

УДК 663.4:577.1:544.6:641.5

**Бужанська М. В.,**  
*buganskam@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-9251-4727,*  
*Researcher ID: G-2366-2019,*  
*к.х.н., доц., доцент кафедри харчових технологій,*  
*Львівський торговельно-економічний університет, м. Львів*

## **МОЛЕКУЛЯРНА ГАСТРОНОМІЯ ПИВА ЯК ІНТЕГРАЦІЯ БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПІДХОДІВ У СУЧАСНЕ КУЛІНАРНЕ МИСТЕЦТВО**

**Анотація.** У сучасних умовах розвитку ресторанного господарства та інноваційних харчових технологій зростає інтерес до використання методів молекулярної гастрономії для створення продуктів із новими текстурними та сенсорними характеристиками. Одним із перспективних напрямів є використання пива як функціональної сировини для формування структурованих гастрономічних систем. Метою дослідження є аналіз фізико-хімічних властивостей пива та обґрунтування можливості його використання у технологіях молекулярної гастрономії, зокрема під час отримання пивних сфер методом сферифікації. У роботі застосовано методи теоретичного аналізу, узагальнення та систематизації сучасних наукових даних щодо хімічного складу, колоїдних властивостей та механізмів структуроутворення в багатокомпонентних харчових системах. Проаналізовано особливості хімічного складу пива як складної колоїдної системи, що містить білки, поліпептиди, поліфеноли, органічні кислоти, ізо- $\alpha$ -кислоти хмелю, леткі ароматичні сполуки та розчинений карбон (IV) оксид. Встановлено, що сукупність зазначених компонентів зумовлює поверхнево-активні, піноутворюючі та структуроутворюючі властивості пива, які можуть бути використані у технологіях молекулярної гастрономії. Показано, що процес сферифікації пива ґрунтується на механізмі зовнішнього йонного гелеутворення внаслідок взаємодії натрій альгінату з йонами кальцію з утворенням кальцій-альгінатної структури за механізмом «egg-box». Визначено основні фізико-хімічні фактори, що впливають на ефективність формування пивних сфер, зокрема кислотність середовища, вміст розчиненого карбон (IV) оксиду, концентрацію гелеутворювача, йонів кальцію та реологічні характеристики системи. Обґрунтовано доцільність застосування методу зворотної сферифікації для отримання стабільних пивних сфер із рідким ядром та вираженими сенсорними властивостями. Наукова новизна роботи полягає в узагальненні та систематизації фізико-хімічних закономірностей процесу сферифікації пива як багатокомпонентної колоїдної системи. Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості їх використання під час розроблення інноваційної продукції для закладів ресторанного господарства.

**Ключові слова:** пиво, молекулярна гастрономія, сферифікація, альгінат натрію, йонне гелеутворення, колоїдна система, пивні сфери, структуроутворення.

**Buzhanska M. V.,**  
*buganskam@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-9251-4727*  
*Researcher ID: G-2366-2019*  
*Ph.D, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Food Technologies,*  
*Lviv University of Trade and Economics, Lviv*

## **MOLECULAR GASTRONOMY OF BEER AS AN INTEGRATION OF BIOTECHNOLOGICAL AND PHYSICOCHEMICAL APPROACHES INTO MODERN CULINARY ART**

**Abstract.** In the context of the development of the restaurant industry and innovative food technologies, increasing attention is being paid to the application of molecular gastronomy techniques for the creation of products with novel textural and sensory characteristics. One of the promising approaches is the use of beer as a functional raw material for the development of structured gastronomic systems. The aim of this study was to analyze the physicochemical properties of beer and to substantiate the feasibility of its application in

*molecular gastronomy technologies, particularly in the production of beer spheres using the spherification method. The study employed methods of theoretical analysis, generalization, and systematization of current scientific data concerning the chemical composition, colloidal properties, and structure-forming mechanisms in multicomponent food systems. The peculiarities of the chemical composition of beer as a complex colloidal system containing proteins, polypeptides, polyphenols, organic acids, hop iso- $\alpha$ -acids, volatile aromatic compounds, and dissolved carbon dioxide were analyzed. It was found out that the combination of these components determines the surface-active, foam-forming, and structure-forming properties of beer, which can be effectively utilized in molecular gastronomy technologies. It was demonstrated that the beer spherification process is based on the mechanism of external ionic gelation resulting from the interaction between sodium alginate and calcium ions, leading to the formation of a calcium alginate structure according to the "egg-box" model. The main physicochemical factors affecting the efficiency of beer sphere formation were identified, including medium acidity, dissolved carbon dioxide content, concentrations of the gelling agent and calcium ions, as well as the rheological properties of the system. The feasibility of applying the reverse spherification method for obtaining stable beer spheres with a liquid core and pronounced sensory properties was substantiated. The scientific novelty of the study lies in the generalization and systematization of the physicochemical principles governing the spherification of beer as a multicomponent colloidal system. The practical significance of the obtained results consists in the possibility of their application in the development of innovative products for the restaurant industry.*

**Key words:** beer; molecular gastronomy, spherification, sodium alginate, ionic gelation, colloidal system, beer spheres, structure formation.

**JEL Classification:** L66, O31, O32

**DOI:** <https://doi.org/10.32782/2522-1221-2026-46-05>

**Постановка проблеми.** У сучасних умовах розвитку ресторанного господарства та харчових технологій особливої актуальності набуває пошук інноваційних підходів до створення кулінарної продукції з високими органолептичними характеристиками та новими споживчими властивостями. Одним із перспективних напрямів є молекулярна гастрономія, яка поєднує досягнення фізики, хімії, біотехнології та кулінарного мистецтва для формування нових текстур, смакових поєднань і способів подачі страв та напоїв.

Пиво як складна багатокомпонентна система містить широкий спектр біологічно активних речовин, ароматичних сполук, білків, полісахаридів та продуктів ферментації, що створює значний потенціал для його використання в молекулярній гастрономії. Водночас сучасна практика застосування пива у кулінарному мистецтві переважно обмежується традиційними технологіями приготування страв і напоїв, тоді як можливості використання фізико-хімічних процесів, структуроутворення, гелеутворення, сферизації, емульгування та інших методів молекулярної гастрономії залишаються недостатньо дослідженими.

Потреба в інтеграції біотехнологічних та фізико-хімічних підходів для створення інноваційних кулінарних продуктів на основі пива зумовлює необхідність наукового обґрунтування механізмів формування їхніх властивостей,

удосконалення технологічних рішень та розширення можливостей використання пивної сировини в сучасному кулінарному мистецтві. Це визначає актуальність дослідження та потребу в комплексному вивченні потенціалу молекулярної гастрономії пива як перспективного напрямку розвитку індустрії гостинності та харчових технологій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні дослідження у сфері молекулярної гастрономії розглядають її як міждисциплінарний напрям, що інтегрує харчову хімію, біотехнологію та інженерію харчових систем. У наукових працях підкреслюється роль фундаментальних фізико-хімічних процесів у формуванні нових текстур і сенсорних властивостей продуктів, зокрема через контроль структуроутворення та фазових переходів у харчових системах [1–4]. Окремо відзначається значення інженерного підходу до кулінарії як основи для розвитку інноваційних гастрономічних технологій [4].

Значна частина сучасних досліджень присвячена процесам йонного гелеутворення та сферифікації як ключового методу молекулярної гастрономії. Роботи деталізують вплив концентрації реагентів, умов середовища та кінетики масопереносу на якість гелевих сфер, а також описують модифікації базової технології для різних харчових систем [5].

Встановлено, що утворення кальцій-альгінатних структур відбувається за механізмом «egg-box» і визначається дифузійними процесами та реологічними властивостями системи [6; 7].

Окремий напрям досліджень стосується фізико-хімічних властивостей пива як складної колоїдної системи. Встановлено, що білково-поліфенольні комплекси, продукти бродіння та леткі ароматичні сполуки формують його сенсорний профіль і технологічні властивості [8–11]. Дослідження також підкреслюють можливість використання пива як функціональної основи для створення інноваційних харчових систем із контрольованими текстурними характеристиками, що відкриває перспективи його застосування у технологіях молекулярної гастрономії [1; 8].

**Постановка завдання.** Метою цього дослідження є теоретичне обґрунтування та аналіз можливостей використання пива як об'єкта молекулярної гастрономії шляхом інтеграції біотехнологічних і фізико-хімічних підходів у сучасне кулінарне мистецтво. Для досягнення поставленої мети досліджено науково-теоретичні засади молекулярної гастрономії та особливості її застосування в ресторанному господарстві, проаналізовано фізико-хімічний склад і технологічні властивості пива як сировини для створення інноваційних кулінарних продуктів, охарактеризовано роль біотехнологічних процесів бродіння у формуванні його органолептичних характеристик. Особливу увагу приділено вивченню можливостей застосування сучасних методів молекулярної гастрономії, зокрема сферизації, гелеутворення, емульгування та піноутворення, при створенні страв і напоїв на основі пива. Також досліджено вплив фізико-хімічних факторів на формування структури, текстури, стабільності та сенсорних властивостей готових виробів, а також обґрунтовано перспективи впровадження інноваційних технологічних рішень на основі пива в практику сучасного кулінарного мистецтва та ресторанного господарства.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Пиво – це складна багатокомпонентна дисперсна система біотехнологічного походження, фізико-хімічні властивості якої формуються внаслідок поєднання процесів пророщення солоду, ферментації та післябродильного дозрівання. Сукупність колоїдних, поверхневих та реологічних характеристик зумовлює перспективність використання пива як функціональної основи у технологіях молекулярної гастрономії, спрямованих

на цілеспрямовану модифікацію текстури, структури та сенсорного профілю харчових систем.

Формування хімічного складу пива відбувається протягом послідовних технологічних стадій – пророщення солоду, затирання, кип'ятіння суслу з хмелем, алкогольного бродіння та дозрівання. Кожен із зазначених етапів супроводжується складними ферментативними й термохімічними перетвореннями, результатом яких є утворення значної кількості низько- та високомолекулярних сполук. За сучасними даними, у пиві ідентифіковано понад 800–1000 компонентів, серед яких моно- і олігосахариди, декстрини, пептиди, амінокислоти, органічні кислоти, поліфеноли, меланоїдини, ізо- $\alpha$ -кислоти хмелю, леткі ароматичні речовини та мінеральні компоненти [8, 9].

Центральним біотехнологічним процесом виробництва є алкогольне бродіння, під час якого дріжджі роду *Saccharomycetes* метаболізують зброджувані цукри відповідно до рівняння:



Одночасно реалізуються вторинні метаболічні шляхи, зокрема реакції Ерліха, що супроводжуються утворенням вищих спиртів, альдегідів, естерів та інших летких компонентів. Естери синтезуються шляхом ферментативної конденсації ацил-КоА зі спиртами за участю алкогольацетилтрансфераз дріжджової клітини. Саме ці сполуки формують характерний фруктовий-квітковий ароматичний профіль багатьох сортів пива.

З позицій фізичної хімії пиво є багатофазною дисперсною системою, у якій співіснують істинно розчинені речовини, колоїдні частинки та газова фаза у вигляді розчиненого й диспергованого карбон(IV) оксиду. Колоїдна стабільність значною мірою визначається утворенням білково-поліфенольних комплексів, стабілізованих водневими зв'язками, гідрофобними взаємодіями та  $\pi$ - $\pi$ -стекінгом ароматичних фрагментів поліфенолів [12, 13]. Надмірне агрегування таких комплексів може спричиняти холодне або необоротне колоїдне помутніння.

Важливими фізико-хімічними характеристиками пива є кислотність (рН 3,8–4,6), поверхневий натяг, в'язкість, буферна ємність, газотримувальна здатність і реологічні параметри. Сукупність цих показників визначає поведінку системи під час реалізації процесів емульгування, аерації, гелеутворення та сферифікації.

Особливий інтерес для молекулярної гастрономії становлять поверхнево-активні компоненти пива [14]. До них належать гідрофобні білки

солоду, насамперед lipid transfer protein 1 (LTP1), поліпептиди середньої молекулярної маси, ізо- $\alpha$ -кислоти хмелю та високомолекулярні полісахариди (табл. 1). Адсорбуючись на межі поділу фаз «газ-рідина», зазначені сполуки знижують поверхневий натяг та формують високоеластичні адсорбційні шари, що забезпечують утворення і стабілізацію пивної піни.

Пивна піна є типовою висококонцентрованою дисперсною системою типу «газ у рідині», стійкість якої визначається міжфазними явищами, швидкістю дренажу рідкої фази та коалесценцією газових бульбашок. Якість піни вважається одним із ключових критеріїв технологічної якості напою.

Вміст води у пиві перевищує 90%, що разом із присутністю органічних кислот, екстрактивних речовин і колоїдних компонентів забезпечує його сумісність із різними гідроколоїдними системами. При взаємодії з альгінатом натрію, агаром, карагінаном, пектином або желатином пиво здатне утворювати структуровані гелі з прогнозованими реологічними властивостями.

Особливий інтерес становить технологія сферифікації, базована на реакції йонного зшивання лінійних ланцюгів альгінату двовалентними катіонами кальцію за механізмом «egg-box». Утворення тривимірної сітки кальцій-альгінатного гелю забезпечує формування еластичної оболонки навколо рідкої пивної фази, що дозволяє створювати нові текстурні форми подачі традиційного напою.

Окрім сферифікації, фізико-хімічні властивості пива відкривають можливості для використання технологій емульгування, аерації, кріоструктурування та створення піно-гелевих систем. Завдяки широкому спектру летких ароматичних речовин різної полярності й леткості структуровані системи на основі пива можуть забезпечувати кероване вивільнення смако-ароматичних компонентів під час споживання, що

є одним із ключових принципів сучасної молекулярної гастрономії.

Важливу роль у формуванні кольору, смаку та антиоксидантних властивостей пива відіграють меланоїдини – високомолекулярні нітрогенмісні полімерні продукти реакції Майяра між редукуючими цукрами та амінокислотами. Ці сполуки формують характерне забарвлення темних сортів пива, беруть участь у зв'язуванні йонів металів змінної валентності та виявляють антиоксидантну активність.

Білковий комплекс пива представлений переважно низькомолекулярними пептидами, білками LTP1, зимінами, а також залишковими проламіновими фракціями зернової сировини. Білки визначають піностійкість, колоїдну стабільність та текстурні характеристики напою. Водночас їх взаємодія з поліфенолами є основною причиною утворення колоїдних помутнень [8].

У промисловому виробництві для підвищення колоїдної стабільності застосовують процеси фільтрації, центрифугування, мембранного розділення та використання стабілізаторів білкової і поліфенольної природи.

Формування ароматичного профілю значною мірою пов'язане з леткими складними ефірами, серед яких домінують етилацетат, ізоамілацетат, етилкапроат та етилкаприлат. Концентрація зазначених сполук залежить від штаму дріжджів, температури бродіння, аерації суслу та нітрогенного живлення дріжджів [9].

Фенольні сполуки, зокрема 4-вінілгваякол, 4-вінілфенол та тирозол, утворюються переважно внаслідок ферментативного декарбоксилювання гідроксикоричних кислот зернової сировини. Вони забезпечують формування характерних пряних, гвоздичних, димних та ванільних ароматичних відтінків.

Органічні кислоти, представлені молочною, оцтовою, яблучною, янтарною та лимонною кислотами, беруть участь у підтриманні буферних

Таблиця 1

**Основні групи сполук пива та їх функціонально-технологічне значення у молекулярній гастрономії**

| Група сполук           | Представники            | Технологічне значення                         |
|------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|
| Ізо- $\alpha$ -кислоти | гумулон, когумулон      | формування гіркоти, стабілізація піни         |
| Білки та пептиди       | LTP1, білки солоду      | піноутворення, текстуроутворення              |
| Поліфеноли             | катехіни, флавоноли     | антиоксидантна активність, комплексоутворення |
| Органічні кислоти      | молочна, яблучна        | регулювання рН, смаковий баланс               |
| Естери                 | ізоамілацетат           | ароматичний профіль                           |
| Меланоїдини            | продукти реакції Майяра | колір, смак, антиоксидантні властивості       |

властивостей середовища, впливають на мікробіологічну стабільність і визначають свіжість смаку.

Окрему групу біологічно активних речовин становлять поліфеноли хмелю та солоду, представлені катехінами, проантоціанідинами, флавонолами та фенольними кислотами. Завдяки антиоксидантній активності та здатності до комплексоутворення вони суттєво впливають на колоїдну стійкість, стабільність піни та сенсорні характеристики пива.

Таким чином, пиво є складною колоїдною системою з вираженими поверхневими, реологічними та структуруючими властивостями. Сукупність фізико-хімічних характеристик його компонентів створює наукове підґрунтя для використання пива як функціональної сировини у технологіях молекулярної гастрономії, де керування міжмолекулярними взаємодіями дозволяє цілеспрямовано модифікувати текстурні, ароматичні та візуальні властивості кулінарних виробів.

Сферифікація (сферування) є одним із найбільш поширених методів молекулярної гастрономії, що дозволяє трансформувати рідкі харчові системи у сферичні структури з рідким або напіврідким ядром, оточеним тонкою гелевою оболонкою. Метод ґрунтується на контрольованому йонному гелеутворенні та широко застосовується для модифікації текстурних і сенсорних характеристик харчових продуктів.

Фізико-хімічною основою процесу є зовнішнє йонне гелеутворення, яке реалізується внаслідок взаємодії натрій альгінату з двовалентними катіонами, переважно  $\text{Ca}^{2+}$ . Альгінат натрію – це лінійний аніонний полісахарид, побудований із залишків  $\beta$ -D-мануронової (M) та  $\alpha$ -L-гулуринової (G) кислот. Саме G-блоки полімерного ланцюга здатні координувати йони кальцію з утворенням тривимірної просторової структури за механізмом «egg-box». У сформованій координаційній сітці йони  $\text{Ca}^{2+}$  виконують функцію міжланцюгових містків, забезпечуючи виникнення пружного гелю (Рис. 2).

Процес формування оболонки визначається одночасним перебігом дифузії йонів кальцію в полімерну матрицю та кінетикою йонного зшивання макромолекул альгінату. На початковій стадії внаслідок високого концентраційного градієнта  $\text{Ca}^{2+}$  формується тонкий поверхневий гелевий шар, який у подальшому потовщується за рахунок внутрішньої дифузії катіонів. Швидкість структуроутворення залежить від концентрації реагентів, молекулярної маси альгінату, співвідношення M/G-фрагментів, температури, рН середовища та часу контакту краплі з кальцієвою ванною.

У технологіях молекулярної гастрономії використовують два основні способи сферифікації: прямий і зворотний. При прямій сферифікації

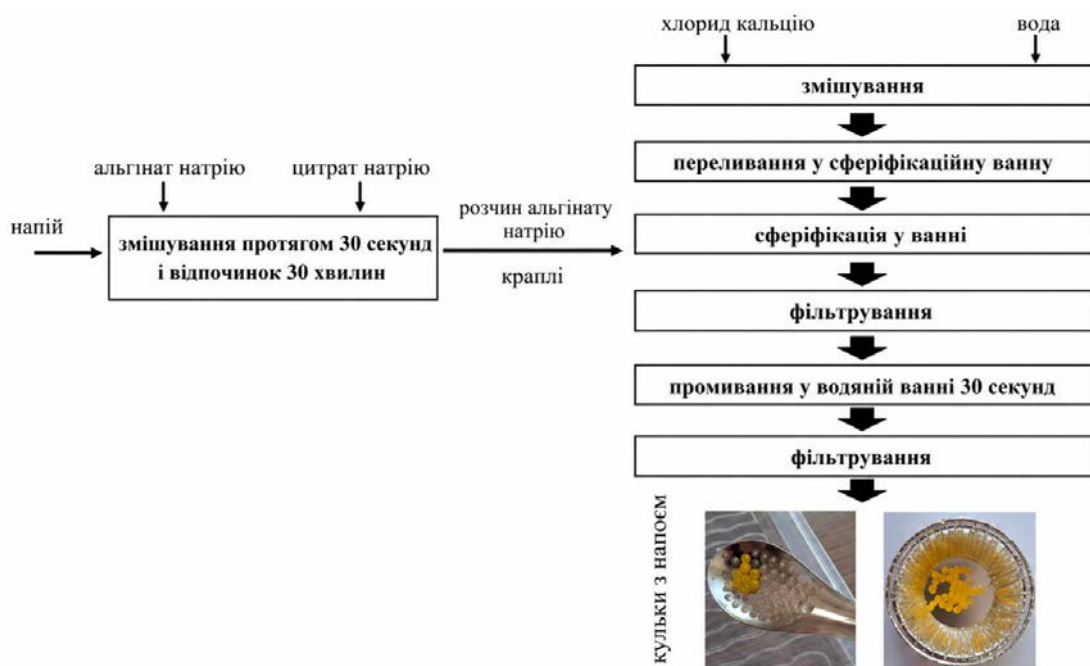


Рис. 1. Технологія виготовлення пивних сфер

натрій альгінат вводять безпосередньо до харчової системи, після чого її дозують у розчин кальцієвої солі (табл. 2). Метод доцільно застосовувати для рідин із низьким вмістом йонів кальцію та помірною кислотністю. Під час зворотної сферифікації кальцієві солі додають до продукту, який надалі занурюють у розчин альгінату натрію. Даний підхід забезпечує стабільнішу структуру оболонки та запобігає надмірному ущільненню гелю під час зберігання.

Для експериментального дослідження процесу сферифікації було розроблено рецептуру пивних сфер на основі світлого фільтрованого пива типу Lager. Вибір даного сорту обумовлений його стабільними фізико-хімічними показниками, помірною кислотністю (рН 4,2–4,5), низькою в'язкістю та збалансованим ароматичним профілем, що забезпечує відтворюваність процесу йонного гелеутворення. Склад рецептурної композиції наведено у табл. 3.

Під час виготовлення пивних сфер використовували метод зворотної сферифікації. Для цього до попередньо дегазованого пива вносили лактат кальцію у кількості 2% від маси системи та перемішували до повного розчинення. Одержану суміш дозували у 1%-й розчин альгінату натрію, приготовлений на питній воді. Тривалість витримання крапель у кальцій-альгінатній ванні становила 60–90 с, після чого сформовані сфери промивали водою для припинення подальшого процесу гелеутворення.

Застосування зворотної сферифікації дозволило отримати сфери правильної сферичної форми з еластичною оболонкою та рідким ядром, що забезпечувало характерний сенсорний ефект миттєвого вивільнення смако-ароматичних речовин пива під час споживання.

Використання пива як дисперсійного середовища суттєво ускладнює механізм сферифікації через його багатокомпонентний склад та колоїдну

Таблиця 2

**Технологічні операції, обладнання та функціональні компоненти,  
що використовуються під час сферифікації пива**

| Етап технологічного процесу         | Обладнання та інструменти                                 | Функціональні інгредієнти та їх призначення                                                            |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Підготовка пивної основи            | лабораторні ваги, мірний посуд, магнітна мішалка          | пиво (основна дисперсна система); цитрат натрію (регулювання рН та стабілізація процесу гелеутворення) |
| Приготування альгінатної композиції | високошвидкісний диспергатор або магнітна мішалка         | альгінат натрію (структуроутворювач та прекурсор гелевої оболонки)                                     |
| Формування крапель                  | дозатор, піпетка, шприц або перистальтичний насос         | альгіратно-пивна композиція                                                                            |
| Гелеутворення (сферифікація)        | реакційна ванна, лабораторний стакан                      | водний розчин кальцій хлориду (джерело йонів $\text{Ca}^{2+}$ для йонного зшивання альгінату)          |
| Промивання сфер                     | сито, фільтр або дренажна система                         | демінералізована вода для видалення залишків кальцієвого розчину                                       |
| Оцінювання якості сфер              | штатгенциркуль, текстурометр, рН-метр, оптичний мікроскоп | сфери пива; визначення геометричних, структурно-механічних та органолептичних показників               |
| Зберігання готового продукту        | холодильна камера, герметичні контейнери                  | сфери пива у стабілізуючому середовищі                                                                 |

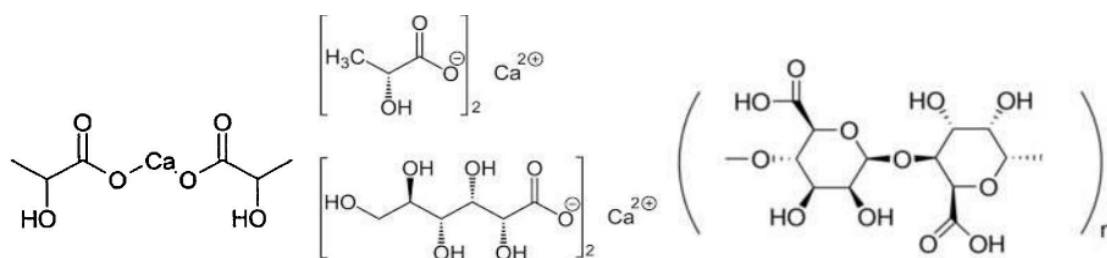


**Рис. 2. Схематичне зображення механізму йонного зшивання альгінату натрію іонами кальцію під час сферифікації пива та формування гелевої оболонки пивних сфер**

Таблиця 3

**Рецептура пивних сфер, виготовлених методом зворотної сферифікації**

| Сировина та компоненти                        | Брутто, г | Нетто, г | Функціональне призначення компонента                                                                                  |
|-----------------------------------------------|-----------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Пиво світле фільтроване «Львівське 1715»      | 100,0     | 100,0    | Основна дисперсна фаза; джерело смако-ароматичних речовин, етилового спирту, білків, поліфенолів та CO <sub>2</sub>   |
| Лактат кальцію                                | 2,0       | 2,0      | Джерело йонів Ca <sup>2+</sup> для іонного зшивання альгілату; забезпечує формування та стабілізацію гелевої оболонки |
| Альгінат натрію                               | 5,0       | 5,0      | Гелеутворювач; формує тривимірну полімерну матрицю за механізмом «egg-box»                                            |
| Вода питна для приготування альгілатної ванни | 500,0     | 500,0    | Дисперсійне середовище для одержання розчину альгілату та забезпечення процесу сферифікації                           |
| Вода питна для промивання сфер                | 300,0     | 300,0    | Видалення надлишку альгілату та припинення подальшого процесу гелеутворення                                           |
| Вихід готових сфер                            | —         | 95,0±2,0 | Формування сферичної структури з рідким ядром та еластичною оболонкою                                                 |

Примітка. Для отримання стабільних сфер пиво перед проведенням сферифікації піддавали попередній дегазації протягом 10–15 хв при температурі (20±2) °C з метою зменшення впливу розчиненого карбон(IV) оксиду на процес гелеутворення.

природу. Білки, поліпептиди, β-глюкани, поліфеноли та інші екстрактивні речовини здатні змінювати реологічні характеристики системи, впливати на коефіцієнт дифузії йонів Ca<sup>2+</sup> та брати участь у додаткових міжмолекулярних взаємодіях із полісахаридною матрицею [8, 9]. Зокрема, білково-поліфенольні комплекси можуть обмежувати рухливість макромолекул альгілату, що відображається на товщині та механічній міцності сформованої оболонки.

Додатковим фактором є присутність розчиненого карбон(IV) оксиду, який під час дегазації або нагрівання інтенсивно десорбується, спричиняючи локальні масообмінні процеси та формування пористої мікроструктури гелю. Це може знижувати механічну міцність сфер і погіршувати їх морфологічну однорідність. У зв'язку з цим перед проведенням сферифікації рекомендовано здійснювати попередню дегазацію пива.

Суттєвий вплив на процес має кислотність середовища. При значеннях рН нижче 3,5 відбувається протонування карбоксилатних груп альгілату ( $\text{-COO}^- \rightarrow \text{-COOH}$ ), що зменшує кількість доступних центрів координації для йонів кальцію та уповільнює процес гелеутворення. Для більшості сортів пива характерний діапазон рН 4,0–4,6, який забезпечує ефективне формування кальцій-альгілатної сітки без необхідності істотного коригування кислотності.

Структурно-механічні властивості отриманих сфер визначаються концентрацією альгілату натрію та кальцієвої солі. Підвищення

концентрації альгілату сприяє збільшенню густини полімерної сітки, товщини оболонки та її пружності. Разом із тим, надлишковий вміст Ca<sup>2+</sup> призводить до надмірного зшивання полімерних ланцюгів, формування жорстких і крихких гелів та погіршення органолептичних характеристик продукту.

З позицій реології пивні сфери є складними багатофазними системами типу «рідина в гелі», функціональні властивості яких визначаються співвідношенням між модулем пружності оболонки та плинністю внутрішньої фази. Одним із ключових критеріїв якості таких систем є забезпечення оптимального балансу між механічною стабільністю під час зберігання та здатністю оболонки швидко руйнуватися в ротовій порожнині, забезпечуючи контрольоване вивільнення смако-ароматичних компонентів.

Таким чином, сферифікація пива є комплексним фізико-хімічним процесом, у якому поєднуються явища масопереносу, дифузії, йонного зшивання та структуроутворення. Використання даної технології дозволяє створювати інноваційні гастрономічні продукти з прогнозованими текстурними характеристиками та новими сенсорними властивостями, що розширює можливості застосування пива у сучасному ресторанному господарстві.

**Висновки і перспективи подальших досліджень у даному напрямі.** Проведений аналіз фізико-хімічних властивостей пива як багатокомпонентної колоїдної системи підтвердив

перспективність його використання у технологіях молекулярної гастрономії. Встановлено, що білки, поліфеноли, органічні кислоти, ізо- $\alpha$ -кислоти хмелю та розчинений карбон(IV) оксид зумовлюють поверхнево-активні, піноутворювальні та структуроутворюючі властивості пива.

Показано, що процес сферифікації пива базується на механізмі йонного гелеутворення альгінату натрію з йонами кальцію та залежить від кислотності середовища, концентрації гелеутворювача, вмісту розчиненого CO<sub>2</sub> і реологічних характеристик системи. Обґрунтовано доцільність використання методу зворотної сферифікації для отримання стабільних пивних сфер із рідким ядром та вираженими сенсорними властивостями.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з вивченням впливу різних сортів пива на кінетику гелеутворення, структурно-механічні властивості сфер та процеси вивільнення смако-ароматичних компонентів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Горшкова Л., Павлюк В., Ярмолук Д. Застосування технологій молекулярної кухні як чинник зростання ресторанного сервісу. *Innovations and Technologies in the Service Sphere and Food Industry*. 2022. № 1 (5). С. 15–20. DOI: [https://doi.org/10.32782/2708-4949.1\(5\).2022.3](https://doi.org/10.32782/2708-4949.1(5).2022.3).

2. Luck L. A. Molecular gastronomy: scientific foundations, educational practices, and culinary applications. *Handbook of Molecular Gastronomy: Scientific Foundations, Educational Practices, and Culinary Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2021. P. 537–540.

3. Burke R., Kelly A., Lavelle C., This H. V. Kientza (eds.). *Handbook of Molecular Gastronomy: Scientific Foundations, Educational Practices, and Culinary Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2021. 894 p. ISBN 978-0-367-74161-7.

4. Aguilera J. M. Relating food engineering to cooking and gastronomy. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2018. Vol. 17. P. 1021–1039. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12361>.

5. Tireki S. Basic spherification as a gelation application in the kitchen: diffusion coefficient estimation and appearance quality of beverage pearls. *Physics of Fluids*. 2025. Vol. 37. 037156. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0246163>.

6. Sen D. J. Cross linking of calcium ion in alginate produce spherification in molecular gastronomy by pseudoplastic flow. *World Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2017. Vol. 5, No. 1. P. 1–10. URL: [http://](http://wjpsonline.com/index.php/wjps/article/view/cross-linking-calcium-ion-alginate-produce-spherification)

[wjpsonline.com/index.php/wjps/article/view/cross-linking-calcium-ion-alginate-produce-spherification](http://wjpsonline.com/index.php/wjps/article/view/cross-linking-calcium-ion-alginate-produce-spherification).

7. Halford B. The Science of Spherification. *Chemical & Engineering News Archive*. 2015. Vol. 92. P. 35–36. DOI: <https://doi.org/10.1021/cen-09242-scitech2>.

8. Stachowiak B., Bukowski K. New trends in the brewing industry. Functional beers – raw material and technological aspects of their production. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*. 2021. Vol. 28, No. 1 (126). P. 5–27. DOI: <https://doi.org/10.15193/zntj/2021/126/365>.

9. Michalski J., Sasiadek W., Owsiany K. Characteristic of selected chemical compounds responsible for organoleptic properties of beer. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*. 2018. No. 542. P. 101–112. DOI: <https://doi.org/10.15611/pn.2018.542.08>.

10. Gaikwad S. A., Kulthe A. A., Suthar T. R. Characterization of flavoured sweet water balls prepared by basic spherification technique. *International Journal of Chemical Studies*. 2019. Vol. 7. P. 1714–1718.

11. Barth R. *The Chemistry of Beer: The Science in the Suds*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013. 330 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118733745>.

12. Królak K., Kobus K., Kordialik-Bogacka E. Effects on beer colloidal stability of full-scale brewing with adjuncts, enzymes, and finings. *European Food Research and Technology*. 2022. Vol. 249. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04131-7>.

13. Mastanjević K., Krstanović V., Lukinac J., Jukić M., Vulin Z., Mastanjević K. Beer – The Importance of Colloidal Stability (Non-Biological Haze). *Fermentation*. 2018. Vol. 4. Art. 91. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation4040091>.

14. Nepovimnykh N., Petrova O. Food hydrocolloids: classification, functional properties and applications. *Food Systems*. 2025. Vol. 8. P. 66–72. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-66-72>.

#### REFERENCES

1. Horshkova L., Pavliuk V. and Yarmoliuk D. (2022), Zastosuvannia tekhnolohii molekuliarnoï kukhni yak chynnyk zrostannia restorannoho servisu, *Innovations and Technologies in the Service Sphere and Food Industry*, № 1 (5), s. 15–20. DOI: [https://doi.org/10.32782/2708-4949.1\(5\).2022.3](https://doi.org/10.32782/2708-4949.1(5).2022.3).

2. Luck, L. A. (2021), Molecular gastronomy: scientific foundations, educational practices, and culinary applications, *Handbook of Molecular Gastronomy: Scientific Foundations, Educational Practices, and Culinary Applications*, CRC Press, Boca Raton, p. 537–540.

3. Burke R., Kelly A., Lavelle C. and This, H. V. Kientza (eds.) (2021), *Handbook of Molecular*

Gastronomy: Scientific Foundations, Educational Practices, and Culinary Applications, CRC Press, Boca Raton, 894 p. ISBN 978-0-367-74161-7.

4. Aguilera, J. M. (2018), Relating food engineering to cooking and gastronomy, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 17, p. 1021–1039. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12361>.

5. Tireki S. (2025), Basic spherification as a gelation application in the kitchen: diffusion coefficient estimation and appearance quality of beverage pearls, *Physics of Fluids*, vol. 37, 037156. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0246163>.

6. Sen, D. J. (2017), Cross linking of calcium ion in alginate produce spherification in molecular gastronomy by pseudoplastic flow, *World Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 5, No. 1, p. 1–10, available at: <http://wjpsonline.com/index.php/wjps/article/view/cross-linking-calcium-ion-alginate-produce-spherification>.

7. Halford B. (2015), The Science of Spherification, *Chemical & Engineering News Archive*, vol. 92, p. 35–36. DOI: <https://doi.org/10.1021/en-09242-scitech2>.

8. Stachowiak B. and Bukowski K. (2021), New trends in the brewing industry. Functional beers – raw material and technological aspects of their production, *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, vol. 28, No. 1 (126), p. 5–27. DOI: <https://doi.org/10.15193/zntj/2021/126/365>.

9. Michalski J., Szaśiadek W. and Owsiany K. (2018), Characteristic of selected chemical compounds responsible for organoleptic properties of beer, *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, No. 542, p. 101–112. DOI: <https://doi.org/10.15611/pn.2018.542.08>.

10. Gaikwad, S. A., Kulthe, A. A. and Suthar, T. R. (2019), Characterization of flavoured sweet water balls prepared by basic spherification technique, *International Journal of Chemical Studies*, vol. 7, p. 1714–1718.

11. Barth R. (2013), *The Chemistry of Beer: The Science in the Suds*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 330 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118733745>.

12. Królak K., Kobus K. and Kordialik-Bogacka E. (2022), Effects on beer colloidal stability of full-scale brewing with adjuncts, enzymes, and finings, *European Food Research and Technology*, vol. 249, p. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04131-7>.

13. Mastanjević K., Krstanović V., Lukinac J., Jukić M., Vulin Z. and Mastanjević K. (2018), Beer – The Importance of Colloidal Stability (Non-Biological Haze), *Fermentation*, vol. 4, Art. 91. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation4040091>.

14. Nepovinnikh N. and Petrova O. (2025), Food hydrocolloids: classification, functional properties and applications, *Food Systems*, vol. 8, p. 66–72. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-66-72>.

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



Дата першого надходження статті до видання: 06.05.2026  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.06.2026  
Дата публікації (оприлюднення) статті: 12.10.2026