

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВИЛУЧЕННЯ ТА ФРАКЦІОНУВАННЯ СИРОВАТКОВИХ БІЛКІВ

С. В. Коробчук,

здобувачка вищої освіти рівня молодший спеціаліст, група Е-2,
ВСП «Рівненський технічний фаховий коледж НУВГП»

Наукові керівники – ст. викладачка О. І. Мисіна¹,
викладач В. Ю. Беседюк²

¹Національний університет водного господарства та природокористування,

²ВСП «Рівненський технічний фаховий коледж НУВГП»,
м. Рівне, Україна

В роботі наведено результати теоретичних досліджень щодо основних способів вилучення та фракціонування сироваткових білків. Зокрема запропоновано розглядати усі способи у розрізі поділу на дві основні групи – процеси перетворення та процеси розділення. Проведено аналіз відповідних літературних джерел, серед яких статті з видань, що входять до наукометричної бази даних «Scopus», а також відповідна науково-технічна література. Встановлено, що з метою ефективного фракціонування сироваткових білків потрібно забезпечувати комбінування способів перетворення і розділення. Водночас ідентифіковано способи, які забезпечують високий рівень фракційності вилучення білків, зокрема іонний обмін.

Ключові слова: молочні стічні води, молочна сироватка, компоненти молочної сироватки, переробка молочної сироватки, сироваткові білки.

This work presents the results of theoretical studies on the main methods of whey protein extraction and fractionation. Particularly, it is proposed to consider all methods in the context of dividing them into two main groups – transformation processes and separation processes. An analysis of relevant literature sources was conducted, including papers from journals included in the Scopus scientometric database, as well as relevant scientific and technical literature. It was shown that in order to effectively fractionate whey proteins, it is necessary to combine methods of transformation and separation. At the same time, the methods that provide a high level of fractionation of protein extraction, in particular, ion exchange, have been identified.

Keywords: dairy wastewater, whey, whey components, whey processing, whey proteins.

Відомо, що молочна сироватка є основною складовою стічних вод молокозаводів та близько 5 мільярдів тонн молочної сироватки щорічно у світі лишаються необробленими, що у випадку потрапляння на очисні споруди значно порушує їх режим роботи. Це пов'язано з високим рівнем органічного навантаження у сироватці, високим рівнем вмісту мінеральних компонентів та присутністю інгібуючих мікроорганізмів. Водночас недостатній ступінь очищення стічних вод, що містять сироватку або її безпосередній скид у централізовану мережу водовідведення, несе чимало ризиків для довкілля [1].

Результати відомих досліджень свідчать про те, що молочна сироватка є біологічно активною рідиною, яка містить значні кількості біологічно та фізіологічно цінних речовин, зокрема сироваткові білки, мінеральні компоненти, вітаміни тощо. У відомих працях окрему увагу приділено саме сироватковим білкам, зокрема таким фракціям як α -лактальбумін, β -

лактоглобулін, імуноглобуліни тощо [2]. Це пояснюється високим вмістом незамінних амінокислот, а також значним потенціалом використання у виробництві продуктів функціонального призначення. Однак, фракційне вилучення сироваткових білків є складною технологічною задачею, над вирішенням якої вже десятки років працюють вчені різних країн світу. Критичним є вибір коректного процесу, що забезпечуватиме селективний вплив на агрегативну стійкість окремих білкових фракцій молочної сироватки. Таким чином, *актуальним* є аналіз існуючих технологій фракціонування сироваткових білків, з метою отримання систематизованих даних для наступного підбору коректних процесів переробки молочної сироватки.

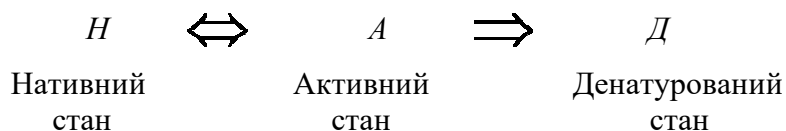
Головною метою роботи є систематизація результатів аналізу існуючих способів вилучення та фракціонування сироваткових білків, що передбачає виконання наступних завдань:

- аналіз процесів перетворення складу молочної сироватки;
- аналіз процесів розділення складу молочної сироватки.

В цій роботі був проведений пошук літературних джерел з метою їх наступного аналізу, зокрема за переліком таких ключових слів: «молочні стічні води», «сироватка», «компоненти молочної сироватки», «переробка молочної сироватки», «сироваткові білки», «процеси перетворення», «процеси розділення». У свою чергу, було проведено аналіз відібраних статей із журналів та видань, що входять до наукометричної бази даних «Scopus». Також було проаналізовано науково-технічну літературу, існуючі вітчизняні та закордонні технічні регламенти щодо процесів переробки молочної сироватки, зокрема вилучення сироваткових білків. Усі розглянуті процеси було запропоновано системно розділити на дві основні групи: процеси перетворення та процеси розділення.

Результати досліджень. При проведенні аналізу *процесів перетворення* складу молочної сироватки було розглянуто теплову денатурацію та гідроліз білкових молекул, а також висолювання білків. Ці процеси передбачають безпосередній вплив на структуру білків, а також на білкову систему загалом, каталізуючи процеси внутрішньої дестабілізації та втрати агрегативної стійкості.

Згідно з [3], *теплова денатурація є типовим процесом при осадженні та вилученні білків з водних середовищ, зокрема сироваткових. Процес вилучення білків способом теплової денатурації можна зобразити наступним чином:*



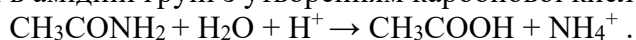
У дослідженні [4], стабільність різних білкових компонентів відрізнялась при змінах рН від <4,5 до >4,5. Нагрівання при температурі <100°C протягом тривалого часу не давало таких результатів, як і нагрівання при температурі >100°C за короткий час. Вченими [5] також було встановлено ефекти впливу вмісту казеїну та мінеральних речовин в сироватці на процес теплової денатурації. Встановлено, що міцелярний казеїн глибоко змінює баланс кальцію та різко змінює взаємодії, які відбуваються між видами білків (β-лактоглобулін, казеїни) та мінеральними елементами (іонний кальцій, Ca-P), тим самим впливаючи на денатурацію білка та концентрацію мінеральних стабілізаторів у системі. Досить цікавими є результати існуючих досліджень [6], що стверджують безпосередній вплив присутності окремих білкових фракцій на процес теплової денатурації інших фракцій. Зокрема, теплова денатурація α-лактальбуміну зменшується за відсутності β-лактоглобуліну.

Таким чином, процеси теплової денатурації не можна розглядати як повноцінний спосіб вилучення білкових компонентів з огляду на великий перелік факторів. З метою

ефективного вилучення білкових фракцій необхідно забезпечувати комбінацію способів теплової денатурації зі способами, що нівелюватимуть вплив розглянутих факторів.

Висолювання білків застосовується як спосіб осадження білкових компонентів, завдяки забезпеченню високих концентрацій солей, що знижують гідратацію поліпептидних ланцюгів з одночасною нейтралізацією зарядів та посилюють гідрофобні міжбілкові взаємодії. Окремі фракції білків по різному реагують на збільшення концентрації солей в системі за різних значень рН. Білки з найменшою розчинністю випадають в осад за невеликих концентрацій солей в нативному вигляді. Однак, відомі результати досліджень свідчать про те, що цей спосіб не є ефективним для вилучення сироваткових білків та отримані результати не відповідають зарегламентованим у відомих літературних джерелах [7].

Відомо, що *гідроліз білків* застосовується з метою покращення якості продуктів переробки сироватки та для отримання білкових гідролізатів. В основі хімічного гідролізу білків лежить реакція пептидів з водою у присутності кислот, яка супроводжується розривом зв'язку Карбон – Нітроген в амідній групі з утворенням карбонової кислоти [8]:



Дослідження [8; 9] свідчать про те, що у гідролізованій протеолітичними ферментами сироватці помітно збільшується вміст амінокислот у порівнянні з вихідною сироваткою, особливо лейцину і глутамінової кислоти. З'являються оксиамінокислоти (серин та треонін), двоосновні (гістилін, аргінін), а також ароматичні та сульфуровмісні амінокислоти. Відомі результати досліджень [10], щодо ферментативного гідролізу сироваткових білків, що свідчать про відмінність у ступені гідролізу для фракцій β -лактоглобулін та α -лактальбуміну за однакових умов (рН та температура), натомість умови забезпечення їх максимального ступеня гідролізу є протилежними. Такі результати можуть бути аргументом до необхідності почергового фракційного вилучення β -лактоглобуліну та α -лактальбуміну. Також результати досліджень [11; 12] свідчать, що гідроліз покращує засвоюваність білків і змінює функціональні властивості, включаючи розчинність і термостабільність.

Однак, подібно до процесів денатурації, гідроліз білків не можна розглядати як самостійний спосіб вилучення білкових компонентів, проте результати відомих досліджень ідентифікують можливість покращення якості та цінності білків при його застосуванні в процесах фракціонування.

Загалом, процеси перетворення в системі сироваткових білків, зокрема тепла денатурація, є типовими у технологіях їх вилучення, або ж можуть позитивно впливати на процес та якість продукту, зокрема гідроліз білків. Однак, вони потребують комбінування з іншими способами, що забезпечувало би комплексний вплив на агрегативну стійкість білків, зокрема зі способами розділення, з метою забезпечення ефективного фракціонування.

При проведенні аналізу *процесів розділення* було розглянуто мембранні методи, відцентрові, гель-фільтрацію, сорбцію та іонний обмін. Ці процеси передбачають фізико-хімічне розділення гетерогенної системи молочної сироватки з вилученням її дисперсних часток, зокрема білкових та мінеральних компонентів.

Відомо, що *мембранні методи* вилучення сироваткових білків можна розділити на два основних – гіперфільтрацію (мікрофільтрація, ультрафільтрація) та електродіаліз. В їх основі лежать властивості сироватки як гетерогенної системи з вираженою селективністю за молекулярними особливостями та розмірами дисперсних часток, а також іонною силою [3; 13].

Відомі результати досліджень [3; 13; 14] мембранних способів гіперфільтрації, що дозволяють виділити їх основні переваги:

- можливість спрямованого регулювання складу сироватки та її властивостей;
- створення на цій основі нових молочних продуктів з високою біологічною цінністю;
- раціональне використання молочної сироватки на основі маловідходних та безвідходних технологічних процесів;

- основні критерії процесу гіперфільтрації визначаються вибірковістю, проникністю, стійкістю до механічного, хімічного та мікробіологічного забруднення мембран.

Водночас, джерела [15] свідчать про те, що ретенант може мати рівень збагачення білком до ~80%. Дані дослідження показали, що завдяки повторній діалізації сироватки з фактором об'ємної концентрації 30–35, можна досягати рівнів збагачення білком 75–85%. Поряд з цим, відомі результати досліджень, які свідчать про те, що подібність розмірів фракцій β -лактоглобулін та α -лактальбуміну є фактором значного ускладнення їх фракціонування методом мембранної фільтрації [13; 14].

Більше того, аналізуючи дослідження було ідентифіковано значний недолік методу ультрафільтрації. У промисловому використанні такого способу постійною проблемою є закупорення пор мембран та створення так званого динамічного поверхневого шару. Як правило, відкладення білка та мінеральні осадки є основними складниками поверхневого шару. У випадку оборотного забруднення відбувається періодична промивка мембран, однак з часом їх ресурс зменшуватиметься, що призводить до значних фінансових витрат [12].

Загалом, гіперфільтрація не може виступати самостійним способом фракційного вилучення сироваткових білків, але є ефективним способом для виробництва білкових концентратів з домішками жирів та лактози, а також має високий потенціал для ефективного використання у комбінації з іншими способами у процесах фракціонування білків.

Наступним проаналізованим мембранним методом є електродіаліз. В більшості випадків, у відомих джерелах та технологіях електродіаліз не використовується для безпосереднього вилучення білків, а для демінералізації та глибокого знесолення сироватки. Практика застосування показує, що за допомогою електродіалізу можна демінералізувати молочну сироватку до рівня 90%. Проте, вчені стверджують, що з економічної точки зору електродіаліз виправдовує себе тільки при рівні демінералізації до 70% [3; 16]. Поряд з цим, результати досліджень [17] свідчать про те, що поєднання електродіалізу з біполярною мембраною із нагріванням сироватки при різних температурах дозволяє отримати фракцію β -лактоглобуліну з чистотою 70,9%–81,8%. Таким чином, використання електродіалізу може бути ефективним у процесі вилучення та фракціонування білків, якщо коректно підібрати супутні процеси. Однак, застосування електродіалізу може бути дещо обмеженим у промислових масштабах з огляду на велику затратність самого процесу та великі розміри необхідних капіталовкладень.

Загалом, кожен із розглянутих мембранних методів може застосовуватись у процесі вилучення сироваткових білків та їх фракціонуванні, однак має індивідуальні переваги та різні рівні ефективності. Мікрофільтрація може покращувати якість сироватки перед безпосередньо процесом вилучення білків. Ультрафільтрація, будучи найбільш промислово поширеним способом виробництва сироваткової білкової продукції, не може розглядатися як самостійний спосіб фракціонування білків та потребує комбінування з іншими способами, а також має недоліки у технологічному плані, зокрема проблеми із забрудненням мембран. Електродіаліз може забезпечувати попереднє знесолення сироватки для подальшого фракціонування білків іншими способами, однак його використання є дещо обмеженим з врахуванням фінансової складової.

Наступною розглянутою групою є *відцентрові методи*, зокрема сепарування та центрифугування, що застосовуються для вилучення вже зліплених білкових компонентів, а також для вилучення жирових компонентів, залишків казеїну, лактози тощо. Практика показує, що відцентрові методи доцільно застосовувати тільки з метою попереднього очищення системи від так званих білкових пластівців. Таким чином, відцентрові методи можуть бути використанні як додатковий блок при використанні способів перетворення, зокрема теплової денатурації з метою забезпечення вилучення білків, однак не можуть розглядатися як самостійний процес вилучення, а тим більше фракціонування сироваткових білків.

Щодо *гель-фільтрації*, вона передбачає розділення білків відповідно до їх молекулярного розміру/ваги та гідрофобності [3]. У свою чергу, результати досліджень [18] свідчать про те, що через різну молекулярну масу сироваткових білків, гель-фільтрація може ефективно розділяти ті фракції сироватки, які мають значні відмінності в масі. Водночас, вченими встановлено, що у випадках, коли розділювальна здатність гель-фільтрації недостатня, доцільно використовувати комбінації з іншими видами хроматографії. Повідомлялося про комбінацію іонного обміну та гель-фільтрації для виділення α -лактальбуміну, β -лактоглобуліну і сироваткового альбуміну. Також, відомі результати досліджень, які свідчать про можливість вилучати фракційно α -лактальбумін з огляду на його найбільшу гідрофобність серед інших фракцій сироваткового білка, далі за ним йдуть сироватковий альбумін, β -лактоглобулін та лактоферин, отримані з використанням гідрофобної колонки [19; 20].

Однак, спосіб гель-фільтрації має чимало недоліків, зокрема невеликі об'єми розчину, що можна подавати на розділення, велика тривалість циклу та розведення водою. Хоча цей спосіб можна розглядати як відносно ефективний для фракціонування сироваткових білків, на сьогодні, через досить високу вартість гелів, їх відносно низьку стійкість і періодичність процесу поділу, гель-фільтрація не знайшла широкого промислового застосування.

Щодо *сорбційних процесів*, то вони передбачають використання сорбентів з метою вилучення білків сироватки (процеси адсорбції, абсорбції та хемосорбції). Існуючі дослідження [3; 21] показали, що ефективними для обробки сироватки є спеціальні сорбенти іоногенного характеру на основі кремнезему у вигляді дрібних кульок, зокрема сферосил. Результати цих досліджень свідчать про те, що застосування сферосила дозволяє отримувати неденатуровані білки молочної сироватки з чистотою на рівні 90%, а також селективно поділяти їх за фракціями. Однак процеси сорбції-десорбції мають також і значні недоліки, зокрема це безпосередня складність процесу, утворення промивних кислотних та лужних елюатів та значні витрати води на промивні цикли.

Наукові джерела свідчать про високу ефективність застосування *іонного обміну* як в процесах загального вилучення сироваткових білків, так і їх фракціонування [22]. Наприклад, дослідження [23] свідчать про високу ефективність використання іонного обміну у порівнянні з іншими способами демінералізації сироватки, з досягненням ступеня демінералізації 99%. Водночас, в праці [24] розкрито ефективні процеси фракціонування α -лактальбуміну, сироваткового альбуміну і β -лактоглобуліну технологією рухомого ложа заповненого відповідними іонообмінними смолами. Поряд із цим, у ряді праць наводяться позитивні результати використання іонного обміну у фракціонуванні таких білкових фракцій як глікомакропептид, лактоферин, лактопероксидаза, імуноглобуліни тощо [20; 25]. Однак, найбільш вагомою перевагою застосування іонного обміну є саме його комплексний вплив на агрегативну стійкість білків, зокрема завдяки вилученню мінеральних компонентів із системи, впливу на кислотно-основну та окисно-відновну рівновагу середовища, а також на частинки білків безпосередньо.

Загалом, процеси розділення в системі сироваткових білків можуть забезпечувати ефективне порушення складових агрегативної стійкості білків та можуть бути ефективними для вилучення білкових компонентів. Зокрема, мембранні способи мають широке промислове застосування, однак є дорогими в обслуговуванні та не дозволяють вилучати білки фракційно. Водночас, окремі процеси мають високий потенціал для фракціонування білків, зокрема гель-фільтрація та сорбційні. Більше того, іонний обмін має найвищий потенціал промислового застосування з метою фракціонування сироваткових білків. Таким чином, для забезпечення ефективного фракціонування сироваткових білків потрібно забезпечувати комбінування способів перетворення і розділення та їх коректне поєднання в технологічних процесах. Результати проведеного аналізу наведено нижче на рисунку.

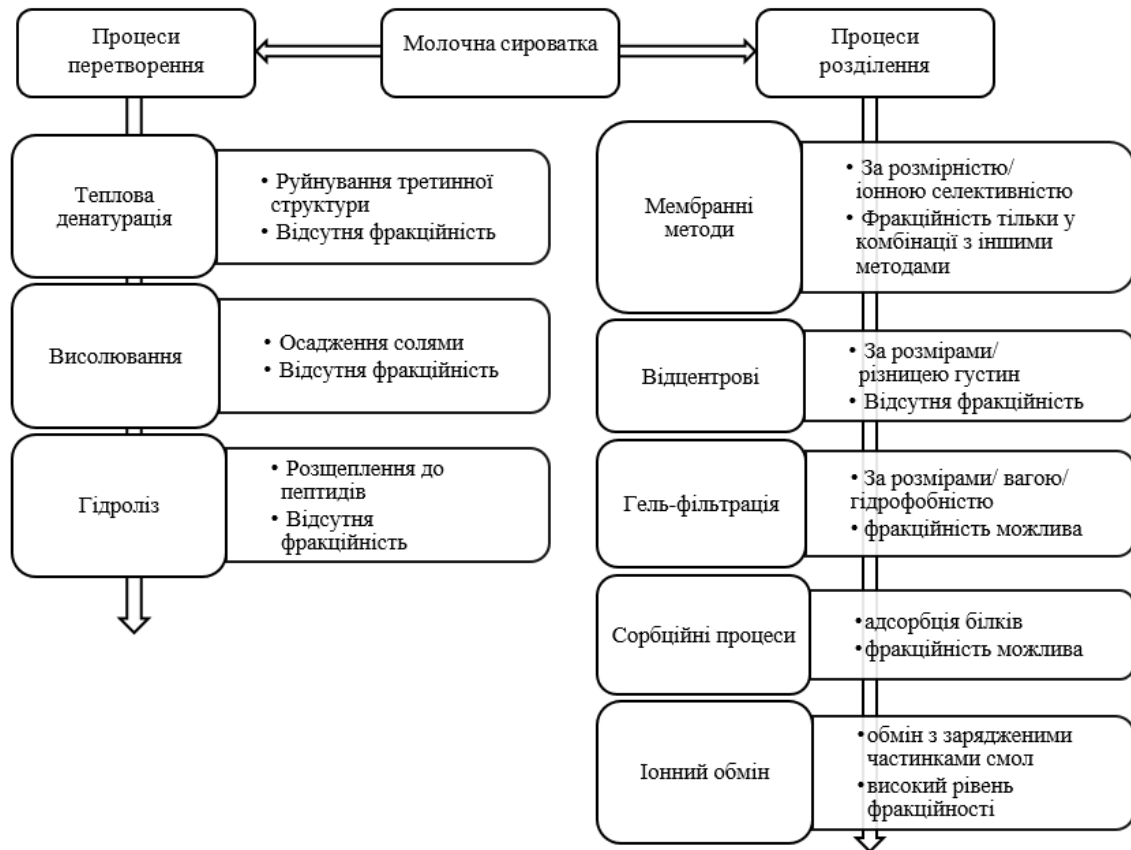


Рисунок. Основні процеси вилучення та фракціонування сироваткових білків

Поряд із наведеними результатами, варто також згадати про широкий спектр *новітніх методів* вилучення білкових компонентів молочної сироватки, які перебувають у процесі розвитку та не мають промислового застосування. До таких можна віднести обробку сироватки під високим тиском для фракціонування α -лактальбумінів і β -лактоглобулінів [26]. Особливої уваги вартий спосіб обробки білкової системи сироватки магнітними наночастинками (MAG-CA і MAG-CA-Cu) у процесі адсорбції, що дозволяє виділити очищений β -лактоглобулін [27]. Також відомо про метод, який полягає у використанні надкритичного вуглекислого газу (SCO_2) для осадження глікомакропептиду чистотою 94% [28]. Таким чином, перелік способів, що розвиваються, збільшується з врахуванням нового підходу до сироватки як до цінного ресурсу та невирішеної потреби у доступній та ефективній технології фракціонування білків.

Висновки. За результатами проведеного аналізу процесів вилучення та фракціонування сироваткових білків встановлено:

1. Процеси перетворення, зокрема теплова денатурація, є типовими у процесах вилучення білків, а також можуть позитивно впливати на якість продукту, зокрема гідроліз, однак потребують комбінування з іншими способами для комплексного впливу на агрегативну стійкість білкових фракцій.

2. Процеси розділення можуть забезпечувати ефективне порушення складових агрегативної стійкості білків та їх наступне вилучення, зокрема фракційно. Високий потенціал для фракціонування білків мають процеси гель-фільтрації, сорбційні процеси та іонний обмін.

3. З метою ефективного фракціонування сироваткових білків потрібно забезпечувати комбінування способів перетворення і розділення та їх коректне поєднання в технологічних процесах, що потребує додаткових досліджень.

1. Yatskov Mykola, Korchyk Natalia, Besediuk Volodymyr. Design of Systems for Integrated Processing of Dairy Raw Materials in the Cheese Industry (June 30, 2021). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3, № 11 (111). P. 80–87. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.234818> 2. Besediuk V., Yatskov M., Korchyk N., Kucherova A., & Maletskyi Z. Whey – From waste to a valuable resource. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2024. Vol. 18. P. 101280. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101280> 3. Khramtsov A. G., Nesterenko P. G. Technology of products from dairy whey : Textbook. DeLee Print, 2003. 647 p. 4. R. Triani E. Allen-Foegeding. Heat stability of whey protein ingredients based on state diagrams. *International Dairy Journal*. Vol. 91. 2019. P. 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.12.006> 0958-6946 5. W. Liu et al. Effect of casein/whey ratio on the thermal denaturation of whey proteins and subsequent fouling in a plate heat exchanger. *Journal of Food Engineering*. January 2021. Vol. 289. P. 110175. 6. Kinetics of heat-induced denaturation of proteins in model infant milk formulas as a function of whey protein composition / Amira Halabi, Amélie Deglaire, Pascaline Hamon, Said Bouhallab, Didier Dupont, Thomas Croguennec. *Food Chemistry*. 2020. Jan 1:302:125296. 7. Дослідження рН та Eh в екологічних технологіях отримання молочно-сироваткових білкових концентратів / М. В. Яцков, Н. М. Корчик, С. В. Кирилюк, В. Ю. Беседюк. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2015. Вип. 4(72). С. 223–234. 8. Arun Tapal, Purnima Kaul Tiku. Chapter 27 – Nutritional and Nutraceutical Improvement by Enzymatic Modification of Food Proteins. *Enzymes in Food Biotechnology*. 2019. P. 471–481. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813280-7.00027-X> 9. Синенко Т. П., Фролова Н. Е. Ферментативний гідроліз сироваткових білків молока. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2020. Вип. 1. С. 79–86. DOI: 10.31521/2313-092X/2020-1(105). 10. Hydrolysis of whey protein as a useful approach to obtain bioactive peptides and a β -Lg fraction with different biotechnological applications / Estévez N., Fuciños P., Fuciños C., Jauregi P., Tovar C. A., Rúa M. L. *Food Hydrocolloids*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106095>. 11. Nongonierma A. B., Fitz Gerald R. J. The scientific evidence for the role of milk protein-derived bioactive peptides in humans: A review. *Journal of Functional Foods*. August 2015. Vol. 17. P. 640–656. 12. Smith T. J., Campbell R. E., Drake M. A. Sensory properties of milk protein ingredients. *Advanced dairy chemistry. Vol. 1B: Proteins: Applied aspects* / McSweeney P.L.H., O'Mahony J. A., eds. 4th ed. London : Springer, 2016. P. 197–223. 13. Gésan-Guizieu G. An overview of membrane applications in the dairy industry. *New food*. 2007. Issue 2. URL: newfoodmagazine.com/article/1378/an-overview-of-membrane-applications-in-the-dairy-industry/ (дата звернення: 15.04.2025). 14. Morr CV, Ha EYW. Whey protein concentrates and isolates: Processing and functional properties. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*. 1993. Vol. 33. P. 431–476. DOI: 10.1080/10408399309527643. 15. Whey protein concentrate (WPC) standard. American Dairy Products Institute. 2016. URL: <https://adpi.org/ingredient-resources/whey-protein-concentrate/> (дата звернення: 15.04.2025). 16. Composite inorganic anion exchange membrane for electrodialytic desalination of milky whey / Yu. Dzyazko, L. Rozhdestveskaya, Yu. Zmievskii, V. Zakharov, V. Myronchuk. *Materials Today : Proceedings*. 2019. Vol. 6, Part 2. P. 250–259. doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.102 17. Impact of Preheating Temperature on the Separation of Whey Proteins When Combined with Chemical or Bipolar Membrane Electrochemical Acidification Claudie Aspirault *Int. J. Mol. Sci.* 2020. Vol. 21. P. 2792. 18. Liang M, Chen VVYT, Chen HL, Chen WL. A simple and direct isolation of whey components from raw milk by gel filtration chromatography and structural characterization by Fourier transform Raman spectroscopy. *Talanta*. 2006 Jul. 15. Vol. 69(5). P. 1269–1277. DOI: 10.1016/j.talanta.2006.01.008. Epub 2006 Feb 10. 19. Neyestani TR, Djalali M, Pezeshki M. Isolation of alpha-lactalbumin, beta-lactoglobulin, and bovine serum albumin from cow's milk using gel filtration and anion-exchange chromatography including evaluation of their antigenicity. *Protein Expression and Purification*. 2003. Vol. 29. P. 202–208. 20. Santos MJ, Teixeira JA, Rodrigues LR. Fractionation and recovery of whey proteins by hydrophobic interaction chromatography. *Journal of Chromatography B, Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences*. 2011. Vol. 879. P. 475–479. 21. Du QY, Lin DQ, Zhang QL, Yao SJ. An integrated expanded bed adsorption process for lactoferrin and immunoglobulin G purification from crude sweet whey. *Journal of Chromatography B Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences*. 2014. Vol. 1. P. 947–948, 201–207. 22. Bonnaillie LM, Tomasula PM. Whey protein fractionation. *Whey processing, functionality and health benefits* / Onwulata CI, Huth PJ, eds. Ames, IA : Wiley-Blackwell, 2008. 23. Desalination of whey by electrodialysis and ion exchange resins: analysis of both processes with regard to sustainability by calculating their cumulative energy demand / Michael Greiter M. Greiter et al. *Journal of Membrane Science*. 2002. Vol. 210. P. 91–102. 24. Kim JI, Choi DY, Row KH. Separation of whey proteins by anion-exchange membranes. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2003. Vol. 20. P. 538–541. 25. Stojadinovic M., Burazer L., Ercili-Cura D., et al. One-step method for isolation and purification of native beta-lactoglobulin from bovine whey. *Journal of the Science of Food & Agriculture*. 2012. Vol. 92. P.1432–1440. 26. Alice Marciniak. Production of highly purified fractions of α -lactalbumin and β -lactoglobulin from cheese whey using high hydrostatic pressure *Journal of Dairy Science*. 2020. Vol. 103. No. 9. 27. Paula Nicolása. Magnetic solid-phase extraction: A nanotechnological strategy for cheese whey protein recovery. *Journal of Food Engineering*. 2019. Vol. 263. P. 380–38. 28. Yadav Jay Shankar Singh, Yan Song, Pilli Sridhar, Kumar Lalit, Tyagi RD, Surampalli RY. Cheese whey: A potential resource to transform into bioprotein, functional/nutritional proteins and bioactive peptides. *Biotechnology Advances*. 2015. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2015.07.00.