

УДК 544.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/28>**Петренко Т.В.**

Національний університет харчових технологій

Ковальова С.О.

Національний університет харчових технологій

Макаренко О.Г.

Національний університет харчових технологій

Майборода О.І.

Національний університет харчових технологій

ДЗЕТА-ПОТЕНЦІАЛ ЯК ФАКТОР СТАБІЛЬНОСТІ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ

Дисперсні системи, що охоплюють колоїдні розчини, суспензії, емульсії та піни, є критично важливими компонентами в багатьох технологічних процесах та широко використовуються у харчовій, фармацевтичній, косметичній промисловості, а також у водоочищенні. Однак їхня термодинамічна нестабільність – схильність до самовільної агрегації, седиментації чи коалесценції – є однією з ключових проблем, що прямо обмежує якість, функціональні властивості та термін придатності кінцевих продуктів.

Одним із фундаментальних параметрів, який визначає стабільність цих гетерогенних систем, є дзета-потенціал (ζ -потенціал). Він являє собою різницю потенціалів на площині ковзання (зсуву) подвійного електричного шару (ПЕШ) і слугує мірою сили електростатичного відштовхування між диспергованими частинками. Величина ζ -потенціалу є надійним індикатором стійкості дисперсної системи до процесів дестабілізації, таких як агрегація або флокуляція.

Ця стаття представляє комплексний аналіз ролі ζ -потенціалу в стабілізації різноманітних дисперсних систем на основі сучасних наукових досліджень. Розглянуто особливості його впливу на різні типи систем:

- **Ліофобні колоїди:** Високе абсолютне значення ζ -потенціалу (зазвичай $>|25-30|$ мВ) створює значний енергетичний бар'єр, який є головним механізмом запобігання коагуляції та флокуляції.
- **Суспензії:** ζ -потенціал необхідний для підтримання гомогенності, оскільки електростатичне відштовхування запобігає агрегації частинок, яка б прискорила седиментацію.
- **Емульсії:** Значний ζ -потенціал створює відштовхування між диспергованими краплями, що є ключовим для запобігання їхньому злиттю (коалесценції).
- **Піни:** Заряджені поверхні рідких плівок створюють електростатичне відштовхування, яке протидіє їхньому стоншенню та підвищує стабільність піни.
- **Нанодисперсні системи:** Через високу питому поверхню, високе абсолютне значення ζ -потенціалу є критично важливим для забезпечення сильного відштовхування та запобігання агрегації наночастинок.

Проаналізовано ключові фактори, що найбільше впливають на величину ζ -потенціалу, включаючи рН середовища та концентрацію електролітів. Збільшення концентрації іонів електролітів призводить до стискання дифузійного шару ПЕШ і, відповідно, до зменшення ζ -потенціалу. Встановлено, що вплив іонів на ζ -потенціал швидко зростає з їхньою валентністю, особливо для іонів, заряд яких протилежний заряду колоїдної частинки.

Показано, що існує критичне значення рН, яке називається ізоелектричною точкою (ІЕТ), при якому заряд поверхні частинок і, відповідно, ζ -потенціал дорівнює нулю. ІЕТ є точкою найнижчої стабільності системи, оскільки електростатичне відштовхування відсутнє. Отже, високе абсолютне значення ζ -потенціалу, незалежно від знаку заряду, є визначальним для забезпечення ефективного відштовхування та запобігання агрегації.

Висвітлено широке практичне застосування контролю ζ -потенціалу в промисловості: для оптимізації рецептур, контролю якості сировини та готової продукції, а також для прогнозування терміну

© Петренко Т.В., Ковальова С.О., Макаренко О.Г., Майборода О.І., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

придатності. Зокрема, у фармацевтиці це дозволяє підвищити біодоступність ліків, а в косметичці – контролювати текстуру і проникнення активних інгредієнтів.

Таким чином, ζ -потенціал є потужним і фундаментальним інструментом для прогнозування, розуміння та активного контролю стабільності дисперсних систем, що дозволяє суттєво підвищити технологічну ефективність виробництва та покращити якість кінцевої продукції у різних галузях.

Ключові слова: дзета-потенціал, дисперсні системи, стабільність, емульсії, суспензії, колоїди, наночастинки, агрегація, флокуляція, коалесценція, електростатичне відштовхування, ізоелектрична точка.

Постановка проблеми. Дисперсні системи поширені в природі та технологічних процесах, демонструючи різноманіття агрегатних станів, розмірів частинок та міжфазних взаємодій. Стабільність дисперсних систем, що складаються з дрібнодисперсних частинок у рідкому або газоподібному середовищі, є ключовим фактором, що визначає властивості широкого спектра продуктів, включаючи харчові продукти, косметичні засоби, фармацевтичні препарати та будівельні матеріали.

Суспензії, як дисперсні системи з твердою дисперсною фазою в рідкому дисперсійному середовищі, знаходять широке застосування в різних галузях. У харчовій промисловості прикладами суспензій є крохмальне молоко, неочищені рослинні олії, дифузійний сік та вапняне молоко. Технологічні процеси, такі як адсорбційне рафінування олії, використовують суспензії бентонітових глин як адсорбенти. Водні суспензії глинистих мінералів застосовуються для очищення та освітлення рідких продуктів. Концентровані суспензії, такі як косметичні та фармацевтичні препарати, цементні розчини, лаки та фарби, є важливими компонентами в будівництві та медицині. Приготування паст, включаючи зубні пасту, передбачає використання рідин з підвищеною в'язкістю та температурою кипіння, що демонструє складність рецептур.

Емульсії також широко представлені в природі та промисловості. Прикладами є молоко, вершки, сметана та маргарин. Водні емульсії, де вода є дисперсійним середовищем, а неполярні рідини – дисперсною фазою, поширені в природі та використовуються в олієжировій, молочній, кондитерській та хлібопекарській промисловості.

Суспензії та емульсії, як гетерогенні дисперсні системи, характеризуються термодинамічною нестійкістю, що проявляється у седиментації та агрегації дисперсної фази. Це зумовлює значну увагу, що приділяється дослідженню їхньої стабільності, з метою оптимізації їхніх властивостей та розширення сфери застосування [1].

Одним з ключових параметрів, що визначають стабільність дисперсних систем, є дзета-потенціал. Він характеризує на площині ковзання (зсуву) і відображає силу електростатичного від-

штовхування між частинками. Величина дзета-потенціалу може служити індикатором стійкості дисперсної системи до агрегації або флокуляції.

Сьогодні існує недостатнє розуміння взаємозв'язку між величиною дзета-потенціалу та стабільністю дисперсних систем у різних умовах, таких як зміна рН, іонної сили, температури, а також при додаванні різних хімічних речовин. Крім того, існує потреба у розробці стандартизованих методик вимірювання дзета-потенціалу та інтерпретації отриманих даних, особливо для складних дисперсних систем.

Недостатньо вивченими залишаються питання впливу дзета-потенціалу на довготривалу стабільність дисперсних систем, а також на їх поведінку в умовах, що імітують реальні промислові процеси. Існує також потреба у розробці практичних рекомендацій щодо використання дзета-потенціалу для контролю та оптимізації стабільності дисперсних систем у промислових процесах, що дозволить підвищити ефективність виробництва та покращити якість кінцевих продуктів.

Таким чином, дослідження дзета-потенціалу як фактора стабільності дисперсних систем є актуальним та має велике практичне значення для різних галузей науки та промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження в галузі колоїдної хімії підкреслюють зростаючу важливість дзета-потенціалу як ключового параметра, що визначає стабільність дисперсних систем. Сучасні наукові публікації демонструють широкий спектр застосувань дзета-потенціалу, від наноматеріалів і фармацевтики до харчової промисловості та екології.

Дзета-потенціал на поверхні наночастинок оксидів металів визначає їх взаємодію з біологічними молекулами та клітинами. Змінюючи поверхневий заряд наночастинок, можна контролювати їх дзета-потенціал і, відповідно, їх біомедичні властивості. Оптимізація дзета-потенціалу наночастинок дозволяє покращити їх ефективність у доставці ліків, діагностиці та терапії. Точне регулювання дзета-потенціалу, поряд з розміром, формою, поверхнею та кристалічною структурою наночастинок оксидів металів є ключовим для оптимізації їх біомедичних властивостей

[2]. Дослідження показують, що дзета-потенціал безпосередньо впливає на біорозподіл, клітинне поглинання, реакційну здатність та здатність до вивільнення іонів.

Автори роботи [3] провели масштабну роботу зі збору даних про дзета-потенціали наночастинок оксидів металів (MONPs) з різноманітних джерел, включаючи наукові статті, публічні бази даних та дослідницькі звіти. Автори інтерпретували вплив на стабільність наночастинок і дзета-потенціал різних факторів, таких як електронегативність, ковалентний індекс, заряд металу та інші параметри на дзета-потенціал. Особливу увагу було приділено аналізу впливу розміру наночастинок та типу середовища на дзета-потенціал і на агрегацію наночастинок та їх взаємодію з біологічними молекулами.

У фармацевтичній галузі дзета-потенціал відіграє важливу роль у розробці стабільних лікарських форм, таких як наноліпосоми та наносуспензії. Останні дослідження демонструють, що контроль дзета-потенціалу дозволяє підвищити біодоступність лікарських речовин і продовжити термін їх зберігання [4].

Дзета-потенціал відіграє ключову роль у визначенні стабільності наночастинок оксиду кремнію (SiO_2) у водних середовищах [5]. Показано, що величина та знак дзета-потенціалу безпосередньо впливають на схильність наночастинок до агрегації або диспергування. У статті детально розглянуто, як зміни рН та іонної сили водних розчинів впливають на дзета-потенціал SiO_2 наночастинок. Показано, що збільшення іонної сили розчину має ефект пригнічення дзета-потенціалу, що призводить до нестабільності наночастинок. Результати дослідження мають важливе практичне значення для різних сфер застосування наночастинок SiO_2 , таких як фармацевтика і матеріалознавство.

У роботі [6] надано вичерпний аналіз теорії та практичного застосування дзета-потенціалу, детально розглянуто теоретичні основи дзета-потенціалу, включаючи його визначення, вимірювання та інтерпретацію, пояснено зв'язок дзета-потенціалу зі стабільністю колоїдних систем і його вплив на взаємодію між частинками. У статті обговорено різні методи вимірювання дзета-потенціалу, включаючи електрофорез, електроакустичні методи та інші, проаналізовано переваги і недоліки кожного методу. Автори розглядають широкий спектр застосувань дзета-потенціалу в колоїдній науці, у тому числі стабілізацію та дестабілізацію колоїдних суспензій, флокуляцію та коагуляцію, адсорбцію та десорб-

цію, електрокінетичні явища. У статті висвітлено практичне значення дзета-потенціалу в різних галузях, таких як водоочищення, фармацевтика, виробництво кераміки, виробництво паперу.

Метою даної роботи є комплексний аналіз сучасних досліджень, що стосуються ролі дзета-потенціалу в стабілізації дисперсних систем, а саме систематизація ключових факторів, що визначають величину дзета-потенціалу та їхній вплив на стабільність дисперсних систем; оцінка можливостей застосування дзета-потенціалу як предиктора та регулятора стабільності дисперсних систем; виявлення перспективних напрямів подальших досліджень у цій галузі.

Виклад основного матеріалу. Колоїдні розчини являють собою дисперсні системи, в яких розмір частинок дисперсної фази коливається від 1 до 1000 нм. Залежно від характеру взаємодії між дисперсною фазою та дисперсійним середовищем, колоїди поділяють на ліофільні (стійкі) та ліофобні (нестійкі).

Ліофільні колоїди, такі як розчини білків або полімерів у воді, є термодинамічно стабільними завдяки сильному сольватному шару, що утворюється навколо колоїдних частинок внаслідок їхньої спорідненості до розчинника. Дзета-потенціал у таких системах може відігравати другорядну роль у стабілізації, оскільки головним фактором є стеричний та ентропійний ефекти, зумовлені сольватними оболонками. Однак наявність певного заряду на поверхні ліофільних частинок все ж сприяє їхньому відштовхуванню та запобігає агрегації при зміні умов середовища (наприклад, додаванні електролітів у високій концентрації, що може призвести до десольватації).

Ліофобні колоїди, такі як колоїди металів або сульфідів, є термодинамічно нестійкими і потребують додаткових стабілізуючих факторів для запобігання коагуляції та флокуляції – процесам злипання дрібних частинок у більші агрегати, що призводить до осадження. У випадку ліофобних колоїдів, електростатичне відштовхування, зумовлене наявністю електричного заряду на поверхні колоїдних частинок і, відповідно, значним за величиною дзета-потенціалом, є основним механізмом стабілізації.

Високе абсолютне значення дзета-потенціалу (зазвичай $> |25-30|$ мВ) створює значний енергетичний бар'єр, який перешкоджає зближенню частинок на відстані, достатній для прояву сил Ван дер Ваальса, що викликають притягання. Зменшення дзета-потенціалу, наприклад, шляхом додавання електролітів, призводить до стискання

електричного подвійного шару, зменшення електростатичного відштовхування та, як наслідок, до втрати стабільності та коагуляції колоїду. Критичне значення дзета-потенціалу, при якому починається швидка коагуляція, залежить від природи колоїдної системи, розміру частинок та інших факторів.

Суспензії – це дисперсні системи, що складаються з відносно великих твердих частинок (розміром понад 1 мкм), розподілених у рідкому дисперсійному середовищі. На відміну від колоїдів, на стабільність суспензій значний вплив має гравітаційна сила, що зумовлює седиментацію – осідання частинок під дією сили тяжіння.

Дзета-потенціал відіграє важливу роль у підтриманні гомогенності суспензій, запобігаючи агрегації та, як наслідок, прискоренню седиментації. Високий дзета-потенціал призводить до електростатичного відштовхування між частинками, що перешкоджає їхньому злипанню у більші агрегати з вищою швидкістю осідання за законом Стокса.

Зменшення дзета-потенціалу в суспензіях може призвести до флокуляції – утворення рихлих агрегатів (флокул), які прискорюють седиментацію, але завдяки пористій структурі утворюють менш щільний осад, ніж щільні агрегати, що виникають при коагуляції.

Для стабілізації суспензій часто використовують стабілізатори, які адсорбуються на поверхні твердих частинок, змінюючи їхній поверхневий заряд і, відповідно, дзета-потенціал, або створюючи стеричний бар'єр, що запобігає зближенню частинок.

Емульсії – це дисперсні системи, що складаються з двох або більше незмішуваних рідин, одна з яких диспергована у вигляді крапель в іншій. Основною проблемою стабільності емульсій є коалесценція – злиття дрібних крапель у більші, що призводить до розшарування емульсії на окремі фази.

Дзета-потенціал на поверхні диспергованих крапель відіграє важливу роль у запобіганні коалесценції. Наявність значного за величиною дзета-потенціалу створює електростатичне відштовхування між краплями, перешкоджаючи їхньому зближенню на відстань, достатню для злиття під дією сил Ван дер Ваальса.

Для стабілізації емульсій широко використовуються емульгатори – поверхнево-активні речовини (ПАР), які адсорбуються на міжфазній межі, знижуючи міжфазний натяг і утворюючи механічний бар'єр, що перешкоджає зближенню

крапель. Багато емульгаторів також впливають на поверхневий заряд крапель, змінюючи величину дзета-потенціалу та сприяючи електростатичній стабілізації.

Наприклад, аніонні ПАР надають краплям негативного заряду, що призводить до їхнього взаємного відштовхування. Катіонні ПАР, навпаки, заряджають краплі позитивно. Неіоногенні ПАР стабілізують емульсії переважно за рахунок стеричного ефекту, але також можуть впливати на гідратацію поверхні крапель і, опосередковано, на електростатичні взаємодії.

Піни – це дисперсні системи, в яких газ диспергований у рідині у вигляді бульбашок. Стабільність піни визначається стійкістю рідких плівок, що розділяють газові бульбашки, до руйнування (розриву або злиття).

Дзета-потенціал на поверхні рідких плівок відіграє важливу роль у їхній стабілізації. Заряджені поверхні плівок створюють електростатичне відштовхування, яке протидіє їхньому стоншенню під дією капілярних сил та гравітації. Високий дзета-потенціал сприяє утворенню структурно-механічного бар'єру (бар'єру Дерягіна), який запобігає зближенню протилежних поверхонь плівки до критичної відстані, при якій можуть проявитися сили Ван дер Ваальса, що призводять до розриву плівки.

Для стабілізації пін широко використовуються піноутворювачі – поверхнево-активні речовини, які адсорбуються на межі розділу газ-рідина, знижують поверхневий натяг і утворюють пружні плівки. Багато піноутворювачів також впливають на заряд поверхні плівок, збільшуючи абсолютне значення дзета-потенціалу та підвищуючи стабільність піни.

Фактори, що зменшують дзета-потенціал (наприклад, додавання електролітів), можуть призвести до дестабілізації піни та її швидкого руйнування.

Нанодисперсні системи, що включають наночастинки, нановолокна та нанотрубки, набувають все більшого значення в різних галузях завдяки своїм унікальним властивостям. Однак через високу питому поверхню та велику поверхневу енергію, наночастинки схильні до агрегації, що ускладнює їхнє рівномірне диспергування та використання їхнього повного потенціалу.

Дзета-потенціал є критично важливим фактором стабілізації нанодисперсних систем. Високе абсолютне значення дзета-потенціалу забезпечує сильне електростатичне відштовхування між наночастинками, запобігаючи їхній агрегації та

сприяючи утворенню стабільних колоїдних розчинів або суспензій.

Особливості впливу дзета-потенціалу на нанодисперсні системи полягають у наступному:

- Значна роль поверхневого заряду: через велику питому поверхню, поверхневий заряд наночастинок має значний вплив на їхні взаємодії та стабільність.

- Вплив розміру та форми наночастинок: дзета-потенціал може залежати від розміру та форми наночастинок, що, в свою чергу, впливає на їхню схильність до агрегації.

- Конкуренція між електростатичним відштовхуванням та силами Ван дер Ваальса: на малих відстанях сили Ван дер Ваальса можуть бути значними, тому для стабілізації нанодисперсних систем часто потрібен високий дзета-потенціал для подолання цих сил.

- Важливість стеричної стабілізації: крім електростатичної стабілізації, для запобігання агрегації наночастинок широко використовують полімерні стабілізатори, які адсорбуються на їхній поверхні, створюючи стеричний бар'єр. Ці полімери також можуть впливати на дзета-потенціал поверхні наночастинок.

Контроль дзета-потенціалу є ключовим аспектом при розробці та застосуванні нанодисперсних систем у таких областях, як медицина (доставка ліків), каталіз, матеріалознавство та електроніка.

Частинки твердої дисперсної фази, які зависли в рідині, перебувають у безперервному хаотичному русі. Завдяки надлишку вільної енергії вони під час зіткнення повинні злипатися і утворювати осад. Проте вже близько 130 років тому навчилися готувати стійкі дисперсні системи, які руйнуються лише за певних умов. Пояснити це можна, лише допустивши, що дисперсні частинки в цих розчинах покриті якимось захисним шаром, який перешкоджає їх злипанню. Можливі різні механізми захисної дії, але найбільше значення має подвійний електричний шар (ПЕШ). Він виникає внаслідок адсорбції іонів електролітів на поверхні кристалів твердої фази. Під час зіткнення частинок з однойменно зарядженими поверхневими шарами іонів виникають сили відштовхування, які не дають частинкам злипатися.

Вирішальний внесок для встановлення будови ПЕШ мали дослідження електрокінетичних явищ (електрофорез, електроосмос). Назвали їх електрокінетичними тому, що під дією електричного поля спостерігалися ті чи інші переміщення речовин у дисперсних системах.

Електрокінетичні явища можна пояснити існуванням на поверхні дисперсної фази подвійного

електричного шару, тобто виникненням між дисперсною фазою і дисперсійним середовищем різниці потенціалів, яка зумовлена адсорбцією іонів. Тобто, на частинках виникають два стрибки потенціалу. Один з них, більший за величиною, виникає між потенціалвизначальними іонами і протиіонами. Цей стрибок потенціалу називається електричним, або термодинамічним потенціалом і позначається літерою ϕ . Другий потенціал виникає на межі між дифузійним і адсорбційним шаром і позначається літерою ζ . Цей потенціал визначає швидкість переміщення фаз і має назву електрокінетичний потенціал, або дзета-потенціал. Дзета-потенціал має знак заряду твердої поверхні, він менший за ϕ -потенціал. ζ -потенціал суттєво змінюється залежно від умов, у яких перебуває система.

Дзета-потенціал – це найважливіша характеристика ПЕШ, його величина зумовлює стабільність дисперсної системи. Передусім, величина ζ -потенціалу залежить від концентрації присутніх у середовищі електролітів. Збільшення концентрації іонів у золі призводить до зменшення товщини дифузійного шару міцел і, відповідно, до зменшення величини дзета-потенціалу. У той же час величина загального потенціалу ПЕШ – ϕ при цьому залишається незмінною. Якщо дифузійний шар, в результаті збільшення концентрації іонів стороннього електроліту, стискається до товщини адсорбційного шару, то дзета-потенціал стає рівним нулю.

Величина дзета-потенціалу залежить не тільки від концентрації іонів електроліту, але і від їх валентності, при чому, головну роль проявляють іони, заряд яких протилежний заряду гранули. Вплив іонів на величину ζ -потенціалу швидко зростає з їх валентністю. Якщо валентність іонів однакова, то вплив іонів на дзета-потенціал зростає пропорційно об'єму іонів. Це пояснюється тим, що зі збільшенням об'єму іонів, збільшується їх здатність поляризуватися, що дозволяє їм ближче підійти до поверхні частинок. Збільшення радіусів іонів призводить до зменшення їх ступеня гідратації, що також сприяє потраплянню іонів в адсорбційний шар. Великий вплив на величину дзета-потенціалу виявляють одновалентні органічні катіони барвників і алкалоїдів, які легко поляризуються. Фактично ζ -потенціал є критерієм стабільності дисперсних систем. При $\zeta \leq 0,03$ В товщина дифузійного шару дорівнює нулю: всі протиіони при цьому розміщені в адсорбційному шарі, що призводить до миттєвої агрегації частинок.

Також на значення дзета-потенціалу має значний вплив рН середовища. Поверхня частинок у дисперсній системі може мати позитивний або негативний заряд, залежно від її хімічного складу та взаємодії з іонами в розчині. Зміна рН середовища призводить до зміни заряду поверхні частинок, що, у свою чергу, впливає на дзета-потенціал. У кислому середовищі, коли поверхня частинок має позитивний заряд, дзета-потенціал також буде позитивним. У лужному середовищі, коли поверхня частинок має негативний заряд, дзета-потенціал також буде негативним. Однак, існує певне значення рН, при якому заряд поверхні частинок дорівнює нулю. Це значення називається ізоелектричною точкою (ІЕТ). При ІЕТ стабільність дисперсної системи є найнижчою, оскільки відсутнє електростатичне відштовхування між частинками. Віддалення від ІЕТ у будь-якому напрямку призводить до збільшення абсолютного значення дзета-потенціалу та підвищення стабільності дисперсної системи. Тому, рН є критичним фактором, що впливає на дзета-потенціал, і його контроль є важливим для забезпечення стабільності дисперсних систем [7-11].

Аналіз останніх наукових публікацій показує, що дзета-потенціал залишається ключовим параметром для розуміння та контролю стабільності дисперсних систем у різних галузях.

Вимірювання та регулювання дзета-потенціалу є важливим інструментом для забезпечення якості та стабільності харчових продуктів:

- високий дзета-потенціал запобігає агрегації частинок, забезпечуючи тривале збереження однорідності продукту;
- оптимізація дзета-потенціалу дозволяє контролювати реологічні властивості харчових продуктів, досягаючи бажаної текстури;
- підвищення стабільності дисперсних систем сприяє збільшенню терміну придатності продуктів;
- контроль дзета-потенціалу дозволяє досягти оптимальних органолептичних властивостей харчових продуктів [12, 13].

Дзета-потенціал є важливим інструментом для створення високоякісних та безпечних косметичних продуктів, що відповідають вимогам споживачів:

- вимірювання дзета-потенціалу допомагає розробникам створювати стабільні емульсії та дисперсії, запобігаючи агрегації частинок і забезпечуючи тривалий термін зберігання продукту;
- контроль дзета-потенціалу дозволяє регулювати такі характеристики, як текстура, кон-

систенція та проникнення активних інгредієнтів у шкіру;

- знання дзета-потенціалу допомагає мінімізувати ризик небажаних реакцій, таких як подразнення шкіри, через стабільність та передбачуваність косметичних формул;

- цей параметр використовується для контролю якості сировини та готової продукції [14-16].

Використання дзета-потенціалу є важливим інструментом для розробки та виробництва ефективних та стабільних фармацевтичних препаратів:

- вимірювання дзета-потенціалу дає змогу прогнозувати агрегацію або флокуляцію частинок, що критично важливо для терміну придатності та якості лікарських препаратів;

- контроль дзета-потенціалу дозволяє регулювати електростатичні взаємодії між частинками, покращуючи дисперсність та однорідність лікарських форм;

- впливаючи на дзета-потенціал, можна змінювати взаємодію лікарських частинок з біологічними мембранами, підвищуючи їх проникнення та терапевтичну ефективність;

- вимірювання дзета-потенціалу використовується для контролю якості на різних етапах виробництва, забезпечуючи відтворюваність та безпеку лікарських засобів [17-20].

Також, розуміння та контроль дзета-потенціалу є важливими для ефективного очищення води та забезпечення її якості [21-22].

Таким чином, численні дослідження підтверджують ключову роль дзета-потенціалу в стабілізації дисперсних систем. Цей параметр є не лише цінним індикатором електростатичних взаємодій між частинками, але й потужним інструментом для прогнозування та контролю стабільності дисперсних систем у різних галузях.

Дослідження демонструють, що високий дзета-потенціал, незалежно від знаку заряду, забезпечує ефективне електростатичне відштовхування, запобігаючи агрегації та коагуляції частинок. Це особливо важливо для харчової, фармацевтичної, косметичної та інших галузей, де стабільність продукту є критично важливою.

Визначення ізоелектричної точки, при якій дзета-потенціал дорівнює нулю, дозволяє ідентифікувати умови, що сприяють дестабілізації системи. Це дає можливість розробляти стратегії для оптимізації рецептур та процесів, забезпечуючи максимальну стабільність продукту.

Використання дзета-потенціалу як інструменту контролю якості дозволяє оперативно виявляти відхилення від заданих параметрів,

що сприяє запобіганню виробничих дефектів та забезпеченню високої якості продукції.

Висновки. Дзета-потенціал є фундаментальною характеристикою міжфазної межі, що має вирішальне значення для стабілізації різноманітних дисперсних систем. Його величина та знак безпосередньо впливають на електростатичні сили відштовхування між частинками, запобігаючи їхній агрегації (коагуляції, флокуляції, коалесценції) та забезпечуючи стабільність колоїдних розчинів, суспензій, емульсій, пін та нанодисперсних систем. Розуміння механізмів впливу та контроль дзета-потенціалу є ключовими для розробки стабільних дисперсних систем з бажаними властивостями для широкого спектра застосувань.

Основні аспекти дзета-потенціалу:

- Ключовий параметр стабільності: дзета-потенціал – це головний параметр, що характеризує електростатичне відштовхування між частинками в дисперсній системі. Чим вище його значення, тим сильніше відштовхування, і, відповідно, вища стабільність системи.

- Прогнозування стабільності: вимірювання дзета-потенціалу дозволяє прогнозувати стабіль-

ність дисперсних систем, слугуючи індикатором їхньої схильності до агрегації або флокуляції.

- Фактори впливу та регулювання: на величину дзета-потенціалу впливає низка факторів, зокрема рН середовища та концентрація електролітів. Контроль цих факторів дає змогу регулювати стабільність дисперсних систем.

- Широке застосування: дзета-потенціал широко використовується в різних галузях промисловості (харчовій, фармацевтичній, косметичній тощо) для оптимізації рецептур, контролю якості продукції та прогнозування терміну придатності.

- Розуміння та контроль процесів: вимірювання дзета-потенціалу є важливим для розуміння та контролю механізмів диспергування, агрегації або флокуляції, що дозволяє покращити властивості колоїдних розчинів, емульсій та суспензій на етапах розробки та виробництва.

Загалом, дзета-потенціал є потужним інструментом для прогнозування та контролю стабільності дисперсних систем. Його використання дає змогу оптимізувати технологічні процеси, підвищити якість продукції та розширити можливості застосування дисперсних систем у різних сферах.

Список літератури:

1. Грабовська О.В., Ковалевська Є.І., Максимова І.М., Подобій О.В. Фізична і колоїдна хімія: навч. посіб. Київ: НУХТ, 2017. 327 с.
2. Ніколова М.П., Чавалі М.С. Металооксидні наночастинки як біомедичні матеріали. *Біоміметика*. 2020. 5 (2). Р. 2. <https://doi.org/10.3390/biomimetics5020027>
3. Sizochenko N., Mikolajczyk A., Syzochenko M., Puzyn T., Leszczynski J. Zeta potentials (ζ) of metal oxide nanoparticles: A meta-analysis of experimental data and a predictive neural networks modeling. *NanoImpact*. 2021. 22. Р. 100317. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2021.100317>
4. Денг Л., Чен Л., Чжан Х., Ю Ч., Лю Х., Цю Ц., і Чжан Д. Роль дзета-потенціалу в наноліпосомах для доставки ліків: огляд. *Міжнародний журнал наномедицини*. 2022. 17. Р. 4667–4683. <https://doi.org/10.2147/IJN.S378122>
5. Лі Й., Кім С., Лі Д., Кім Х. Вплив дзета-потенціалу на стабільність наночастинок оксиду кремнію в водних розчинах. *Langmuir*. 2021. 37(37). Р. 10845–10853.
6. Hunter, R. J. Zeta potential in colloid science: principles and applications. *Advances in Colloid and Interface Science*. 1993. 43. Р. 137–175. <https://doi.org/10.1007/BF02830128>
7. Pochapski, D. J., Dos Santos, C. C., Leite, G. W., Pulcinelli, S. H., & Santilli, C. V. (2021). Zeta Potential and Colloidal Stability Predictions for Inorganic Nanoparticle Dispersions: Effects of Experimental Conditions and Electrokinetic Models on the Interpretation of Results. *Langmuir*, 37(45), 13379–13389. DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c02056
8. Ayala V., Herrera A. P., Latorre-Esteves M., Torres-Lugo M., Rinaldi C. Effect of surface charge on the colloidal stability and in vitro uptake of carboxymethyl dextran-coated iron oxide nanoparticles. *J Nanopart Res*. 2013. Vol. 15, No. 8. Р. 1874. DOI: 10.1007/s11051-013-1874-0.
9. Předota, M., Machesky, M. L., Wesolowski, D. J. Molecular Origins of the Zeta Potential. *Langmuir*. 2016. Vol. 32. No 40. Р. 10189–10198. DOI: 10.1021/acs.langmuir.6b02493.
10. Самойленко С.О., Отрошко Н.О., Аксьонова О.Ф., Добровольська О.В. Фізична та колоїдна хімія: навч. посіб. Харків: Світ Книг, 2024. 340 с.
11. Картель М., Лобанов В., Гороховатська М. Курс фізичної хімії. Київ: ТОВ «НВП «Інтерсервіс», 2011. 386 с.
12. Wu M., He X., Feng D. et al. The Emulsifying Properties, In Vitro Digestion Characteristics and Storage Stability of High-Pressure-Homogenization-Modified Dual-Protein-Based Emulsions. *Foods*. 2023. 12 (22). Р. 4141. <https://doi.org/10.3390/foods12224141>

13. Fillipi M.V., Genovese D.B., Lozano J.E. Zeta-Potential as a Way to Determine Optimal Conditions During Fruit Juice Clarification. *Food Engineering: Integrated Approaches*. 2008. P. 391–397. DOI:10.1007/978-0-387-75430-7_29
14. Пилипенко Т., Рябчук Ю., Єфімова В. Дослідження якості косметичних кремів для рук. *Технічні науки та технології*. 2017. №4 (10). С. 210–216. DOI: 10.25140/2411-5363-2017-4(10)-210-216
15. Пилипенко Т.М., Єфімова В.Г., Денисюк І.В. Дослідження фізико-хімічних характеристик косметичних рідин для обличчя. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. Том 30 (69). Ч. 2. С. 67–71. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.4-2/11>
16. Lee S.J., Han S.R., Jeong J.H., Kim J.D. Effects of Oil type on the Stability of Oil-in-Water Lipid Nanoemulsion. *J. of Korean Oil Chemists Soc.* 2016. Vol. 33. No 4. P. 667–675. <http://dx.doi.org/10.12925/jkocs.2016.33.4.667>
17. Kulkarni N.S., Ranpise N.S., Rathore D.S., Dhole S.N. Characterization of Self-Microemulsifying Dosage Form: Special Emphasis on Zeta Potential Measurement. *International. Journal of Pharmaceutical & Biological Archives*. 2019. Vol. 10. Issue 3. P. 172–179.
18. Bhatt N., Prasad R.K., Singh K., Panpalia G.M. Stability study of O/W emulsions using zeta potential. *J. Chem. Pharm. Res.* 2010. 2 (1). P. 512–527.
19. Soheyla H., Foruhe Z. Effect of Zeta Potential on the Properties of Nano-Drug Delivery Systems – A Review (Part 2). *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*. 2013. 12 (2). P. 265–273. <http://dx.doi.org/10.4314/tjpr.v12i2.20>
20. Mfon R.E., Amri Z.A. Synthesis, Characterisation and Zeta Potential of Silver Nanoparticles. *American Journal of Sciences and Engineering Research*. 2023. Volume 6. Issue 1. P. 104–112.
21. Душкін С.С. Підвищення екологічної безпеки при підготовці питної води з використанням модифікованого кварцового завантаження фільтруючих матеріалів. *Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»*. 2019. 6 (2). С. 54–59.
22. Ordaz-Diaz L.A., Valle-Cervantes S., Rodriguez-Rosales J. Wastewater Internal Treatment for Recirculation in the Pulp and Paper Process. *BioResources*. 2017. 12 (3). P. 5953–5969.

Petrenko T.V., Kovalova S.O., Makarenko O.H., Mayboroda O.I. ZETA POTENTIAL AS A STABILITY FACTOR OF DISPERSED SYSTEMS

Dispersed systems, including colloidal solutions, suspensions, emulsions, and foams, are critical components in numerous technological processes and are widely used in the food, pharmaceutical, cosmetic industries, as well as in water treatment. However, their thermodynamic instability – the tendency towards spontaneous aggregation, sedimentation, or coalescence – is a major challenge that directly limits the quality, functional properties, and shelf life of final products.

One of the fundamental parameters determining the stability of these heterogeneous systems is the zeta potential (ζ -potential). It represents the potential difference at the plane of shear of the electrical double layer (EDL) and serves as a measure of the strength of electrostatic repulsion between dispersed particles. The magnitude of the ζ -potential is a reliable indicator of the dispersed system's resistance to destabilization processes such as aggregation or flocculation.

This article presents a comprehensive analysis of the role of ζ -potential in the stabilization of various dispersed systems based on current scientific research. The specifics of its influence on different types of systems are examined:

- Lyophobic Colloids: A high absolute value of ζ -potential (typically $>|25-30|$ mV) creates a significant energy barrier, which is the main mechanism for preventing coagulation and flocculation.*
- Suspensions: The ζ -potential is essential for maintaining homogeneity, as electrostatic repulsion prevents the agglomeration of particles that would otherwise accelerate sedimentation.*
- Emulsions: A significant ζ -potential creates repulsion between the dispersed droplets, which is key to preventing their merging (coalescence).*
- Foams: The charged surfaces of the liquid films create electrostatic repulsion that counteracts their thinning and enhances the foam's stability.*
- Nanodispersed Systems: Due to their high specific surface area, a high absolute ζ -potential is critically important for ensuring strong repulsion and preventing aggregation of nanoparticles.*

The key factors that most influence the magnitude of the ζ -potential, including medium pH and electrolyte concentration, are analyzed. An increase in the concentration of electrolyte ions leads to the compression of the diffuse layer of the EDL and, consequently, to a decrease in the ζ -potential. It is established that the influence of ions on the ζ -potential increases rapidly with their valency, especially for ions whose charge is opposite to that of the colloidal particle.

It is shown that a critical pH value exists, called the isoelectric point (IEP), at which the surface charge of the particles and, consequently, the ζ -potential is equal to zero. The IEP represents the point of lowest stability of the system, as electrostatic repulsion is absent. Therefore, a high absolute value of the ζ -potential, regardless of the sign of the charge, is crucial for ensuring effective repulsion and preventing aggregation.

The broad practical application of ζ -potential control in industry is highlighted: for formulation optimization, quality control of raw materials and finished products, and for shelf-life prediction. Specifically, in pharmaceuticals, it allows for increased bioavailability of drugs, and in cosmetics – for controlling texture and the penetration of active ingredients.

Thus, the ζ -potential is a powerful and fundamental tool for predicting, understanding, and actively controlling the stability of dispersed systems, which significantly increases the technological efficiency of production and improves the quality of final products across various industries.

Key words: zeta potential, dispersed systems, stability, emulsions, suspensions, colloids, nanoparticles, aggregation, flocculation, coalescence, electrostatic repulsion.

Дата надходження статті: 21.09.2025

Дата прийняття статті: 15.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025