Карпатський національний університет імені Василя Стефаника
Факультет природничих наук
Кафедра хімії

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
на тему:

Порівняльний аналіз екстракції кофеїну з зеленого та чорного чаю залежно від умов заварювання

Виконала: студентка IV курсу,
групи Х – 41
спеціальності 102 Хімія
Козачук Маріанна Олександрівна

Керівник: кандидат технічних наук,
доцент кафедри хімії
Микитин Ігор Михайлович

Рецензент: доктор технічних наук,
професор кафедри хімії
Курта Сергій Андрійович

м. Івано-Франківськ – 2026 рік

Карпатський національний університет імені Василя Стефаника
Факультет природничих наук
Кафедра хімії
Освітній рівень перший (бакалаврський)

Затверджено на засіданні
кафедри хімії
Протокол № 9 від 14 жовтня 2025 р.
Завідувач кафедри
_____ Миронюк І.Ф.
(підпис)

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

Козачук Маріанні Олександрівні
(прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи Порівняльний аналіз екстракції кофеїну з зеленого та чорного чаю залежно від умов заварювання

Керівник роботи *Микитин Ігор Михайлович, к.т.н., доцент кафедри хімії*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

2. Перелік питань, які потрібно розробити:
1. Розглянути хімічний склад зеленого та чорного чаю, фізико-хімічні властивості кофеїну та фактори, що впливають на його екстракцію, а також методи кількісного визначення кофеїну.
2. Дослідити процес екстракції кофеїну із зеленого та чорного чаю за різних умов заварювання та провести порівняльний аналіз ефективності його вилучення.

3. Дата видачі завдання 22 жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	*Огляд літературних джерел, узагальнення та систематизація даних*	*Лютий*	*Рукопис*
2.	*Дослідження екстракції кофеїну з зеленого та чорного чаю*	*Березень - квітень*	*Рукопис*
3.	*Оформлення роботи та демонстраційного матеріалу. Перевірка дипломної роботи на наявність текстових запозичень*	*Травень - червень*	*Рукопис Презентація*

Студентка Козачук М.О.

Керівник роботи Микитин І.М.

Козачук М.О. Порівняльний аналіз екстракції кофеїну з зеленого та чорного чаю залежно від умов заварювання. Дипломна робота за напрямом підготовки 102 Хімія. Карпатський національний університет імені Василя Стефаника. м. Івано-Франківськ, 2026. 42 с.

Дипломна робота є рукописом, який містить опис експериментальних досліджень екстракції кофеїну з зеленого та чорного чаю у пакетованій та розсипній формах залежно від умов заварювання. Здійснено огляд літературних джерел щодо хімічної природи кофеїну, властивостей чаю та факторів, що впливають на його екстракцію. Проведено лабораторні експерименти з варіюванням температури води, тривалості настоювання та ультразвуком. Кількісне визначення кофеїну виконано спектрофотометричним методом, отримані результати проаналізовано та порівняно між різними формами чаю. Встановлено закономірності впливу технологічних параметрів на ефективність екстракції кофеїну.

Ключові слова: зелений чай, чорний чай, екстракція кофеїну, спектрофотометрія, пакетований чай, розсипний чай, умови заварювання.

Kozachuk M.O. Comparative analysis of caffeine extraction from green and black tea depending on brewing conditions. Diploma thesis for the bachelor's qualification level in the specialty 102 Chemistry. Vasyl Stefanyk Carpathian National University Ivano-Frankivsk, 2026. 42 p.

The bachelor's thesis is a manuscript that presents the results of experimental studies on the extraction of caffeine from green and black tea in both tea bag and loose-leaf forms under various brewing conditions. A review of the scientific literature was conducted concerning the chemical nature of caffeine, the properties of tea, and the factors influencing its extraction. Laboratory experiments were performed by varying water temperature, infusion time, and the solid-to-solvent ratio. Quantitative determination of caffeine was carried out using a spectrophotometric method. The obtained results were analyzed and compared across different tea forms. The influence of technological parameters on the efficiency of caffeine extraction was established.

Keywords: green tea, black tea, caffeine extraction, spectrophotometry, tea bags, loose-leaf tea, brewing conditions.

ЗМІСТ

ВСТУП…… 4

РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД……... 7

1.1. Кофеїн як природний алкалоїд: загальна характеристика……... 7

1.2. Фізико-хімічні властивості кофеїну та їх вплив на розчинність……. 9

1.3. Хімічний склад чаю та особливості зеленого і чорного чаю……... 12

1.4. Роль ферментації у формуванні вмісту кофеїну в чаї……... 14

1.5. Основні чинники, що впливають на екстракцію кофеїну під час заварювання…… 15

1.6. Методи визначення вмісту кофеїну в чайних настоях……. 17

РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА……... 21

2.1. Характеристика досліджуваного чаю……. 21

2.2. Екстракція кофеїну з чорного та зеленого чаю в залежності часу заварювання…… 26

2.3. Екстракція кофеїну з чорного та зеленого чаю в залежності температури заварювання…… 32

2.4. Екстракція кофеїну із застосуванням ультразвуку……... 36

ВИСНОВКИ……... 38

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……... 40

ВСТУП

Актуальність теми. Кофеїн є одним із найпоширеніших природних алкалоїдів, що міститься у листі *Camellia sinensis*, та визначає фізіологічну активність чаю як напою. Вміст кофеїну у зеленому та чорному чаї залежить не лише від сорту сировини та ступеня ферментації, а й від параметрів заварювання (температури води, тривалості настоювання, ультразвуку).

З огляду на зростання споживання чаю та підвищений інтерес до регулювання надходження кофеїну в організм, дослідження закономірностей його екстракції є науково й практично значущим. Порівняльний аналіз екстракції кофеїну з зеленого та чорного чаю дозволяє встановити вплив технологічних і фізико-хімічних чинників на ефективність вилучення алкалоїду, що має значення для стандартизації методів визначення, оптимізації умов приготування напою та розроблення рекомендацій для споживачів.

Зв’язок роботи з планами, науковими програмами, темами, наказами, рішеннями. Тема бакалаврської роботи затверджена на засіданні кафедри хімії (протокол № 9 від 14 жовтня 2025 року) та на засіданні Вченої ради факультету природничих наук (протокол № 2 від 21 жовтня 2025 року).

Об’єктом дослідження є процес екстракції кофеїну з зеленого та чорного чай у різних товарних формах - пакетований (фільтр-пакети) та розсипний (листовий/подрібнений).

Предметом дослідження є вплив умов заварювання, температури води, тривалості настоювання, ультразвуку на процес екстракції кофеїну із зеленого та чорного чаю та його вміст у отриманих екстрактах.

Мета роботи полягає у визначенні вмісту кофеїну в зеленому та чорному чаї, проведенні порівняльного аналізу ефективності його екстракції залежно від умов заварювання, а також встановленні впливу технологічних і фізико-хімічних чинників на кількісні показники вилучення кофеїну.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні **завдання:**

- проаналізувати наукові джерела щодо хімічної природи кофеїну, його властивостей та особливостей екстракції з чаю;
- обґрунтувати вибір методики кількісного визначення кофеїну та умов проведення експерименту;
- дослідити вплив температури води, тривалості настоювання, ультразвуку;
- провести кількісне визначення вмісту кофеїну в отриманих екстрактах;
- здійснити порівняльний аналіз ефективності екстракції кофеїну із зеленого та чорного чаю різних форм випуску.

Методи дослідження. Для дослідження екстракції кофеїну із зеленого та чорного чаю (пакетованого та розсипного) застосовано комплекс теоретичних і експериментальних методів. У роботі використано *теоретичні методи*: аналіз, порівняння та узагальнення наукових джерел щодо хімічної природи кофеїну та факторів, що впливають на процес екстракції. *Експериментальна частина* передбачала проведення екстракції кофеїну за варійованих умов (температура, тривалість настоювання, ультразвук). Кількісне визначення кофеїну здійснювали спектрофотометричним методом із побудовою калібрувального графіка.

Особистий внесок студента полягає в підборі та систематизації літературних даних, проведені експериментів, опрацюванні отриманих результатів та їх аналізі в програмах Microsoft Excel та Origin, написанні бакалаврської роботи та тез доповідей на наукові студентські конференції.

Структура та обсяг роботи. Структура роботи обумовлена метою та завданнями. Бакалаврська робота складається зі вступу, двох розділів, висновків та списку використаних наукових джерел (**27** найменувань). Робота містить **12** рисунків та **5** таблиць. Загальний обсяг роботи – **42** сторінки.

Апробація результатів роботи. Результати наукових досліджень були представлені на XVIII Всеукраїнській науковій конференції студентів та аспірантів "Хімічні Каразінські читання - 2026"(м.Харків), яка проводилась 28 квітня 2026 року на базі Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна.

Публікації:

1. Козачук М.О., Микитин І. М., Прокіпчук І. В. Порівняльний аналіз екстракції

кофеїну з зеленого та чорного чаю залежно від умов заварювання. XVII Всеукраїнська наукова конференція студентів та аспірантів "Хімічні Каразінські читання - 2026" (ХКЧ’26) : тези доп., 28 квіт. 2026 р. / Харків. нац. ун-т ім. В. Н. Каразіна, Хім. ф-т. - Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2026. С. 23.

РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1. Кофеїн як природний алкалоїд: загальна характеристика

Алкалоїди - це велика група природних азотовмісних органічних сполук, які синтезуються переважно рослинами у процесі вторинного метаболізму. Вони характеризуються високою біологічною активністю та здатністю впливати на різні фізіологічні процеси як у самих рослинах, так і в організмах тварин і людини. Основною структурною особливістю алкалоїдів є наявність атомів азоту, зазвичай включених до складу гетероциклічних систем. Біосинтетично алкалоїди походять з амінокислот, що визначає їх різноманітність і складність будови.

Кофеїн є одним із найбільш відомих і поширених представників алкалоїдів, який належить до групи пуринових алкалоїдів (метилксантинів). Він широко розповсюджений у рослинному світі і зустрічається у значній кількості видів рослин, що мають господарське значення. Найбільш відомими джерелами кофеїну є чай (Camellia sinensis), кава (Coffea arabica), гуарана (Paullinia cupana), какао (Theobroma cacao) та деякі інші рослини. Його поширення в різних таксономічних групах рослин свідчить про важливу біологічну роль цієї сполуки.

У рослинах кофеїн виконує низку функцій, пов’язаних із захистом та адаптацією до умов навколишнього середовища. Однією з основних функцій є захисна, оскільки кофеїн має токсичну дію на багатьох комах-шкідників і мікроорганізми. Завдяки цьому рослини, які містять кофеїн, мають підвищену стійкість до біотичних факторів. Крім того, кофеїн може виконувати алелопатичну функцію, пригнічуючи проростання насіння та ріст інших рослин у безпосередній близькості, що сприяє зменшенню конкуренції за ресурси.

Важливою є також роль кофеїну у процесах взаємодії рослин із запилювачами. Було встановлено, що невеликі концентрації кофеїну можуть міститися у нектарі квітів і впливати на поведінку комах-запилювачів, зокрема бджіл. Кофеїн підвищує здатність комах запам’ятовувати джерела нектару, що сприяє більш ефективному запиленню і, відповідно, підвищує репродуктивний успіх рослин.

Біосинтез кофеїну є складним багатостадійним процесом, який включає

послідовні реакції метилювання пуринових попередників. Основними субстратами є ксантин і його похідні, які за участю ферментів метилтрансфераз перетворюються на кофеїн. Цей процес відбувається у різних частинах рослини, проте найбільш інтенсивно - у молодих листках та насінні. Регуляція біосинтезу кофеїну здійснюється на генетичному рівні, що пояснює значні відмінності у його вмісті між різними видами рослин і навіть сортами.

Слід зазначити, що кофеїн накопичується у рослинах нерівномірно. Найбільші його концентрації спостерігаються у молодих тканинах, які є найбільш чутливими до пошкоджень. У процесі росту і розвитку рослини рівень кофеїну може змінюватися, що пов’язано з фізіологічними потребами організму. Також на вміст кофеїну впливають екологічні фактори, такі як освітлення, температура, вологість і склад ґрунту.

З точки зору впливу на організм людини, кофеїн є однією з найбільш досліджених біологічно активних речовин природного походження. Він широко використовується у харчовій промисловості та медицині. Основною мішенню дії кофеїну є центральна нервова система, де він виступає як антагоніст аденозинових рецепторів. Це призводить до стимулювального ефекту, підвищення розумової та фізичної працездатності, зменшення втоми та покращення концентрації уваги.

Кофеїн також має значення у фармакології, оскільки входить до складу багатьох лікарських препаратів, зокрема анальгетиків, де він підсилює дію активних компонентів. Крім того, його використовують у спортивній медицині як засіб для підвищення витривалості.

Вміст кофеїну у рослинній сировині залежить від багатьох факторів, включаючи вид рослини, генетичні особливості, умови вирощування, стадію розвитку та технологію обробки. Наприклад, різні види чаю характеризуються різним вмістом кофеїну, що пов’язано з особливостями ферментації та технологічної обробки листя. Також значний вплив має спосіб приготування напою, що визначає кількість кофеїну, яка переходить у розчин.

1.2. Фізико-хімічні властивості кофеїну та їх вплив на розчинність

Кофеїн (1,3,7-триметилксантин) є природною азотовмісною органічною сполукою, що належить до класу алкалоїдів пуринового ряду і характеризується складною сукупністю фізико-хімічних властивостей, які безпосередньо визначають його розчинність у різних середовищах. Його молекулярна формула $C_8H_{10}N_4O_2$, а структурна організація базується на ксантиновому ядрі з трьома метильними замісниками при атомах азоту, що істотно впливає на електронну густину молекули, її полярність, просторову конфігурацію та здатність до міжмолекулярних взаємодій. Делокалізація π-електронів у гетероциклічній системі зумовлює планарність молекули та стабілізацію електронної структури, що, у свою чергу, сприяє формуванню специфічних типів міжмолекулярної взаємодії, таких як π–π стекінг, які відіграють важливу роль як у твердому стані, так і в розчинах.

У твердому стані кофеїн існує у вигляді білих кристалів, що мають добре впорядковану кристалічну решітку. Висока температура плавлення (234–239 °C) свідчить про значну стабільність цієї структури. Молекули у кристалі утримуються переважно за рахунок слабких міжмолекулярних взаємодій — дисперсійних сил, індукційних ефектів і π–π взаємодій між ароматичними системами. Важливою особливістю є відсутність класичних донорів водневого зв’язку, що обмежує можливість утворення сильних водневих зв’язків у кристалічній фазі. Незважаючи на це, сукупність слабких взаємодій формує достатньо стабільну структуру з високою енергією кристалічної ґратки. При розчиненні необхідно подолати ці взаємодії, що робить процес енергетично затратним і обмежує швидкість та ступінь розчинення, особливо у полярних розчинниках, де енергія сольватації не повністю компенсує витрати на руйнування кристалічної структури.

З термодинамічної точки зору процес розчинення кофеїну визначається зміною вільної енергії Гіббса, яка залежить від ентальпійного та ентропійного внесків. Руйнування кристалічної решітки є ендотермічним процесом, тоді як сольватація молекул може супроводжуватися як виділенням, так і поглинанням енергії залежно від природи розчинника. У випадку води, яка характеризується сильною структурованістю завдяки водневим зв’язкам, введення молекул кофеїну

призводить до часткового порушення цієї структури, що супроводжується змінами ентропії системи. Неповна компенсація енергії руйнування кристалічної решітки енергією сольватації пояснює відносно невисоку розчинність кофеїну у воді при низьких температурах. Водночас підвищення температури сприяє збільшенню ентропійного внеску, що робить процес розчинення більш сприятливим.

Молекула кофеїну має амфіфільний характер, що обумовлено поєднанням полярних і неполярних фрагментів у її структурі. Карбонільні групи (C=O) і атоми азоту створюють області підвищеної електронної густини, здатні до диполь-дипольних взаємодій і утворення водневих зв'язків як акцептори. Однак відсутність донорів водневих зв'язків обмежує можливість утворення розгалуженої мережі гідратації, характерної для добре розчинних у воді речовин. Метильні групи, навпаки, мають гідрофобний характер і знижують загальну полярність молекули. Такий баланс між гідрофільними і гідрофобними властивостями визначає специфічну поведінку кофеїну в розчинниках різної природи та пояснює його обмежену розчинність у воді і кращу розчинність у органічних розчинниках середньої полярності.

Значення коефіцієнта розподілу кофеїну (logP близьке до нуля) свідчить про його проміжне положення між гідрофільними і ліпофільними сполуками. Це означає, що молекула кофеїну не має вираженої переваги до жодного з типів середовищ, що відображається у її розчинності. У водному середовищі розчинність обмежується недостатньою кількістю стабілізуючих взаємодій, тоді як у неполярних розчинниках — недостатньою сумісністю з їх структурою. У розчинниках середньої полярності, таких як дихлорметан або етилацетат, забезпечується оптимальний баланс взаємодій, що призводить до підвищення розчинності.

Температура є одним із найважливіших факторів, що впливають на розчинність кофеїну. Зі збільшенням температури зростає кінетична енергія молекул, що полегшує руйнування кристалічної решітки та сприяє переходу молекул у розчин. Одночасно зростає швидкість дифузії та зменшується в'язкість розчинника, що покращує масоперенесення. З термодинамічної точки зору

підвищення температури збільшує ентропію системи, що сприяє зміщенню рівноваги у бік розчиненого стану. Саме тому розчинність кофеїну у гарячій воді значно перевищує його розчинність у холодній, що має принципове значення для процесів екстракції.

Кислотно-основні властивості кофеїну визначаються електронною будовою його молекули. Атоми азоту у структурі кофеїну беруть участь у делокалізації електронної густини, що знижує їх здатність до протонування. У результаті кофеїн є дуже слабкою основою і у водному середовищі при фізіологічних значеннях pH перебуває переважно у нейтральній формі. Відомо, що іонізовані форми речовин краще розчиняються у полярних розчинниках завдяки сильним іон-дипольним взаємодіям, тому відсутність значної іонізації обмежує розчинність кофеїну у воді. У сильнокислих середовищах можливе утворення протонованих форм або солей кофеїну, які характеризуються значно вищою розчинністю. Це явище використовується у фармацевтичній практиці для створення водорозчинних лікарських форм.

Міжмолекулярні взаємодії у розчині відіграють важливу роль у визначенні розчинності кофеїну. Молекули можуть утворювати асоціати за рахунок π–π взаємодій, а також слабких диполь-дипольних взаємодій. Така асоціація може зменшувати кількість вільних молекул у розчині, що впливає на ефективну розчинність. Водночас у присутності інших речовин можливе утворення змішаних асоціатів або комплексів, які можуть як підвищувати, так і знижувати розчинність залежно від їх природи. Особливо важливими є взаємодії з поліфенольними сполуками, які здатні стабілізувати кофеїн у водному середовищі.

Природа розчинника визначає характер сольватації молекул кофеїну. У воді, яка має високу діелектричну проникність і здатність до утворення водневих зв’язків, кофеїн розчиняється обмежено через недостатню взаємодію з її структурованою мережею. У органічних розчинниках середньої полярності взаємодія є більш сприятливою, оскільки такі розчинники можуть ефективно стабілізувати як полярні, так і неполярні частини молекули. У неполярних середовищах розчинність є низькою через відсутність достатніх взаємодій з

полярними функціональними групами кофеїну. Таким чином, розчинність кофеїну визначається відповідністю між структурою молекули та властивостями розчинника.

Додатковим чинником є вплив сторонніх речовин і іонної сили розчину. Наявність електролітів може змінювати структуру води та впливати на гідратацію молекул кофеїну, що призводить до ефектів висолювання або, у деяких випадках, підвищення розчинності. Органічні сполуки, здатні до специфічних взаємодій з кофеїном, можуть утворювати комплекси, які змінюють його поведінку у розчині. Також важливим є вплив концентрації: при збільшенні концентрації кофеїну у розчині зростає ймовірність асоціації молекул, що може змінювати фізико-хімічні властивості системи.

Кінетика розчинення кофеїну також залежить від фізичних параметрів, таких як розмір частинок, ступінь подрібнення та площа поверхні контакту з розчинником. Зменшення розміру частинок призводить до збільшення площі поверхні, що прискорює процес розчинення. Крім того, перемішування системи сприяє зменшенню товщини дифузійного шару на межі розділу фаз, що також підвищує швидкість переходу молекул у розчин. У практичних умовах ці фактори мають важливе значення для оптимізації процесів екстракції кофеїну.

1.3. Хімічний склад чаю та особливості зеленого і чорного чаю

Чай (Camellia sinensis) є одним із найпоширеніших напоїв у світі, який споживають як у традиційних культурах, так і у сучасному глобальному раціоні. Його популярність пояснюється не лише смаковими й ароматичними якостями, а й наявністю біологічно активних сполук, що надають напою стимулюючих, антиоксидантних та потенційно оздоровчих властивостей. Основний хімічний склад чайного листя включає поліфеноли, алкалоїди, амінокислоти, вуглеводи, мінерали, вітаміни та леткі ароматичні сполуки. Поліфеноли, які складають приблизно 25-35 % сухої маси листя, є ключовими антиоксидантами і включають різні групи сполук: катехіни, флавоноли, флавони, антоціани та фенольні кислоти. Катехіни, зокрема епігалокатехін-3-галлат (EGCG), відповідають за захисну дію

чаю на клітини організму та підтримку антиоксидантного статусу, а також формують легку гірчинку та терпкість настою.

Серед алкалоїдів чайного листя найбільш значимим є кофеїн, який у чаї часто називають теїном. Хімічно це 1,3,7-триметилксантин, який володіє стимулюючим ефектом на центральну нервову систему. Вміст кофеїну у сухому листі зазвичай становить 2-5 % і є важливим показником фізіологічної дії напою. Кофеїн у поєднанні з амінокислотою L-теаніном, що також присутня у листі, забезпечує збалансовану стимуляцію організму: він покращує пильність, увагу та концентрацію без надмірного збудження, яке характерне для інших кофеїновмісних напоїв. L-теанін сприяє розслабленню, покращує когнітивні функції та модулює вплив кофеїну на нервову систему, що робить чай унікальним серед стимулюючих напоїв.

У складі чаю також присутні вуглеводи (у тому числі водорозчинні цукри та клітковина), мінерали (калій, магній, кальцій, фосфор, залізо) та вітаміни (B1, B2, B3, C, E), які забезпечують харчову цінність і частково впливають на смак та аромат настою. Леткі ароматичні сполуки, яких у чайному листі налічується понад 600, формують характерний запах чаю і виділяються під час заварювання або обробки листя. Вони включають альдегіди, кетони, спирти та ефіри, що утворюють складну ароматичну композицію чаю.

Різниця між зеленим і чорним чаєм визначається технологією обробки листя після збору. Зелений чай проходить мінімальну ферментацію, що дозволяє зберегти більшість катехінів, амінокислот і поліфенольних сполук. Завдяки цьому він має світлий колір настою, м’який смак та високі антиоксидантні властивості. Крім того, у зеленому чаї зберігається більше L-теаніну, що пом’якшує стимулюючий ефект кофеїну і надає напою м’який та збалансований характер. Чорний чай, навпаки, піддається повній ферментації, під час якої катехіни окислюються до теафлавінів і теарубігінів, формуючи насичений червонувато-коричневий колір і більш виражений смак. Вміст кофеїну у чорному чаї залишається стабільним, однак взаємодія з окисненими поліфенолами трохи модифікує його стимулюючу дію. Крім того, в процесі ферментації частково руйнується L-теанін, що робить чорний

чай дещо більш «енергетично активним», але менш релаксуючим у порівнянні з зеленим.

1.4. Роль ферментації у формуванні вмісту кофеїну в чаї

У процесі виробництва різних типів чаю технологічна обробка суттєво впливає на хімічний склад продукту та властивості біологічно активних сполук. Одним із ключових етапів є ферментація (ферментативне окиснення), яка визначає не лише органолептичні характеристики напою, але й особливості вивільнення алкалоїдів, зокрема кофеїну. Хоча кофеїн є відносно стабільною сполукою, характер його розподілу та доступності значною мірою залежить від глибини технологічної обробки чайного листя Camellia sinensis.

Кофеїн належить до пуринових алкалоїдів і формується ще на стадії росту рослини, тому його початковий вміст визначається генетичними та екологічними чинниками. Найбільша концентрація спостерігається у молодих пагонах і верхніх листках, що використовуються для виробництва високоякісних сортів чаю. У середньому вміст кофеїну в сухій чайній сировині становить 2–5%, і цей показник залишається відносно стабільним під час подальшої переробки.

Ферментація, яка в технології чаю є процесом ферментативного окиснення поліфенолів за участю поліфенолоксидази та пероксидази, істотно змінює склад катехінів, перетворюючи їх у теафлавіни та теарубігіни. Однак кофеїн практично не залучений до цих реакцій, що пояснюється його хімічною інертністю в умовах ферментації. Тому кількісний вміст кофеїну у різних типах чаю змінюється незначно і визначається переважно якістю вихідної сировини [1–3]. Разом з тим, ферментаційні процеси призводять до глибоких структурних змін у клітинній тканині листя, що безпосередньо впливає на екстракційні властивості кофеїну. Руйнування клітинних стінок, окиснення поліфенольних сполук і зміна колоїдної структури сприяють більш ефективному переходу кофеїну у водний настій. У зв’язку з цим ферментовані чаї (зокрема чорний чай) часто характеризуються більш інтенсивним вивільненням кофеїну під час заварювання порівняно з неферментованими (зеленими) [2,4]. Додатково слід враховувати міжмолекулярні взаємодії кофеїну з поліфенолами. У зеленому чаї кофеїн частково зв’язаний із

катехінами, що уповільнює його екстракцію. У процесі ферментації ці комплекси зазнають руйнування або трансформації, що підвищує доступність кофеїну та змінює кінетику його вивільнення [3,5].

Особливий інтерес становить мікробна ферментація, характерна для постферментованих чаїв. У цьому випадку можливі як процеси деградації кофеїну мікроорганізмами, так і його вивільнення з пов'язаних форм, що може призводити до варіацій його вмісту. Таким чином, на відміну від класичної ферментації, мікробні процеси здатні більш істотно змінювати концентрацію цього алкалоїду [4,6].

1.5. Основні чинники, що впливають на екстракцію кофеїну під час заварювання

Екстракція кофеїну під час заварювання чаю є складним фізико-хімічним процесом масопереносу, який визначається комплексною взаємодією температури, тривалості контакту сировини з розчинником, розміру частинок, співвідношення «сировина–розчинник», фізико-хімічних властивостей листя та умов проведення процесу. Одним із найважливіших чинників є температура води, яка безпосередньо впливає на розчинність кофеїну та кінетику дифузійних процесів. Дослідження в галузі екстракції показують, що підвищення температури суттєво збільшує розчинність кофеїну: при кімнатній температурі розчинність є низькою, тоді як у гарячій воді (близько 90–100 °C) вона значно зростає, що сприяє більш повному переходу кофеїну у розчин. Такий ефект обумовлений зниженням енергетичного бар'єру для молекул кофеїну та підвищенням коефіцієнта дифузії, що прискорює масоперенос з твердої фази в розчин. Таким чином, температура є основним параметром, що визначає не лише швидкість, але й повноту екстракції кофеїну.

Другим ключовим чинником є тривалість заварювання. Процес екстракції має кінетику, при якій значна частина кофеїну переходить у водний розчин уже у перші кілька хвилин контакту листя з гарячою водою, після чого швидкість переходу поступово зменшується, оскільки концентрація кофеїну у розчині наближається до рівноважного значення. У лабораторних дослідженнях встановлено, що короткий час заварювання забезпечує меншу кількість

екстрагованого кофеїну, тоді як збільшення тривалості контакту суттєво підвищує його вихід, але з дедалі меншим приростом виходу за одиницю часу. Це пов’язано з тим, що легкодоступні молекули кофеїну екстрагуються найшвидше, а подальший приплив визначається дифузією з глибших шарів твердої матриці.

Важливим технологічним параметром є розмір частинок чайного листя. Зменшення розміру частинок призводить до збільшення питомої поверхні, що підсилює контакт з розчинником і сприяє інтенсивнішій екстракції. У практичних умовах це означає, що дрібно подрібнене листя або мелена сировина екстрагується швидше і дає вищу концентрацію кофеїну в настої за один і той же час, порівняно з крупнолистовою сировиною. Співвідношення «сировина–розчинник» також відіграє суттєву роль: збільшення об’єму води на одиницю маси листя створює більший градієнт концентрації, що підсилює дифузійний потік молекул кофеїну у розчин і сприяє більшому виходу екстракції, тоді як низьке співвідношення обмежує кількість виділеного кофеїну через швидке наближення розчину до стану насичення.

Фізико-хімічні властивості чайного листя, зокрема ступінь його ферментації та технологічна обробка, також впливають на доступність кофеїну для екстракції. У ферментованому чорному чаї, де структура клітинної стінки змінена під час окиснювального процесу, доступність кофеїну може бути дещо вищою, ніж у неферментованому зеленому чаї, де частина кофеїну може бути зв’язана з поліфенолами та іншими компонентами. Це призводить до відмінностей у кінетиці екстракції та кінцевих концентраціях кофеїну в напоях, отриманих з різних сортів та видів чаю.

Умови заварювання, які включають також механічні аспекти, такі як перемішування або турбулізація середовища, суттєво впливають на процес екстракції. Інтенсивне перемішування зменшує товщину дифузійного шару біля поверхні частинок сировини, що знижує опір масопереносу та сприяє більш швидкому переходу кофеїну у розчин. Додатково, первинне промивання листя або попередній контакт з гарячою водою можуть змінювати початкову кількість доступного для екстракції кофеїну.

Не останнє значення має також хімічний склад розчинника. Хоча у побутових умовах зазвичай використовується вода, її мінералізація, жорсткість та наявність певних іонів можуть впливати на розчинність і екстракцію не лише кофеїну, але й суміжних сполук, що можуть утворювати комплекси або взаємодіяти з кофеїном. Наприклад, у жорсткій воді йони кальцію та магнію можуть утворювати комплекси з поліфенолами, що може частково змінювати доступність кофеїну для екстракції.

Загалом ефективність екстракції кофеїну визначається не одним окремим параметром, а сукупною дією фізико-хімічних і технологічних чинників. Температура та час контакту залишаються домінантними змінними, проте їхній вплив істотно модифікується розміром частинок, співвідношенням сировини до води, фізичною та хімічною структурою чайного листя, умовами перемішування та властивостями розчинника. Комплексний аналіз цих факторів дозволяє не лише пояснити механізми екстракції кофеїну, але й цілеспрямовано регулювати його вміст у готовому чаї залежно від потреб споживача або технологічних цілей.

1.6. Методи визначення вмісту кофеїну в чайних настоях

Визначення вмісту кофеїну у чайних настоях є однією з ключових задач харчової, біохімічної та фармацевтичної аналітики, оскільки кофеїн є основним біологічно активним алкалоїдом, що визначає стимулюючий ефект напою, а також має значення для оцінки якості та безпечності споживання чаю. Точне кількісне визначення кофеїну дозволяє оцінити його концентрацію у готових напоях, а також вивчати вплив технологічних параметрів заварювання, сорту та обробки чайного листя на склад настою. Наукові дослідження свідчать, що існує декілька аналітичних методів, які різняться за точністю, чутливістю, складністю та необхідним обладнанням, і вибір конкретного методу залежить від мети дослідження та ресурсів лабораторії.

Найбільш поширеним та широко визнаним методом є високоефективна рідинна хроматографія (HPLC). Цей метод забезпечує високу специфічність та точність, що дозволяє відділяти кофеїн від інших компонентів чаю, таких як поліфеноли, таніни, теофілін та інші алкалоїди. Принцип методу полягає у введенні підготовленої проби настою в хроматографічну колонку, де кофеїн розділяється на

основі взаємодії зі стаціонарною фазою та елююється за допомогою підбираного рухомого розчинника. Виявлення здійснюється найчастіше за допомогою ультрафіолетового детектора при довжині хвилі близько 273 нм. HPLC дозволяє кількісно визначати кофеїн у широкому діапазоні концентрацій з відносною похибкою менше 5 %, що робить метод стандартом для регуляторних та дослідницьких лабораторій.

Для більш швидкого та економічного аналізу часто використовується ультрафіолетова та видима спектрофотометрія (UV-Vis). Принцип методу заснований на здатності молекул кофеїну поглинати ультрафіолетове випромінювання при довжині хвилі 272–273 нм. Вміст кофеїну визначається шляхом порівняння показника поглинання настою з калібрувальною кривою, складеною за допомогою стандартних розчинів. Цей метод відрізняється швидкістю виконання, простотою та низькою вартістю, що робить його придатним для рутинного контролю та лабораторних практикумів.

Більш складними, але високочутливими є газова хроматографія (GC) та її модифікації з детекцією полум’ям (FID) або мас-спектрометрією (GC-MS). Ці методи дозволяють одночасно аналізувати кілька алкалоїдів та інші леткі компоненти, забезпечуючи високу чутливість і точність. Основним обмеженням є потреба у складній підготовці проб, а для нелетких зразків може знадобитися хімічне дериватування.

Сучасним високоточним методом є рідинна хроматографія з мас-спектрометричною детекцією (LC-MS), яка поєднує роздільну здатність HPLC з надвисокою специфічністю мас-спектрометрії. Після хроматографічного розділення кофеїн іонізується та виявляється за відношенням маси до заряду, що дозволяє кількісно визначати його навіть у складних матрицях із присутністю потенційних перешкод. LC-MS використовується переважно у наукових дослідженнях та регуляторному контролі через високу чутливість і точність. Додатково застосовуються методи тонкошарової хроматографії (TLC), капілярного електрофорезу (CE) та електрохімічні методи, такі як вольтаметрія, які забезпечують швидке та економічне визначення кофеїну у пробі, хоча мають

меншу точність і чутливість.

Точність будь-якого методу визначення кофеїну залежить від ряду факторів: правильності підготовки проби (фільтрація, розведення), наявності сторонніх речовин (поліфеноли, таніни), температури та pH настою, а також коректності використання калібрувальних стандартів та побудови калібрувальних кривих. Врахування цих факторів дозволяє коректно оцінювати реальний вміст кофеїну у напої та порівнювати його з даними літератури. Високоефективна рідинна хроматографія залишається золотим стандартом, тоді як UV-Vis та електрохімічні методи використовуються для рутинного контролю, а GC, GC-MS та LC-MS забезпечують найвищу точність та чутливість для наукових та регуляторних цілей.

Таблиця 1

Метод	**Принцип роботи**	**Переваги**	**Чутливість/діапазон**
HPLC	Розділення компонентів настою у колонці	Висока точність і специфічність, розділення кофеїну від поліфенолів і алкалоїдів	Низькі мгк/мл-десятки мг/мл
UV-Vis спектро-фотометрія	Вимірювання поглинання кофеїну	Швидкий, простий	~1-50 мг/100 мл
GC	Розділення летких компонентів у газовій колонці	Висока чутливість, аналіз кількох алкалоїдів	Декілька мгк/мл
GC-MS	GC + мас-спектрометрія	Висока специфічність, точне ідентифікування	Нг/мл
LC-MS	HPLC + мас-спектрометрія	Надвисока чутливість, точне	До нг/мл

		визначення у складних матрицях	
TLC	Розділення на пластині	Швидкий, дешевий	Мг/мл
CE	Розділення за зарядом і розміром молекул у капілярі	Швидке	Мгк/мл

РОЗДІЛ 2. ЕСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1. Характеристика досліджуваного чаю

У даному дослідженні було проаналізовано два зразки чаю ТМ «Мономах» для порівняння вмісту кофеїну та основних біологічно активних компонентів. Для зеленого чаю був обраний зразок «Exclusive Green Tea», а для чорного – «Ceylon Tea». Вибір зразків базувався на їх популярності серед споживачів та наявності у роздрібній мережі, що забезпечує репрезентативність отриманих даних.

Зелений розсипний чай використовувався у натуральному вигляді, без додаткового подрібнення, що дозволяє відтворити реальні умови приготування напою та зберегти структуру листя. Чорний пакетований чай використовувався у готовому вигляді, що відповідає умовам споживання кінцевим споживачем



Рис. 2.1. Чай МОНОМАХ "CEYLON", чорний цейлонський



Рис. 2.2. Чай МОНОМАХ "EXCLUSIVE GREEN TEA" зелений, листовий

Ідентифікація чаю торгової марки «Мономах» (зелений та чорний) за ознаками маркування дозволяє встановити відповідність продукції вимогам нормативної документації та заявленому ґатунку, а також виявити можливі невідповідності, що можуть вводити споживача в оману. Однією з ключових ідентифікаційних характеристик чаю є вид чайного листа та ступінь його обробки, які безпосередньо визначають органолептичні властивості напою, зокрема смак, аромат, колір настою та вміст біологічно активних речовин, включаючи кофеїн і поліфенольні сполуки. Для зеленого чаю характерною є мінімальна ферментація (або її відсутність), що дозволяє зберігати більш виражені антиоксидантні властивості та світліший колір настою, тоді як чорний чай проходить повний процес ферментації, що зумовлює більш насичений смак, темний колір та інший профіль хімічних сполук.

Наявність достовірної інформації про тип чаю (зелений або чорний), форму випуску (пакетований чи розсипний), а також походження сировини на маркуванні є важливою умовою ідентифікації та підтвердження якості продукції. У випадку продукції Мономах зелений чай зазвичай представлений у вигляді цільнолистового або слабкоподрібненого листа, тоді як чорний чай частіше може бути як розсипним, так і пакетованим, із більш інтенсивним ступенем подрібнення сировини. Водночас варто зазначити, що рецептури та купажі чайної продукції можуть відрізнятися залежно від виробничих підходів, і не завжди є уніфікованими для всіх торгових позицій.

Проведено аналіз маркування найбільш поширених зразків зеленого та чорного чаю торгової марки Мономах, що реалізуються на споживчому ринку, відповідно до вимог Технічного регламенту щодо правил маркування харчових продуктів, з метою оцінки повноти інформації та її відповідності встановленим нормам.

Таблиця 2.1

Аналіз маркування чаю МОНОМАХ "CEYLON"

Назва продукту	МОНОМАХ "CEYLON"

Склад продукту	Чай чорний байховий цейлонський дрібний
Сорт	Вищий
Країна походження сировини	Шрі-Ланка
Ґатунок	-
Маса нетто пакувальної одиниці	37,5 г
Умови зберігання	Зберігати у сухих, чистих, добре вентильованих приміщеннях, які не мають стороннього запаху, за відносної вологості повітря не більше ніж 70%
Термін придатності	28.10.2028
Спосіб приготування	+
Поживна (харчова) цінність 100 г продукту	-
Енергетична цінність (калорійність) 100 г продукту	-
Найменування та місцезнаходження виробника	АТ «Мономах», вул. Комунальна 10, смт В. Димерка, Броварський р-н, Київська обл, 07442, Україна
Найменування та місцезнаходження підприємства, що здійснює функції щодо прийняття претензій від споживача	АТ «Мономах», вул. Комунальна 10, смт В. Димерка, Броварський р-н, Київська обл, 07442, Україна
Позначення стандарту	-
Номер партії виробництва	L8
Інформація про ГМО	-

Таблиця 2.2

Аналіз маркування чаю МОНОМАХ "EXCLUSIVE GREEN TEA"

Назва продукту	МОНОМАХ "EXCLUSIVE GREEN TEA"
Склад продукту	Чай китайський зелений байховий листовий
Сорт	Вищий
Країна походження сировини	Китай
Ґатунок	-
Маса нетто пакувальної одиниці	90 г
Умови зберігання	Зберігати у сухих, чистих, добре вентильованих приміщеннях, які не мають стороннього запаху, за відносної вологості повітря не більше ніж 70%
Термін придатності	31.12.2028
Спосіб приготування	+
Поживна (харчова) цінність 100 г продукту	-
Енергетична цінність (калорійність) 100 г продукту	-
Найменування та місцезнаходження виробника	АТ «Мономах», вул. Комунальна 10, смт В. Димерка, Броварський р-н, Київська обл, 07442, Україна
Найменування та місцезнаходження підприємства, що здійснює функції щодо прийняття претензій від споживача	АТ «Мономах», вул. Комунальна 10, смт В. Димерка, Броварський р-н, Київська обл, 07442, Україна
Позначення стандарту	-
Номер партії виробництва	L1
Інформація про ГМО	-

У межах проведеного дослідження здійснено аналіз інформації, зазначеної на упаковці зеленого та чорного чаю торгової марки «Мономах», з метою встановлення її повноти, достовірності та інформативності для споживача.

Серед досліджуваних зразків чорний чай цейлонський пакетований містить базову інформацію про ботанічний вид сировини — чорний байховий чай, а також вказівку на походження (Цейлон / Шрі-Ланка). Додатково на маркуванні наведено форму випуску (фільтр-пакети), масу нетто та стандартні умови зберігання. Водночас у більшості випадків відсутня деталізація щодо ґатунку чайного листа, ступеня подрібнення та конкретного сорту сировини. Також не зазначається масова частка кофеїну, що не дозволяє споживачеві оцінити його можливий фізіологічний вплив та регулювати рівень споживання.

Зелений чай розсипний торгової марки «Мономах» характеризується зазначенням виду сировини — зелений байховий чай, а також формою випуску (розсипний). У деяких зразках може бути вказано країну походження чайного листа (переважно Китай), однак така інформація не завжди є деталізованою. Відсутні дані щодо сорту, ґатунку та ступеня стандартизації листа, що ускладнює повноцінну ідентифікацію якісної категорії продукту. Як і у випадку чорного чаю, не зазначається вміст кофеїну та поліфенольних сполук, які є важливими показниками фізіологічної цінності напою.

Для обох досліджуваних зразків чаю торгової марки «Мономах» на маркуванні, як правило, присутні обов’язкові елементи, такі як назва продукту, маса нетто, термін придатності, умови зберігання та дані про виробника. Водночас спостерігається недостатній рівень деталізації інформації щодо хімічного складу та якісних характеристик сировини, що знижує інформативність маркування для споживача.

Загалом, аналіз показав, що маркування чаю не містить повної інформації про ботанічний сорт, ступінь обробки та кількісний вміст біологічно активних речовин, зокрема кофеїну. Це обмежує можливості споживача щодо усвідомленого вибору продукту з урахуванням індивідуальної чутливості до компонентів чаю.

Таким чином, доцільним є удосконалення підходів до маркування чайної

продукції шляхом запровадження більш детальної інформації про походження сировини, її сортність, ступінь обробки, а також кількісний вміст основних біологічно активних речовин, що дозволить підвищити прозорість ринку та рівень інформованості споживачів.

2.2. Екстракція кофеїну з чорного та зеленого чаю в залежності часу заварювання

Екстракція кофеїну з рослинної сировини чаю є складним фізико-хімічним процесом, що визначається дифузією розчинних речовин із листя Camellia sinensis у водний екстрагент. Серед ключових факторів, які впливають на швидкість і ступінь переходу кофеїну у розчин, особливе значення має час заварювання, оскільки саме він визначає глибину вилучення біологічно активних компонентів із рослинної матриці.

Кофеїн є відносно добре розчинною у гарячій воді сполукою, тому вже на початкових етапах заварювання відбувається його інтенсивний перехід у настій. Проте процес екстракції не є миттєвим і залежить від структури чайного листа, ступеня його ферментації та обробки, що суттєво відрізняє чорний і зелений чай.

Для зеленого чаю, який не проходить повної ферментації, клітинні структури листа частково зберігаються, що може дещо уповільнювати вихід кофеїну у перші хвилини заварювання. Водночас відсутність глибоких полімеризованих сполук дозволяє досягати відносно рівномірної екстракції вже на ранніх етапах (1–3 хвилини). Подальше збільшення часу настоювання (до 5–7 хвилин) призводить до поступового зростання концентрації кофеїну, однак приріст стає менш інтенсивним через наближення системи до рівноважного стану.

Чорний чай, навпаки, проходить повну ферментацію, під час якої відбувається руйнування клітинних стінок та утворення складних поліфенольних комплексів. Це сприяє більш швидкому виходу розчинних речовин, включаючи кофеїн, у водний розчин. У перші 2–4 хвилини заварювання спостерігається найбільш активна екстракція. Подальше збільшення часу (5–10 хвилин) призводить до зростання концентрації кофеїну, але одночасно може супроводжуватися надмірним вилученням дубильних речовин, що впливає на органолептичні

властивості напою.

З точки зору кінетики процесу, екстракцію кофеїну можна розглядати як дифузійно-контрольований процес, де градієнт концентрації між твердою фазою (чайним листом) і рідкою фазою (водою) поступово зменшується з часом. На початковому етапі швидкість екстракції є максимальною, оскільки різниця концентрацій велика. Зі збільшенням часу заварювання швидкість знижується і система наближається до рівноваги, при якій подальше збільшення часу майже не впливає на вміст кофеїну.

Об'єкти і методи дослідження

Об'єктами дослідження були зразки чорного пакетованого та зеленого листового чаю промислового виробництва торговельної марки «Monomax» (Україна), придбані у роздрібній торговельній мережі. Для приготування водних екстрактів використовувала 1,5 г зеленого чаю та один пакетик чорного чаю на 100 мл дистильованої води.

Екстракцію кофеїну проводила у два послідовні етапи. На першому етапі здійснювала заварювання чайної сировини водою за температури 90 °С при різній тривалості настоювання - 2, 5 та 10 хв. Після завершення процесу заварювання отримані настої об'ємом 100 мл охолоджувала до кімнатної температури природним шляхом (рис. 2.3).На другому етапі охолоджені водні екстракти переносила у роздільну лійку та додавала 33 мл етилацетату як органічного екстрагента. Виділення кофеїну здійснювала методом рідинно-рідинної екстракції шляхом триразового інтенсивного перемішування фаз (рис. 2.4). Після кожного циклу екстракції органічний шар відокремлювала, а отримані етилацетатні екстракти об'єднували для подальшого аналітичного дослідження.



Рис.2.3. Охолодження чаю



Рис.2.4. Розділення фаз настою чаю та етилацетату в ділильних лійках

Кількісне визначення вмісту кофеїну у водних екстрактах здійснювала методом УФ-спектрофотометрії за довжини хвилі 270 нм. Концентрацію кофеїну розраховувала за калібрувальною залежністю, побудованою з використанням

стандартних розчинів чистого кофеїну.

Результати

Для побудови калібрувальної залежності готувала серію стандартних розчинів кофеїну різної концентрації. Маточний розчин одержувала розчиненням 1 мг чистого кофеїну у 25 мл дистильованої води, що відповідало концентрації 0,04 мг/мл. Із маточного розчину шляхом послідовного розведення готувала стандартні розчини з концентраціями у межах 0,000625–0,0025 мг/мл.

Вимірювання оптичної густини стандартних розчинів проводила методом УФ-спектрофотометрії при довжині хвилі 270 нм відносно холостої проби. На основі отриманих результатів будувала калібрувальний графік залежності оптичної густини від концентрації кофеїну (рис. 2.5.). Побудована калібрувальна пряма була використана для визначення концентрації кофеїну у досліджуваних настоях шляхом підстановки експериментально отриманих значень оптичної густини у відповідне рівняння регресії.

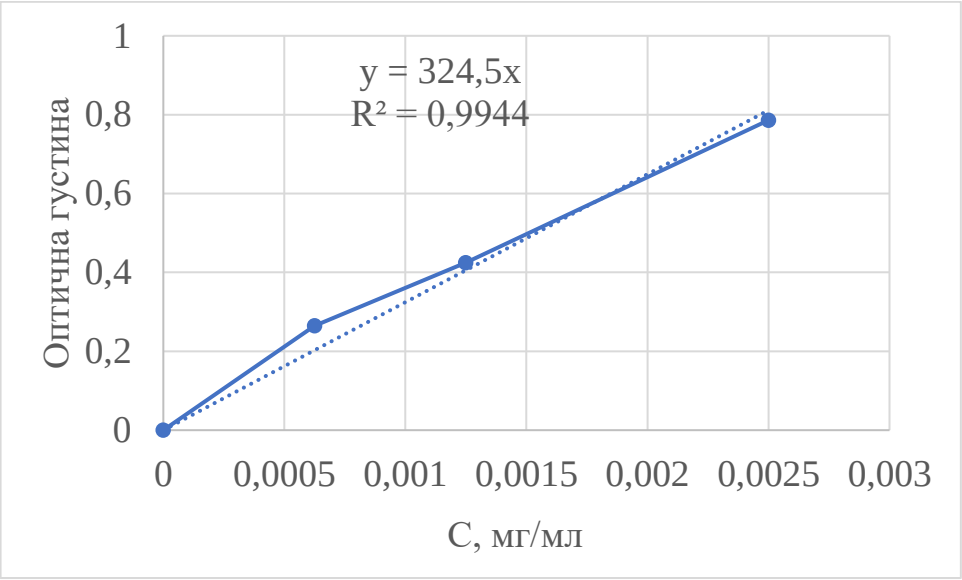


Рис 2.5. Графік залежності оптичної густини від концентрації стандартного розчину кофеїну

У таблиці 2.3 наведено концентрації кофеїну у водних настоях чорного та зеленого чаю залежно від часу заварювання.

Таблиця 2.3

Час заварювання, хв	Концентрація кофеїну у чорному чаї, мг/мл	Концентрація кофеїну у зеленому чаї, мг/мл
2	1,4	0,93
5	2,2	2,53
10	7,3	6

За результатами проведеного спектрофотометричного дослідження встановлено залежність концентрації кофеїну у водних настоях чорного та зеленого чаю від тривалості заварювання. Виявлено, що зі збільшенням часу настоювання відбувається підвищення вмісту екстрагованого кофеїну.

Для чорного чаю концентрації кофеїну становила 1,4; 2,2 та 7,33 мг відповідно. У настоях зеленого чаю аналогічні показники склали 0,93; 2,23 та 6 мг (рис. 2.6). Отримані дані підтверджують, що тривалість заварювання є одним із ключових факторів, який визначає інтенсивність екстракції кофеїну з чайної сировини.

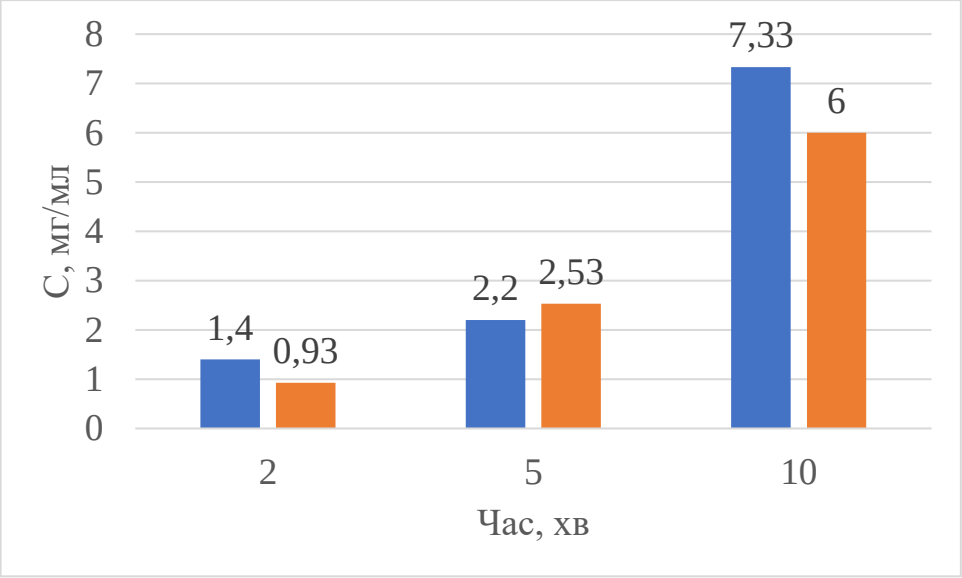


Рис.2.6. Графік залежності концентрації кофеїну від часу заварювання для чорного та зеленого чаю при температурі 90°С

Порівняння експериментальних результатів із даними літературних джерел засвідчило їхню загальну відповідність як за характером залежності «вміст кофеїну - тривалість заварювання», так і за порядком отриманих значень. При цьому слід

зазначити, що в роботах, використаних для порівняння, об’єктами дослідження слугували комерційні зразки чорного та зеленого чаю торговельних марок Lipton та Ahmad Tea. Для коректного зіставлення літературні дані щодо концентрації було подано у вигляді усереднених значень, отриманих авторами на основі серії паралельних вимірювань (рис. 2.7).

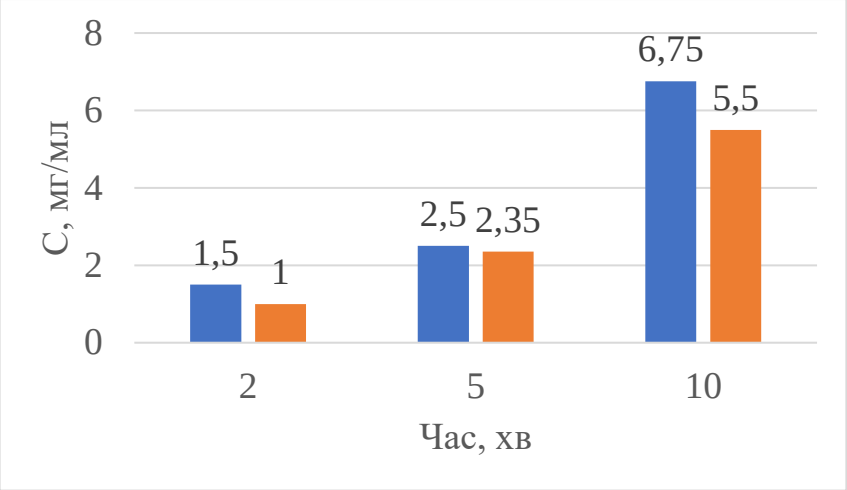


Рис 2.7. Графік залежності концентрації кофеїну від часу заварювання для чорного та зеленого чаю за літературними даними(взято середнє значення)

У наведених дослідженнях екстракцію кофеїну здійснювали методом водного заварювання: чайну наважку заливали гарячою водою (приблизно 100 °C) та витримували протягом 2–10 хв, після чого настій відділяли від твердої фази шляхом фільтрування або декантації і охолоджували до кімнатної температури. Кількісне визначення кофеїну проводили методом ультрафіолетової спектрофотометрії з реєстрацією оптичної густини при довжині хвилі 270 нм. Таким чином, літературні підходи базуються на безпосередньому аналізі водного настою після екстракції.

Як видно з порівняльних даних, чорний чай характеризується вищим вмістом кофеїну порівняно із зеленим за однакових умов заварювання, особливо при збільшенні тривалості екстракції, що чітко відображено на графічній залежності. Отримана закономірність узгоджується з літературними відомостями та пояснюється особливостями технологічної обробки чайного листя: у процесі виробництва чорного чаю ферментаційні перетворення змінюють структуру рослинної тканини, що сприяє підвищенню доступності кофеїну для переходу у

водну фазу.

Водночас експериментальна методика, застосована в даній роботі, відрізняється від класичного літературного підходу етапом підготовки проби. Після водного заварювання додатково проводили рідинно-рідинну екстракцію в роздільній лійці з етилацетатом, що забезпечувало перенесення кофеїну з водного настою в органічну фазу та часткове видалення супутніх матричних компонентів (поліфенолів, пігментів та інших екстрактивних речовин). Це є важливим, оскільки при прямому аналізі водного настою, як у літературних роботах, матричні домішки можуть впливати на оптичну густину та знижувати точність визначення.

Після розділення фаз органічний екстракт, що містив кофеїн, використовували для подальшого спектрофотометричного аналізу при 270 нм. Застосування рідинно-рідинної екстракції з етилацетатом підвищує селективність і відтворюваність методики та зменшує вплив матричних ефектів, однак при порівнянні з літературними даними це слід враховувати як можливу причину кількісних розбіжностей. Незважаючи на відмінності у підготовці проб, загальна тенденція зміни вмісту кофеїну залежно від часу заварювання, а також співвідношення між чорним і зеленим чаєм, повністю узгоджуються з результатами наукових публікацій.

2.3. Екстракція кофеїну з чорного та зеленого чаю в залежності температури заварювання

Температура заварювання є одним із визначальних факторів, що впливає на інтенсивність екстракції біологічно активних речовин із рослинної сировини, зокрема кофеїну. У межах дослідження використано зразки чаю торговельної марки «Мономах»: чорний пакетований та зелений розсипний. Обидва зразки отримані з листя рослини *Camellia sinensis*, однак відрізняються технологією обробки, що зумовлює різну структуру сировини та особливості переходу кофеїну у водний розчин.

Кінетика екстракції кофеїну визначається не лише температурним режимом, але й фізико-хімічними властивостями системи та станом рослинної матриці. Підвищення температури сприяє інтенсифікації дифузійних процесів і

прискоренню масопереносу, що призводить до зростання концентрації кофеїну в настої. Водночас різний ступінь технологічної обробки чорного та зеленого чаю зумовлює відмінності у швидкості встановлення рівноваги в системі «сировина–екстрагент».

Для оцінювання впливу температури та тривалості заварювання на інтенсивність екстракції кофеїну було проведено порівняльний аналіз водних настоїв чаю торговельної марки «Мономах» при температурах 80 °С та 90 °С. Дослідження виконувалося для зразків чорного пакетованого та зеленого розсипного чаю. Експериментальні дані фіксувалися для тривалості заварювання 2, 5 та 10 хвилин, що дозволило оцінити динаміку накопичення кофеїну в настої залежно від часу екстракції.

Результати визначення вмісту кофеїну за температури 80 °С наведено у таблиці 2.4. Для наочності отриманих даних побудовано окремі діаграми зміни концентрації кофеїну залежно від часу заварювання для чорного та зеленого чаю (рис. 2.8–2.9). Графічні залежності дозволяють оцінити динаміку екстракції кофеїну в межах кожного виду чаю за температури 80 °С.

Таблиця 2.4

Час заварювання, хв	Концентрація кофеїну у чорному чаї, мг/мл	Концентрація кофеїну у зеленому чаї, мг/мл
2	1,06	1
5	2,46	2,36
10	2,62	2,4

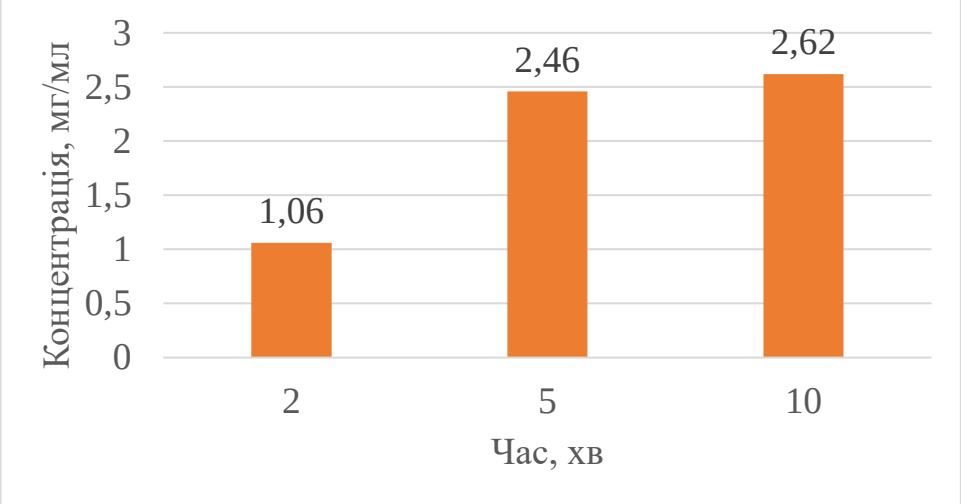


Рис.2.8 Графік залежності концентрації кофеїну у чорному чаї залежно від часу при температурі 80°С

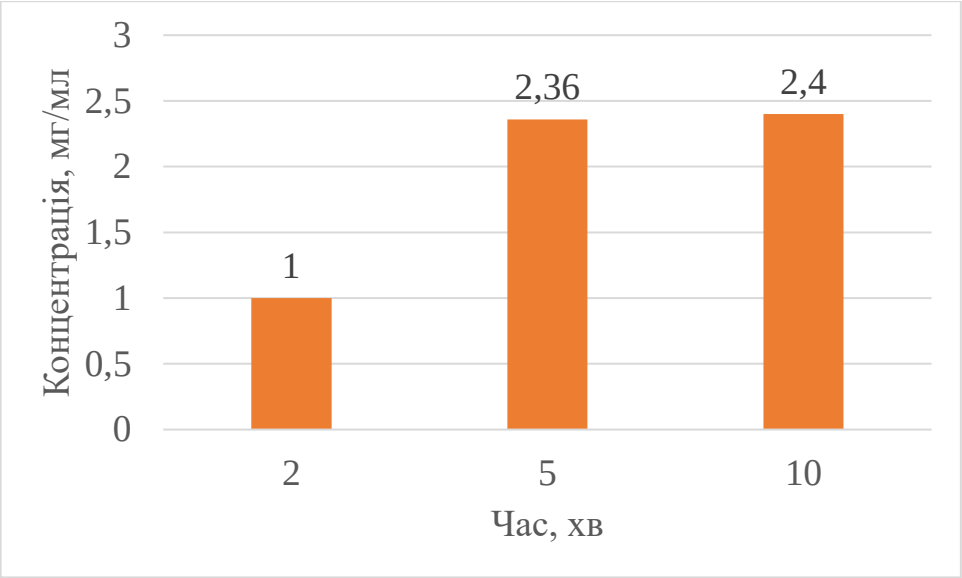


Рис.2.9 Графік залежності концентрації кофеїну у зеленому чаї залежно від часу при температурі 80°С

З метою подальшого порівняльного аналізу впливу температурного режиму додатково побудовано діаграми, які відображають зміну концентрації кофеїну при температурах 80 °C та 90 °C окремо для чорного і зеленого чаю (рис. 2.10–2.11). Отримані результати дають змогу порівняти ефективність вилучення кофеїну та встановити закономірності його екстракції залежно від температури заварювання.

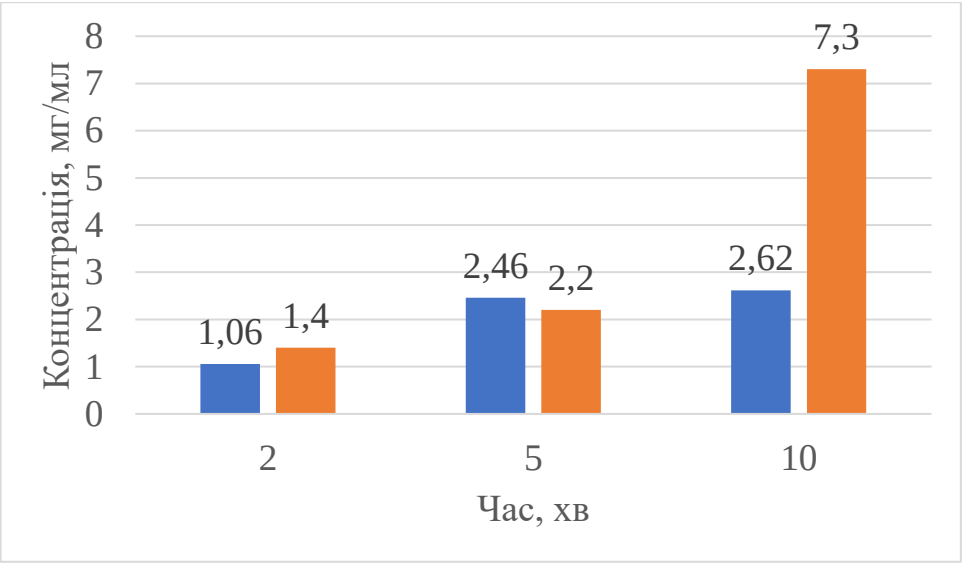


Рис.2.10. Графік порівняння концентрації кофеїну у чорному чаї залежно від часу при температурах 80°С і 90°С

Аналіз отриманих результатів показав, що концентрація кофеїну в чорному чаї залежить як від температури, так і від тривалості настоювання. Із збільшенням часу екстракції спостерігається підвищення концентрації кофеїну для обох температурних режимів. При температурі 80° С зростання концентрації є поступовим і становить 1,06 мг/мл при 2 хв настоювання; 2,46 мг/мл – 5 хв; 2,62 мг/мл – 10 хв. Для температури 90° С екстракція кофеїну відбувається інтенсивніше. Особливо суттєве підвищення концентрації спостерігається після 10 хвилин настоювання, де показник досягає 7,3 мг/мл, що майже у три рази перевищує значення при 80°С за аналогічного часу.

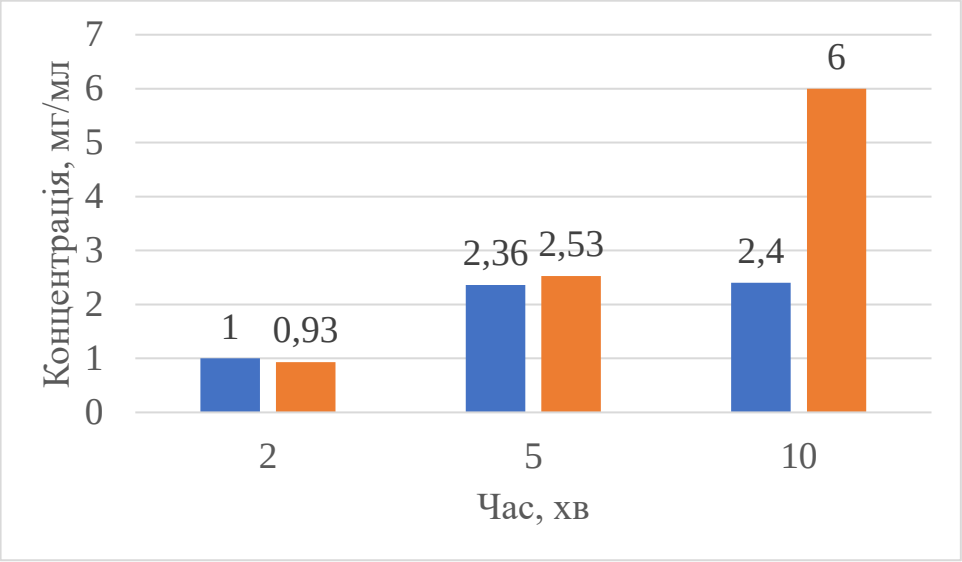


Рис.2.11. Графік порівняння концентрації кофеїну у зеленому чаї залежно від часу при температурах 80°С і 90°С

Проведений аналіз показав, що концентрація кофеїну в зеленому чаї визначається температурою води та тривалістю настоювання. Із збільшенням часу екстракції спостерігається підвищення концентрації при двох температурах. При температурі 80°С зростання концентрації є поступовим і становить 1 мг/мл при 2 хв; 2,36 мг/мл – 5 хв ; 2,4 мг/мл – 10 хв. Для температури 90°С екстракція кофеїну відбувається інтенсивніше. Особливо помітне підвищення концентрації спостерігається після 10 хв настоювання, де показник досягає 6 мг/мл, що значно перевищує значення при 80°С за аналогічного часу.

Отримані результати свідчать про те, що підвищення температури води інтенсифікує процес екстракції кофеїну, тоді як збільшення тривалості

заварювання сприяє підвищенню ступеня переходу кофеїну у розчин. Таким чином, температура та час екстракції є визначальними факторами, що впливають на концентрацію кофеїну як у чорному, так і в зеленому.

2.4. Екстракція кофеїну із застосуванням ультразвуку

Ультразвукова екстракція є одним із сучасних методів інтенсифікації процесів вилучення біологічно активних речовин із рослинної сировини. Використання ультразвуку в екстракційних процесах ґрунтується на явищі акустичної кавітації, що супроводжується утворенням і руйнуванням мікропухирців у рідкому середовищі. У результаті цього відбувається локальне підвищення температури та тиску, що сприяє руйнуванню клітинних структур сировини та прискоренню масопереносу між твердою і рідкою фазами.

Застосування ультразвукової обробки дозволяє підвищити ефективність вилучення кофеїну та інших екстрактивних речовин порівняно з традиційним способом заварювання. Під дією ультразвукових хвиль покращується проникнення розчинника в рослинну матрицю, збільшується площа контакту між сировиною та екстрагентом, а також прискорюється дифузія розчинних компонентів у водне середовище.

Ефективність ультразвукової екстракції залежить від низки факторів, серед яких важливе значення мають частота та потужність ультразвуку, температура процесу, тривалість обробки та співвідношення між сировиною і екстрагентом. Оптимізація цих параметрів дозволяє інтенсифікувати процес екстракції та скоротити час отримання екстракту без суттєвих втрат цільових компонентів.

З метою дослідження впливу ультразвукової обробки на процес вилучення кофеїну було проведено екстракцію чорного чаю торговельної марки «Мономах» тривалістю 5 та 7 хвилин. Отримані результати дозволяють оцінити ефективність ультразвукової екстракції та встановити залежність вмісту кофеїну від тривалості обробки.

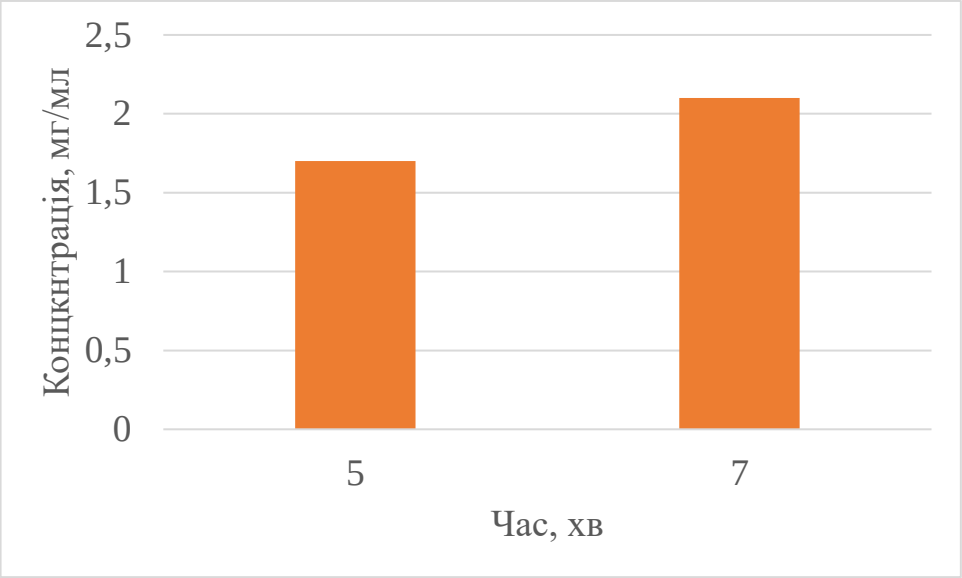


Рис. 2.12. Порівняння вмісту кофеїну при ультразвуковій екстракції чорного чаю тривалістю 5 та 7 хвилин при температурі 60 °С

За результатами ультразвукової екстракції чорного чаю встановлено, що зі збільшенням тривалості обробки від 5 до 7 хвилин концентрація кофеїну зростає з 1,7 до 2,1. Це свідчить про інтенсифікацію процесу вилучення під дією ультразвуку та підвищення ступеня переходу кофеїну у водний розчин із часом.

Отримана закономірність підтверджує, що збільшення тривалості ультразвукової обробки сприяє більш повному руйнуванню структури рослинної сировини та покращенню масопереносу, що в результаті забезпечує підвищення ефективності екстракції кофеїну.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження встановлено закономірності екстракції кофеїну з чорного та зеленого чаю за різних температурно-часових режимів та за умов застосування ультразвукової інтенсифікації процесу. Показано, що температура заварювання є одним із визначальних кінетичних факторів екстракції, оскільки її підвищення з 80 °C до 90 °C забезпечує інтенсифікацію масопереносу між твердою та рідкою фазами, що проявляється у зростанні концентрації кофеїну у водних настоях. Це обумовлено збільшенням швидкості дифузійних процесів, зниженням в’язкості екстрагента та покращенням проникнення розчинника в рослинну матрицю.

Встановлено, що тривалість екстракції (2, 5 та 10 хвилин) суттєво впливає на ступінь вилучення кофеїну, при цьому зі збільшенням часу контакту фаз спостерігається поступове накопичення цільового компонента в настої та наближення системи до стану динамічної рівноваги «сировина–екстрагент». Найбільш інтенсивне зростання концентрації характерне для початкових етапів екстракції, після чого швидкість процесу знижується внаслідок вичерпання легкоекстрагованої фракції речовин.

У ході дослідження також проаналізовано вплив ультразвукової обробки на процес вилучення кофеїну. Встановлено, що зі збільшенням тривалості ультразвукової екстракції з 5 до 10 хвилин концентрація кофеїну зростає лише незначно - з 1,7 до 2,1, що свідчить про низьку ефективність ультразвукової інтенсифікації за досліджуваних умов. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що застосування ультразвукової обробки не забезпечує суттєвого підвищення ступеня вилучення кофеїну порівняно з традиційним способом екстракції.

Виявлено, що чорний чай характеризується вищою інтенсивністю та швидкістю екстракції кофеїну порівняно із зеленим чаєм. Це пояснюється особливостями технологічної обробки сировини, зокрема ступенем ферментації, який зумовлює більш глибокі структурні зміни клітинних стінок та підвищену проникність рослинної матриці для екстрагента.

Узагальнено, що найбільш ефективне вилучення кофеїну забезпечується за умов комплексного впливу підвищеної температури, оптимальної тривалості екстракції та застосування ультразвукової обробки, що вказує на синергічний характер дії технологічних факторів та дозволяє підвищити ефективність процесу вилучення біологічно активних речовин із чайної сировини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Astill C., Birch M. R., Dacombe C., Humphrey P. G., Martin P. T. Factors affecting caffeine and polyphenols in tea infusions // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2001.
2. Khokhar S., Magnusdottir S. G. Total phenol, catechin, and caffeine contents of teas commonly consumed in the United Kingdom // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2002.
3. Graham H. N. Green tea composition, consumption, and polyphenol chemistry // Preventive Medicine. – 1992.
4. Harbowy M. E., Balentine D. A. Tea chemistry // Critical Reviews in Plant Sciences. – 1997.
5. Cabrera C., Artacho R., Giménez R. Beneficial effects of green tea — a review // Journal of the American College of Nutrition. – 2006.
6. Friedman M. Overview of antibacterial, antiviral and antioxidant activities of tea compounds // Molecular Nutrition & Food Research. – 2007.
7. Heckman M. A., Weil J., de Mejia E. G. Caffeine in foods and beverages // Food Chemistry. – 2010.
8. Lin Y. S., Tsai Y. J., Tsay J. S., Lin J. K. Factors affecting the levels of tea polyphenols and caffeine in tea leaves // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2003.
9. Liang Y., Xu Y. Effect of extraction conditions on tea catechins and caffeine // Food Chemistry. – 2003.
10. Vuong Q. V., Golding J. B., Nguyen M., Roach P. D. Extraction and isolation of catechins from tea // Journal of Separation Science. – 2010.
11. Horžić D., Komes D., Belščak A., Ganić K. K., Iveković D., Karlović D. The composition of polyphenols and methylxanthines in teas and herbal infusions // Food Chemistry. – 2009.
12. Komes D. et al. Determination of caffeine content in tea and mate tea by different methods // Czech Journal of Food Sciences. – 2009.
13. Turkmen N., Sari F., Velioglu Y. S. Effects of extraction solvents on tea

polyphenols // Food Chemistry. – 2006.

14. Yang D. J., Hwang L. S. Conversion kinetics of catechins during processing // Food Research International. – 2009.
15. Sharangi A. B. Medicinal and therapeutic aspects of tea // Food Reviews International. – 2009.
16. Hicks M. B., et al. Tea infusion kinetics and extraction behavior // Journal of Food Science. – 1996.
17. Spiro M., Jago D. Extraction of tea solutes during brewing // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 1982.
18. Yang Z., Baldermann S., Watanabe N. Recent studies on tea chemistry // Food Research International. – 2013.
19. Muzykiewicz A., Zielonka-Brzezicka J., Klimowicz A. Influence of brewing time on caffeine content in tea infusions // Herba Polonica. – 2011.
20. Peng S. et al. Effect of temperature on tea extraction efficiency // Food Chemistry. – 2008.
21. Baptista J. A. et al. Influence of brewing conditions on tea composition // Food Chemistry. – 1998.
22. Liang H. et al. Control of epimerization of tea catechins during extraction // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2007.
23. Zuo Y. et al. Kinetics of tea infusion extraction // Analytica Chimica Acta. – 2002.
24. Abeywickrama K. et al. Effect of brewing parameters on tea composition // Food Chemistry. – 2019.
25. Bryant C. M. Tea steeping and solubility behavior // Food Chemistry. – 2014.
26. Fuller M., Rao N. Modelling of tea extraction processes // Journal of Food Engineering. – 2017.
27. Wang L., Weller C. Nutraceutical extraction from plant materials // Trends in Food Science & Technology. – 2006.
28. Vinatoru M. An overview of ultrasound-assisted extraction // Ultrasonics Sonochemistry. – 2001.
29. Chemat F., Vian M. A. Ultrasound assisted extraction of food compounds //

Ultrasonics Sonochemistry. – 2011.

30. Rostagno M. A. Ultrasonic processing of natural products // Trends in Analytical Chemistry. – 2015.
31. Zhang Q. et al. Ultrasound-assisted extraction mechanisms // Separation and Purification Technology. – 2018.
32. Da Porto C. et al. Ultrasound applications in food extraction // Innovative Food Science and Emerging Technologies. – 2013.
33. Pingret D. et al. Green extraction technologies // Food Research International. – 2012.
34. Albu S. et al. Ultrasound-assisted plant extraction // Journal of Food Engineering. – 2004.
35. Muthukumaran S. Review of ultrasound food processing // Food and Bioproducts Processing. – 2006.
36. Vilkhu K. et al. Applications of ultrasound in food industry // Innovative Food Science and Emerging Technologies. – 2008.
37. Mason T. J. Sonochemistry and ultrasound applications // Ultrasonics Sonochemistry. – 2002.