>
- [6] Almasi, H., Azizi, S., Amjadi, S. (2020). Development and characterization of pectin films activated by nanoemulsion and Pickering emulsion stabilized marjoram (*Origanum majorana L.*) essential oil. *Food Hydrocolloids*, 99, 105338. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105338>
- [7] Álvarez-Martínez, F. J., Barrajo-Catalán, E., Herranz-López, M., Micol, V. (2021). Antibacterial plant compounds, extracts and essential oils: An updated review on their effects and putative mechanisms of

- action. *Phytomedicine*, 90, 153626.
<https://doi.org/10.1016/j.phymed.2021.153626>
- [8] Alvarez-Perez, O. B., León-Zapata, M. Á. De, Molina, R. R., Ventura-Sobrevilla, J., Aguilar-González, M. A., Aguilar, C. N. (2019). Functionality features of candelilla wax in edible nanocoatings. In *Research Methods and Applications in Chemical and Biological Engineering*. Apple Academic Press.
<https://doi.org/10.1201/9780429424137-16>
- [9] Arabpoor, B., Yousefi, S., Weisany, W., Ghasemlou, M. (2021). Multifunctional coating composed of Eryngium campestre L. essential oil encapsulated in nano-chitosan to prolong the shelf-life of fresh cherry fruits. *Food Hydrocolloids*, 111, 106394.
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106394>
- [10] Assadpour, E., Mahdi Jafari, S. (2019). A systematic review on nanoencapsulation of food bioactive ingredients and nutraceuticals by various nanocarriers. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59, 3129–3151.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1484687>
- [11] Baig, N., Kammakakam, I., Falath, W. (2021). Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Materials Advances*, 2, 1821–1871.
<https://doi.org/10.1039/D0MA00807A>
- [12] Ban, Z., Zhang, J., Li, L., Luo, Z., Wang, Y., Yuan, Q., Zhou, B., Liu, H. (2020). Ginger essential oil-based microencapsulation as an efficient delivery system for the improvement of Jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) fruit quality. *Food Chemistry*, 306, 125628.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125628>
- [13] Bazargani, M. M., Rohloff, J. (2016). Antibiofilm activity of essential oils and plant extracts against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* biofilms. *Food Control*, 61, 156–164.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.09.036>
- [14] Helikh, A., Filon, A. (2025). Biochemical variability of vegetable juice ety profile of vegan fermented sausages. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(3(84)), 52–59.
<https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.334830>
- [15] Helikh, A., Filon, A. (2025). Nanocomposite biopolymer coating with β -nanochitosan for preserving snail fillets: A synergistic antimicrobial system with *Monarda punctata* oil. *2025 IEEE 15th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*.
<https://doi.org/10.1109/NAP68437.2025.11216270>
- [16] Liu, Y., Helikh, A., Filon, A., & Duan, Z. (2023). Sausage technology for food sustainability: Recipe, color, nutrition, structure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(11(124)), 47–58.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286323>
- [17] Bodirsky, B. L., Dietrich, J. P., Martinelli, E., Stenstad, A., Pradhan, P., Gabrysch, S., Mishra, A., Weindl, I., Le Mouël, C., Rolinski, S., Baumstark, L., Wang, X., Waid, J. L., Lotze-Campen, H., Popp, A. (2020). The ongoing nutrition transition thwarts long-term targets for food security, public health and environmental protection. *Scientific Reports*, 10, 19778.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-75213-3>
- [18] Bouyahya, A., Abrini, J., Dakka, N., Bakri, Y. (2019). Essential oils of *Origanum compactum* increase membrane permeability, disturb cell membrane integrity, and suppress quorum-sensing phenotype in bacteria. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 9, 301–311.
<https://doi.org/10.1016/j.jpha.2019.03.001>
- [19] Campolo, O., Giunti, G., Laigle, M., Michel, T., Palmeri, V. (2020). Essential oil-based nano-emulsions: Effect of different surfactants, sonication and plant species on physicochemical characteristics. *Industrial Crops and Products*, 157, 112935.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112935>
- [20] Chaudhari, A. K., Singh, V. K., Das, S., Deepika, Prasad, J., Dwivedy, A. K., Dubey, N. K. (2020). Improvement of in vitro and in situ antifungal, AFB1 inhibitory and antioxidant activity of *Origanum majorana* L. essential oil through nanoemulsion and recommending as novel food preservative. *Food and Chemical Toxicology*, 143, 111536. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111536>
- [21] Chaudhary, S., Kumar, S., Kumar, V., Sharma, R. (2020). Chitosan nanoemulsions as advanced edible coatings for fruits and vegetables: Composition, fabrication and developments in last decade. *International Journal of Biological Macromolecules*, 152, 154–170.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.276>