

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА**  
**ДИЗАЙНУ**

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**ШВЕЦЬ ВЯЧЕСЛАВ ВАСИЛЬОВИЧ**

УДК 678: 615.451.1

**Дисертація**

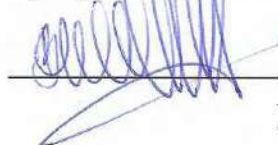
**РОЗРОБЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА**  
**ГІДРОГЕЛІВ СТОМАТОЛОГІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ**  
**ДІЇ**

Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія

Галузь знань 16 Хімічна та біоінженерія

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Швець В.В.

Науковий керівник **Ляшок Ірина Олександрівна**, кандидат технічних наук,  
доцент.

Київ – 2026

## АНОТАЦІЯ

*Швець В.В.* Розроблення полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення комбінованої дії. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія. – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого науково-прикладного завдання, яке полягає у розробленні способів формування та модифікації полімерних плівкових матеріалів і гідрогелів стоматологічного призначення комбінованої дії з метою забезпечення стабільності фізико-механічних, реологічних та медико-біологічних властивостей композицій.

Актуальність дослідження. Сучасний етап розвитку терапевтичної стоматології характеризується пошуком нових підходів до лікування запальних захворювань пародонта в умовах зростаючої антибіотикорезистентності мікроорганізмів та недостатньої ефективності традиційних лікарських форм (гелів, мазей). Рішенням цієї проблеми є створення вітчизняних полімерних біодеградабельних плівок та гідрогелів комбінованої дії, модифікованих фітоекстрактами кропиви дводомної *Urtica dioica* та кори дуба *Quercus cortex*. Такі системи забезпечують високу біоадгезію до слизової оболонки порожнини рота та пролонговане вивільнення антисептичних, знеболювальних і регенеративних компонентів безпосередньо у вогнище запалення. Розроблення та впровадження зазначених терапевтичних систем є важливим кроком для підвищення ефективності лікування, зниження медикаментозного навантаження на організм та скорочення термінів реабілітації пацієнтів.

Метою роботи є розроблення полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення комбінованої дії.

У відповідності до поставленої мети роботи вирішувалися такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан технологій виробництва та досвід застосування полімерних плівкових матеріалів і гідрогелів у стоматологічній практиці;
- обґрунтувати та обрати оптимальний склад полімерних композицій на основі полівінілового спирту у поєднанні з полісахаридами для створення плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення комбінованої дії;
- дослідити модифікуючий вплив глини монтморилонітового типу на структурні та фізико-механічні властивості отриманих композицій;
- розробити рецептуру полімерних композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК модифікованих водними екстрактами кропиви дводомної *Urtica dioica* та кори дуба *Quercus cortex* для забезпечення комбінованої дії матеріалів;
- дослідити чутливість тест-культур до водного екстракту кори дуба *Quercus cortex* за показниками метаболічної активності та оцінити вплив на антиадгезивні властивості бактерій та формування біоплівок;
- здійснити апробацію розроблених полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів та оцінити потенційну ефективність отриманих матеріалів для застосування у стоматологічній практиці.

Плівки на основі полісахаридів одержували на платформі з органічного скла за допомогою ручного рамкового аплікатора для нанесення покриттів товщиною 1 мм при температурі полімерної композиції 60 °С з наступним висушуванням за нормальних умов. Гідрогелі отримували методом кріоструктурування при температурі -15°С протягом 24 годин.

Для оцінки впливу складу композицій та виду модифікатора на реологічні властивості полімерних розчинів визначали в'язкість за допомогою ротаційного віскозиметра Vevor NDJ-9S (КНР), відповідно до інструкції з експлуатації приладу та стандартів, зокрема ДСТУ 1929-2002.

Вміст вологи у зразках гідрогелів визначали на аналізаторі вологості MA-50 R Radwag при температурі висихання 70 °С. Вологість гідрогелевих

матеріалів визначали на аналізаторі вологості MA-50 R Radwag при температурі 70 °С. Для оцінки впливу кількості глини монтморилонітового типу в композиції ПВС/КМК на властивості гібридних гідрогелевих матеріалів досліджували гравіметричним методом сорбційні характеристики композицій.

Сорбційні та десорбційні властивості плівкових матеріалів та гідрогелів визначали гравіметричним методом. Для визначення щільності гідрогелів та плівок методом гідростатичного зважування використовували аналітичні ваги Radwag AS 220.R2, оснащені модулем для вимірювання щільності.

Фізико-механічні властивості визначали відповідно до стандартного методу випробувань ASTM D882-1 використовували прилад для вимірювання міцності на розрив BDO–FBO.5TH (ZwickRoell, Німеччина).

Визначення оптичної густини розчинів проводили на фотоелектроколориметрі КФК - 2.

Для дослідження антибактеріальних та антиадгезивних властивостей використовували тест-культури *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Escherichia coli* ATCC 25922, *Pseudomonas aeruginosa* PA01, які були отримані з Інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України для досліджень. Штами належать до Української колекції мікроорганізмів.

Результати досліджень наведені у вигляді середнього значення трьох паралельних вимірювань. Для одного вимірювання використовувався один зразок. Стандартні відхилення не перевищували 5% для отриманих значень.

Об'єкт дослідження: процеси модифікації полімерних плівкових матеріалів і гідрогелів на основі матриць із полівінілового спирту, крохмалю та карбоксиметилкрохмалю.

Предмет дослідження: полімерні плівкові матеріалів та гідрогелі стоматологічного призначення комбінованої дії.

У роботі вирішено важливе науково-практичне завдання, яке полягає у розширенні асортименту вітчизняних полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення.

При цьому вперше встановлено вплив водного екстракту кори дуба *Quercus cortex* у композиціях ПВС/Кр та ПВС/КМК на закономірності переходу реологічної поведінки сумішей розчинів від псевдопластичного до дилатантного типу течії. Зміна характеру течії відбувається зі зменшенням частки Кр від 7 об'ємних частин та КМК від 4 об'ємних частин. При цьому встановлено закономірності модифікації полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, що забезпечують поєднання механічної міцності з антимікробними властивостями. При цьому плівки ПВС мають міцність порядку 1170 кПа, тоді як гідрогелі — до 20 кПа з еластичністю 135-185 % при 10-20 % вмісті полісахаридів.

Доведено виникнення ефекту колапсу гідрогелів за додавання глини монтморилонітового типу. При цьому встановлено, що додавання 1–2 об. ч. глини монтморилонітового типу знижує сорбцію на 700%, уповільнює випаровування вологи та пролонгує час висихання кріогідрогелів.

Встановлено, що водний екстракт кропиви дводомної *Urtica dioica* виступає модифікатором полімерних композицій на основі ПВС/Кр та сприяє регулюванню сорбційної здатності гідрогелів від 500% до 1170% шляхом зміни вмісту крохмалю.

Практичне значення одержаних результатів полягає у вирішенні важливого науково-практичного завдання розширення асортименту вітчизняних полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення на основі біосумісних та біорозкладних полімерних композицій, модифікованих глиною монтморилонітового типу та фітоекстрактами кропиви дводомної *Urtica dioica* та кори дуба *Quercus cortex*.

1. Розроблені рецептури гідрогелів ПВС/КМК (5/5), модифікованих 2 об'ємними частинами глини монтморилонітового типу, які мають регульовані сорбційні властивості від 381 до 816% та кінетику набрякання, що має практичне призначення у створенні гідрогелів комбінованої дії.

2. Розроблені рекомендації для створення гідрогелів з ступенем сорбції 935–1170% на основі ПВС/Кр у співвідношенні 6/4 та 7/3, модифіковані водним екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*.

3. Розроблені рецептури та алгоритм одержання плівкових матеріалів та гідрогелів на основі ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, які забезпечують антимікробну активність, стабільність фізико-механічних та реологічних властивостей. Матеріали поєднують високу сорбційну здатність і міцність із максимальним вивільненням екстракту кори дуба *Quercus cortex* з плівок 0,15–0,16 % при вмісті полісахаридів 40–50 %. Підтверджено пролонговану антимікробну дію, біосумісність та здатність розроблених матеріалів пригнічувати метаболізм і адгезію *Staphylococcus aureus*, що відкриває широкі перспективи їх застосування у стоматологічній практиці та біомедичних технологіях.

Клінічна апробація полімерних плівок та гідрогелів на основі ПВС/Кр та ПВС/КМК у практику стоматологічної клініки AND плівок ПВС/КМК на основі екстракту кори дуба *Quercus cortex* 2/8, гідрогелів ПВС/КМК:глина 8/2 та ПВС/Кр на основі екстракту кори дуба *Quercus cortex* 5/5 підтвердила їхню ефективність у стоматологічній практиці для скорочення термінів реабілітації пацієнтів.

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі хімічних технологій та ресурсозбереження Київського національного університету технологій та дизайну у рамках наукових напрямків в рамках робочого дня викладачів кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження 39/22. Створення волокнистих композиційних матеріалів на основі природних полімерів та дослідження їх властивостей: Створення нових композиційних матеріалів, що вміщують природні полімери, та дослідження їх властивостей; 17/25 Хімічні технології захисту навколишнього середовища: очистка стічних вод, переробка відходів підприємств легкої та хімічної промисловості, раціональне використання сировинних ресурсів: 17-2/25 Створення полімерних матеріалів різного призначення на основі полімерів природного походження.

**Ключові слова:** полівіноловий спирт, крохмаль, карбоксиметилкрохмаль, полімерний композиційний матеріал, плівка, гідрогель, композиційні гідрогелі, технологія, механічні властивості, реологія, сорбція, мінеральний наповнювач, глина монтморилонітового типу, кут змочування, антимікробна активність, *Staphylococcus*, екстракт кропиви дводомної *Urtica dioica*, екстракт кори дуба *Quercus cortex*.

## ABSTRACT

*Shvets V.V.* Development of polymer film materials and hydrogels for dental purposes of combined action. - Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 161 - Chemical technologies and engineering. - Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, 2026.

The dissertation work is devoted to solving an important scientific and applied problem, which consists in developing methods for forming and modifying polymeric film materials and hydrogels of combined action for dental purposes in order to ensure the stability of the physicomaterial, rheological and biomedical properties of the compositions.

Relevance of the research. The current stage of development of therapeutic dentistry is characterized by the search for new approaches to the treatment of inflammatory periodontal diseases in conditions of increasing antibiotic resistance of microorganisms and insufficient effectiveness of traditional dosage forms (gels, ointments). The solution to this problem is the creation of domestic polymeric biodegradable films and hydrogels of combined action, modified with phytoextracts of stinging nettle *Urtica dioica* and oak bark *Quercus cortex*. Such systems provide high bioadhesion to the oral mucosa and prolonged release of antiseptic, analgesic and regenerative components directly into the focus of inflammation. The development and implementation of these therapeutic systems is an important step in increasing the effectiveness of treatment, reducing the drug load on the body and reducing the rehabilitation period of patients.

The aim of the work is to develop polymer film materials and hydrogels for dental purposes with combined action.

In accordance with the aim of the work, the following tasks were solved:

- to analyze the current state of production technologies and experience in the use of polymer film materials and hydrogels in dental practice;

- to substantiate and select the optimal composition of polymer compositions based on polyvinyl alcohol in combination with polysaccharides for the creation of film materials and hydrogels for dental purposes with combined action;
- to investigate the modifying effect of montmorillonite-type clay on the structural and physical and mechanical properties of the obtained compositions;
- to develop a formulation of polymer compositions PVA/Kr and PVA/KMC modified with aqueous extracts of *Urtica dioica* and *Quercus cortex* oak bark to ensure the combined action of the materials;
- to investigate the sensitivity of test cultures to the aqueous extract of oak bark *Quercus cortex* according to metabolic activity indicators and to assess the effect on the anti-adhesive properties of bacteria and the formation of biofilms;
- to test the developed polymer film materials and hydrogels and assess the potential effectiveness of the obtained materials for use in dental practice.

Polysaccharide-based films were obtained on a platform made of organic glass using a manual frame applicator for applying coatings with a thickness of 1 mm at a polymer composition temperature of 60 ° C with subsequent drying under normal conditions. Hydrogels were obtained by cryostructuring at a temperature of -15 ° C for 24 hours.

To assess the effect of the composition of the compositions and the type of modifier on the rheological properties of polymer solutions, viscosity was determined using a Vevor NDJ-9S rotational viscometer (PRC), in accordance with the device operating instructions and standards, in particular DSTU 1929-2002.

The moisture content of the hydrogel samples was determined on a Radwag MA-50 R moisture analyzer at a drying temperature of 70 °C. The moisture content of hydrogel materials was determined on a Radwag MA-50 R moisture analyzer at a temperature of 70 °C. To assess the effect of the amount of montmorillonite-type clay in the PVA/CMC composition on the properties of hybrid hydrogel materials, the sorption characteristics of the compositions were studied by the gravimetric method.

The sorption and desorption properties of film materials and hydrogels were determined by the gravimetric method. To determine the density of hydrogels and films by hydrostatic weighing, Radwag AS 220.R2 analytical balances equipped with a density measurement module were used.

The physico-mechanical properties were determined in accordance with the standard test method ASTM D882-1 using a BDO-FBO.5TH tensile strength measuring device (ZwickRoell, Germany).

The optical density of the solutions was determined using a KFK-2 photoelectrocolorimeter.

To study the antibacterial and antiadhesive properties, the test cultures *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Escherichia coli* ATCC 25922, *Pseudomonas aeruginosa* PA01 were used, which were obtained from the D. K. Zabolotny Institute of Microbiology and Virology of the National Academy of Sciences of Ukraine for research. The strains belong to the Ukrainian Collection of Microorganisms.

The results of the studies are given as the average value of three parallel measurements. One sample was used for one measurement. The standard deviations did not exceed 5% for the obtained values.

The object of the study: processes of modification of polymer film materials and hydrogels based on matrices of polyvinyl alcohol, starch and carboxymethyl starch.

The subject of the study: polymer film materials and hydrogels of dental use of combined action.

The work solves an important scientific and practical problem.

**Keywords:** polyvinyl alcohol, starch, carboxymethyl starch, polymer composite material, film, hydrogel, composite hydrogels, technology, mechanical properties, rheology, sorption, mineral filler, montmorillonite-type clay, contact angle, antimicrobial activity, *Staphylococcus*, *Urtica dioica* stinging nettle extract, *Quercus cortex oak bark* extract.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Ляшок, І.О., Плаван, В.П., Іщенко, О.В., Годунко, А.А., Швець, В.В. Властивості гібридних гідрогелів з додаванням модифікованого крохмалю та глини монтморилонітового типу. *Технології та інжиніринг*. 2023; 24 (3): 47–55. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.3.5>

2. Ляшок, І., Крюкова, О., Швець, В., Кичужинець, М., Галаган, В. Фізичні властивості гідрогелів та плівок пвс на основі водного екстракту кропиви дводомної. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024; 343(6(1)): 412-417. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-61>

3. Ляшок, І.О., Плаван, В.П., Крюкова, О.А., Полушкін, М.М., Швець, В.В., Шаповалова, Я.С. Вплив полісахаридів на фізичні властивості ПВС плівок та гідрогелів на основі водного екстракту ромашки лікарської (*Matricaria Chamomilla*). *Технології та інжиніринг*. 2025; 26(5): 101–109. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.5.10>

4. Швець, В., Ляшок, І. Вплив фітоекстрактів на реологію та густину полімерних матриць полівінілового спирту/карбоксиметилкрохмалю в технології стоматологічних плівок. *Технології та інжиніринг*. 2026; 27 (3): 8–16. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.3.1>

5. Ляшок І.О., Плаван В.П., Швець В.В., Смачило О.В., Крюкова О.А. Біосумісні гідрогелі на основі композицій полівініловий спирт/карбоксиметилкрохмаль: властивості та перспективи використання. *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2026; 2(25): 60-69.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Current trends in the production of polymer film materials for dental purposes V. Shvets, V. Plavan, O. Ishchenko, I. Liashok, M. Koliada Advanced polymer materials and technologies: recent trends and current priorities: multi-

authored monograph / edited by V. Levytskyi, V. Plavan, V. Skorokhoda, V. Khomenko. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2022. – P. 25-31

2. I.O. Liashok, M.S. Kychuzhynets, O.A. Kryukova, O.O. Butenko, V.V. Shvets. Prospects of the use of polymer materials based on natural extracts of nettle // Modern polymer materials and technologies: collective monograph / edited by K. Sukhyi, V. Levytskyi, V. Plavan, V. Skorokhoda. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2024. – p.165-170.

3. Anastasija Godunko, Irina Liashok, Viktoriia Plavan, Olena Ishchenko, Viacheslav Shvets Hydrogels with the addition of modified Kparch and clay of the montmorillonite type. - Abstract book 67th International Conference for Students of Physics and Natural Sciences «Open Readings 2024» (23-26 April, 2024, Vilnius), p. 204.

4. Viktoriia Kolomiets, Irina Liashok, Viktoriia Plavan, Olena Kryukova, Viacheslav Shvets. Phytohydrogels with the addition of Kparch and modified Kparch. Abstract book 68th International Conference for Students of Physics and Natural Sciences «Open Readings 2025» (13-16 May, 2025, Vilnius), P. 204.

5. Швець В.В., Ляшок І.О., Бутенко О.О., Крюкова О.А., Андрусенко В.В., Лупина Д.О., Корінець В.В. Властивості фітоплівків та фітогідрогелів на основі ПВС та полісахаридів. Інноваційні матеріали та технології: біотехнологія, прикладна хімія, екологія: моногр. Т.2 / за заг. ред. Мокроусової О. Р., Плаван В. П., Київ: КНУТД, 2025. С. 113-121.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	16
ВСТУП .....	17
<b>РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД В НАПРЯМКУ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ГІДРОГЕЛІВ СТОМАТОЛОГІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ.</b> .....	25
1.1 Полімерні плівкові матеріали стоматологічного призначення .....	25
1.1.1 Загальні властивості та функції плівок стоматологічного призначення.....	25
1.1.2 Мікробіоценоз ротової порожнини та фактори патогенності біоплівки .....	26
1.1.3 Сучасні полімерні системи для букальної доставки лікарських речовин .....	29
1.1.4 Технологічні методи одержання та класифікація функціональних плівок.....	32
1.2 Гідрогелі стоматологічного призначення.....	33
1.2.1 Структурно функціональна організація та фізико хімічні властивості гідрогелів.....	35
1.2.2 Загальна класифікація гідрогелів та особливості кріоструктурування.....	36
1.3 Функціональні властивості багатофункціональних гідрогелів для лікування захворювань пародонту .....	47
1.3.1 Вибір біосумісних полімерів.....	47
1.3.2 Включення антимікробних засобів.....	48
1.3.3 Методологічні підходи до інтеграції біологічно активних агентів .....	50
1.3.4 Оцінка клінічної ефективності та перспективні лікарські форми гідрогелів .....	51
Висновок до розділу 1. ....	52
<b>РОЗДІЛ 2. ВИХІДНІ МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.</b> .....	54
2.1 Вихідні матеріали для досліджень .....	54
2.1.1 Полівініловий спирт .....	55
2.1.2 Крохмаль.....	56
2.1.3 Карбоксиметилкрохмаль.....	58
2.1.4 Глина монтморилонітового типу .....	60
2.1.5 Кропива дводомна <i>Urtica dioica</i> .....	62
2.1.5 Кора дуба <i>Quercus cortex</i> .....	64
2.2. Приготування компонентів полімерних композитів для зразків плівкових матеріалів та гідрогелів .....	65
2.2.1 Приготування розчинів полівінілового спирту.....	65
2.2.2 Приготування розчинів крохмалю картопляного .....	66
2.2.3 Приготування розчинів карбоксиметильованого крохмалю .....	66
2.2.4 Приготування мінеральної добавки на основі глини монтморилонітового типу .....	66
2.2.5 Приготування екстракту кропиви дводомної <i>Urtica dioica</i> .....	66
2.2.6 Приготування екстракту кори дуба <i>Quercus cortex</i> .....	67
2.2.7 Приготування зразків плівкових матеріалів та гідрогелів.....	67

2.2.7.1 Приготування композицій для зразків плівкових матеріалів та гідрогелів .....	67
2.2.7.2 Методика приготування плівкових матеріалів та гідрогелів .....	69
2.3. Методи дослідження .....	69
2.3.1 Вимірювання реологічних властивостей композицій.....	70
2.3.2 Визначення вологовмісту зразків гідрогелів .....	70
2.3.3 Визначення сорбційних характеристик плівкових матеріалів та гідрогелів.....	70
2.3.4 Визначення десорбційної здатності гідрогелів .....	71
2.3.5 Визначення фізико-механічних властивостей плівкових матеріалів та гідрогелів.....	71
2.3.6 Визначення щільності плівкових матеріалів та гідрогелів .....	72
2.3.7 Визначення вивільнення рослинних екстрактів спектрометричним методом .....	73
2.3.8 Визначення антибактеріальних властивостей.....	73
2.3.8.1 Отримання посівного матеріалу тест-культур.....	74
2.3.8.2 Визначення чутливості тест-культур до екстракту кори дубу з використанням резазурину.....	74
2.3.8.3 Визначення впливу екстракту кори дуба на анти-адгезивні властивості тест-культур .....	75
Висновок до розділу 2. ....	76
<b>РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОЛІСАХАРИДІВ НА ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙ ПВС/КР ТА ПВС/КМК.....</b>	<b>78</b>
3.1 Реологічні властивості композицій ПВС/КМК .....	78
3.2 Визначення сорбційної здатності гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК	81
3.3 Визначення десорбційної здатності гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК .....	85
3.4 Визначення фізико-механічних властивостей гідрогелів на основі композицій ПВС/КМК .....	87
Висновки до розділу 3.....	91
<b>РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЛИНИ МОНТМОРИЛОНІТОВОГО ТИПУ НА ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ГІДРОГЕЛІВ ПВС/КМК. .....</b>	<b>93</b>
4.1 Реологічні властивості композицій ПВС/КМК з додаванням глини монтморилонітового типу .....	93
4.2 Вологовміст гідрогелів на основі композицій ПВС/КМК з додаванням глини монтморилонітового типу .....	98
4.3 Визначення сорбційної здатності гідрогелів на основі композицій ПВС/КМК .....	99
4.4 Визначення десорбційної здатності гідрогелів на основі композицій ПВС/КМК з додаванням глини монтморилонітового типу.....	101
Висновки до розділу 4.....	103
<b>РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕКСТРАКТУ КРОПИВИ ДВОДОМНОЇ <i>URTICA DIOICA</i> НА ВЛАСТИВОСТІ ГІДРОГЕЛІВ ПВС/КР.....</b>	<b>105</b>

5.1	Визначення густини гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної <i>Urtica dioica</i> .....	105
5.2	Визначення сорбційної здатності гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної <i>Urtica dioica</i> .....	106
5.3	Визначення десорбційної здатності гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної <i>Urtica dioica</i> .....	112
5.4	Визначення змочуваності гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної <i>Urtica dioica</i> .....	114
	Висновки до розділу 5.....	116
<b>РОЗДІЛ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕКСТРАКТУ КОРИ ДУБА НА ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ГІДРОГЕЛІВ ПВС/КР ТА ПВС/КМК .....</b>		
6.1	Реологічні властивості композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба <i>Quercus cortex</i> .....	118
6.2	Вологовміст гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба <i>Quercus cortex</i> .....	123
6.3	Визначення густини плівкових матеріалів та гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих екстрактом кори дуба <i>Quercus cortex</i> .....	124
6.4	Визначення сорбційної здатності плівкових матеріалів та гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих екстрактом кори дуба <i>Quercus cortex</i> .....	126
6.5	Визначення десорбційної здатності гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих екстрактом кори дуба <i>Quercus cortex</i> .....	135
6.6	Визначення фізико-механічних властивостей плівкових матеріалів та гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба <i>Quercus cortex</i> .....	137
6.7	Дослідження вивільнення екстракту кори дуба <i>Quercus cortex</i> з плівок та гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих екстрактом кори дуба <i>Quercus cortex</i> .....	141
6.8	Опортуністичні бактерії <i>Staphylococcus, Pseudomonas, Escherichia</i> у стоматології.....	143
6.9	Визначення чутливості тест-культур до екстракту кори дубу з використанням резазурину .....	144
6.10	Визначення впливу екстракту кори дубу на антиадгезивні властивості тест-культур ..	146
	Висновки до розділу 6.....	149
	<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>151</b>
	<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>153</b>
	<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>170</b>

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

ПВС – полівініловий спирт

Кр – крохмаль картопляний

КМК – карбоксиметильований крохмаль.

КД – кора дуба

## ВСТУП

Стоматологічні захворювання залишаються однією з найбільш поширених патологій у світі, що охоплюють значну частину населення незалежно від віку та соціального статусу. За даними міжнародних організацій охорони здоров'я, понад 90 % людей протягом життя стикаються з карієсом, гінгівітом чи іншими ураженнями ротової порожнини. Традиційні методи лікування, які базуються на застосуванні ополіскувачів, мазей чи гелів, мають обмежену ефективність через короткий час утримання лікарських речовин на слизовій оболонці. Це зумовлено постійним впливом слини, механічними рухами язика та високою чутливістю слизових тканин до зовнішніх факторів. У результаті виникає потреба у багаторазовому застосуванні препаратів, що збільшує фармакологічне навантаження на організм і знижує клінічну результативність терапії.

У цьому контексті особливого значення набуває розроблення полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів комбінованої дії, які здатні забезпечити локальне депо активних речовин, їх поступове та контрольоване вивільнення, а також механічний захист уражених ділянок. Такі системи дозволяють не лише підвищити ефективність лікування, але й мінімізувати ризик розвитку резистентності мікроорганізмів, що є однією з ключових проблем сучасної медицини. Мікробні біоплівки значно підвищують стійкість патогенів до антибіотиків і спричиняють хронічний перебіг інфекцій. Тому створення матеріалів, здатних впливати на мікробіоценоз ротової порожнини та запобігати утворенню біоплівок, є надзвичайно актуальним завданням.

Додатковим чинником актуальності є потреба у матеріалах, що поєднують антимікробні, протизапальні та регенеративні властивості. Сучасні тенденції у стоматологічному матеріалознавстві спрямовані на створення біоактивних композитів, які не лише виконують роль носія лікарських речовин, але й стимулюють процеси ремінералізації та регенерації тканин. Використання природних фітоекстрактів, наночастинок металів та біоактивних наповнювачів відкриває нові можливості для формування

багатофункціональних полімерних систем, що відповідають вимогам сучасної клінічної практики.

Важливим аспектом є також екологічна та економічна складова. Використання біополімерів, таких як полівініловий спирт та карбоксиметилкромаль, забезпечує високу біосумісність матеріалів, їх безпечність для пацієнта та можливість утилізації без шкоди для довкілля. Це відповідає глобальним тенденціям сталого розвитку та раціонального використання ресурсів у медичній галузі.

**Актуальність теми.** Сучасний етап розвитку терапевтичної стоматології характеризується пошуком нових підходів до лікування запальних захворювань пародонта в умовах зростаючої антибіотикорезистентності мікроорганізмів та недостатньої ефективності традиційних лікарських форм (гелів, мазей). Рішенням цієї проблеми є створення вітчизняних полімерних біодеградабельних плівок та гідрогелів комбінованої дії, модифікованих фітоекстрактами кропиви дводомної *Urtica dioica* та кори дуба *Quercus cortex*. Такі системи забезпечують високу біоадгезію до слизової оболонки порожнини рота та пролонговане вивільнення антисептичних, знеболювальних і регенеративних компонентів безпосередньо у вогнище запалення. Розроблення та впровадження зазначених терапевтичних систем є важливим кроком для підвищення ефективності лікування, зниження медикаментозного навантаження на організм та скорочення термінів реабілітації пацієнтів.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота відповідає напрямку науково-дослідної роботи кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі хімічних технологій та ресурсозбереження Київського національного університету технологій та дизайну у рамках наукових напрямків в рамках робочого дня викладачів кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження 39/22. Створення волокнистих композиційних матеріалів на основі природних полімерів та дослідження їх властивостей: Створення

нових композиційних матеріалів, що вміщують природні полімери, та дослідження їх властивостей; 17/25 Хімічні технології захисту навколишнього середовища: очистка стічних вод, переробка відходів підприємств легкої та хімічної промисловості, раціональне використання сировинних ресурсів: 17-2/25 Створення полімерних матеріалів різного призначення на основі полімерів природного походження.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розроблення полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення комбінованої дії.

У відповідності до поставленої мети роботи вирішувалися такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан технологій виробництва та досвід застосування полімерних плівкових матеріалів і гідрогелів у стоматологічній практиці;

- обґрунтувати та обрати оптимальний склад полімерних композицій на основі полівінілового спирту у поєднанні з полісахаридами для створення плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення комбінованої дії;

- дослідити модифікуючий вплив глини монтморилонітового типу на структурні та фізико-механічні властивості отриманих композицій;

- розробити рецептуру полімерних композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК модифікованих водними екстрактами кропиви дводомної *Urtica dioica* та кори дуба *Quercus cortex* для забезпечення комбінованої дії матеріалів;

- дослідити чутливість тест-культур до водного екстракту кори дуба *Quercus cortex* за показниками метаболічної активності та оцінити вплив на антиадгезивні властивості бактерій та формування біоплівок;

- здійснити апробацію розроблених полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів та оцінити потенційну ефективність отриманих матеріалів для застосування у стоматологічній практиці.

**Об'єкт дослідження:** процеси модифікації полімерних плівкових матеріалів і гідрогелів на основі матриць із полівінілового спирту, крохмалю та карбоксиметилкрохмалю.

**Предмет дослідження:** полімерні плівкові матеріалів та гідрогелі стоматологічного призначення комбінованої дії.

**Методи дослідження.**

Для створення основи плівкових матеріалів та гідрогелів використовували розчини 10% полівінілового спирту, 10% крохмалю та 5% розчину карбоксиметилкрохмалю у співвідношеннях ПВС/Кр та ПВС/КМК від 10/0 до 0/10 з кроком 1 об'ємна одиниця. Плівки матеріали одержували на платформі з органічного скла за допомогою ручного рамкового аплікатора для нанесення покриттів товщиною 1 мм та робочою шириною 100 мм. Гідрогелі отримували методом кріоструктурування при температурі  $-15^{\circ}\text{C}$  протягом 24 годин з наступним поступовим розморожуванням при кімнатній температурі.

Визначення в'язкості проводили за допомогою ротаційного віскозиметра Vevor NDJ-9S (КНР). Вимірювання виконувались відповідно до інструкції з експлуатації приладу та стандартів, зокрема ДСТУ 1929-2002.

Вміст вологи у зразках гідрогелів визначали на аналізаторі вологості MA-50 R Radwag при температурі висихання  $70^{\circ}\text{C}$ . Вологість гідрогелевих матеріалів визначали на аналізаторі вологості MA-50 R Radwag при температурі  $70^{\circ}\text{C}$ . Для оцінки впливу кількості глини монтморилонітового типу в композиції ПВС/КМК на властивості гібридних гідрогелевих матеріалів досліджували гравіметричним методом сорбційні характеристики композицій.

Сорбційні та десорбційні властивості визначали гравіметричним методом. Для визначення щільності гідрогелів та плівок методом гідростатичного зважування використовували аналітичні ваги Radwag AS 220.R2, оснащені модулем для вимірювання щільності.

Фізико-механічні властивості визначали відповідно до стандартного методу випробувань ASTM D882-1 використовували прилад для вимірювання

міцності на розрив BDO–FBO.5TH (ZwickRoell, Німеччина). Для визначення оптичної густини розчинів використовувався фотоелектроколориметр КФК - 2. Кут змочування вимірювали аналізуючи фотографію крапель дистильованої води та фізіологічного розчину NaCl на поверхні полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів.

Для дослідження антибактеріальних та антиадгезивних властивостей використовували тест-культури *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Escherichia coli* ATCC 25922, *Pseudomonas aeruginosa* PA01, які були отримані з Інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України для досліджень. Штами належать до Української колекції мікроорганізмів.

Результати досліджень наведені у вигляді середнього значення трьох паралельних вимірювань. Для одного вимірювання використовувався один зразок. Стандартні відхилення не перевищували 5% для отриманих значень.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

У роботі вирішено важливе науково-практичне завдання, яке полягає у розширенні асортименту вітчизняних полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення.

При цьому вперше встановлено вплив водного екстракту кори дуба *Quercus cortex* у композиціях ПВС/Кр та ПВС/КМК на закономірності переходу реологічної поведінки сумішей розчинів від псевдопластичного до дилатантного типу течії. Зміна характеру течії відбувається зі зменшенням частки Кр від 7 об'ємних частин та КМК від 4 об'ємних частин. При цьому встановлено закономірності модифікації полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, що забезпечують поєднання механічної міцності з антимікробними властивостями. При цьому плівки ПВС мають міцність порядку 1170 кПа, тоді як гідрогелі — до 20 кПа з еластичністю 135-185 % при 10-20 % вмісті полісахаридів.

Доведено виникнення ефекту колапсу гідрогелів за додавання глини монтморилонітового типу. При цьому встановлено, що додавання 1–2 об. ч.

глини монтморилонітового типу знижує сорбцію на 700%, уповільнює випаровування вологи та пролонгує час висихання кріогідрогелів.

Встановлено, що водний екстракт кропиви дводомної *Urtica dioica* виступає модифікатором полімерних композицій на основі ПВС/Кр та сприяє регулюванню сорбційної здатності гідрогелів від 500% до 1170% шляхом зміни вмісту крохмалю.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у вирішенні важливого науково-практичного завдання розширення асортименту вітчизняних полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення на основі біосумісних та біорозкладних полімерних композицій, модифікованих глиною монтморилонітового типу та фітоекстрактами кропиви дводомної *Urtica dioica* та кори дуба *Quercus cortex*.

1. Розроблені рецептури гідрогелів ПВС/КМК (5/5), модифікованих 2 об'ємними частинами глини монтморилонітового типу, які мають регульовані сорбційні властивості від 381 до 816% та кінетику набрякання, що має практичне призначення у створенні гідрогелів комбінованої дії.

2. Розроблені рекомендації для створення гідрогелів з ступенем сорбції 935–1170% на основі ПВС/Кр у співвідношенні 6/4 та 7/3, модифіковані водним екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*.

3. Розроблені рецептури та алгоритм одержання плівкових матеріалів та гідрогелів на основі ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, які забезпечують антимікробну активність, стабільність фізико-механічних та реологічних властивостей. Матеріали поєднують високу сорбційну здатність і міцність із максимальним вивільненням екстракту кори дуба *Quercus cortex* з плівок 0,15–0,16 % при вмісті полісахаридів 40–50 %. Підтверджено пролонговану антимікробну дію, біосумісність та здатність розроблених матеріалів пригнічувати метаболізм і адгезію *Staphylococcus aureus*, що відкриває широкі перспективи їх застосування у стоматологічній практиці та біомедичних технологіях.

Клінічна апробація полімерних плівок та гідрогелів на основі ПВС/Кр та ПВС/КМК у практику стоматологічної клініки AND плівок ПВС/КМК на основі екстракту кори дуба *Quercus cortex* 2/8, гідрогелів ПВС/КМК:глина 8/2 та ПВС/Кр на основі екстракту кори дуба *Quercus cortex* 5/5 підтвердила їхню ефективність у стоматологічній практиці для скорочення термінів реабілітації пацієнтів.

### **Особистий внесок здобувача.**

Особистий внесок автора полягає у здійсненні системного аналізу сучасних наукових джерел і нормативно-технічної бази за профілем дослідження, а також у безпосередній організації та реалізації експериментальної програми з подальшою валідацією, збором та математичною обробкою отриманих даних. Здобувачем було самостійно обґрунтовано технологічні параметри виготовлення дослідних зразків і матеріалів, що дозволило забезпечити виконання поставлених наукових завдань. Важливим складником роботи стало проведення комплексу випробувань з оцінювання фізико-механічних характеристик та експлуатаційних властивостей розроблених виробів. Постановка завдань та обговорення отриманих результатів проводилася разом із науковим керівником. Особистий внесок автора у працях, опублікованих у співавторстві, полягає в постановці завдань досліджень, розробці методик експериментальних досліджень, участі у виконанні експериментів, узагальненні отриманих результатів, формулюванні висновків.

### **Апробація матеріалів дисертації.**

Основні результати дисертаційних досліджень представлялись на міжнародних конференціях: 4-та Міжнародна конференція «Передові полімерні матеріали та технології» (11 жовтня 2022 р., Львів-Київ, Україна); 67th International Conference for Students of Physics and Natural Sciences «Open Readings 2024» (23–26 квітня 2024 р., Вільнюс, Литва); 68th International Conference for Students of Physics and Natural Sciences «Open Readings 2025» (13–16 травня 2025 р., Вільнюс, Литва); Міжнародна науково-технічна

конференція “Перспективні полімерні матеріали та технології” (24-26 вересня 2024 р., Київ-Львів, Україна); II Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні матеріали та технології: біотехнологія, прикладна хімія, екологія» (30-31 жовтня 2025 р., Київ, Україна).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 10 наукових робіт, зокрема 5 статей у фахових виданнях, 5 тез доповідей на міжнародних конференціях.

#### **Структура та обсяг дисертації.**

Дисертація складається із вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг дисертації становить 175 сторінок. Дисертація містить 10 таблиці, 41 рисунок, бібліографію, яка включає 148 посилань на праці вітчизняних і зарубіжних авторів та 2 додатків.

## **РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД В НАПРЯМКУ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ГІДРОГЕЛІВ СТОМАТОЛОГІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ.**

У сучасній стоматології полімерні матеріали відіграють ключову роль у створенні локальних терапевтичних систем, здатних поєднувати механічний захист, контрольоване вивільнення лікарських речовин та стимуляцію регенеративних процесів.

### **1.1 Полімерні плівкові матеріали стоматологічного призначення**

Плівки на основі синтетичних та природних полімерів (ПВС, ПЕГ, хітозан, альгінат) застосовуються як бар'єрні покриття для слизової оболонки та зубних поверхонь. Вони забезпечують механічний захист від механічних та хімічних подразників, пролонговане утримання лікарських речовин у зоні ураження, можливість включення антимікробних та протизапальних агентів.

Дослідження показують, що плівкові системи з хітозаном мають виражену антимікробну дію проти *Streptococcus mutans* та *Porphyromonas gingivalis*, що робить їх перспективними у профілактиці карієсу та пародонтиту.

#### **1.1.1 Загальні властивості та функції плівок стоматологічного призначення**

Використання полімерних плівок є перспективним напрямом доставки ліків у ротову порожнину, що особливо актуально для терапії локальних стоматологічних захворювань.

Сучасна фармацевтична технологія перебуває на етапі активного впровадження інноваційних локальних терапевтичних систем, спрямованих на зниження загального фармакологічного навантаження на організм та підвищення біодоступності лікарських речовин безпосередньо у зоні патологічних змін. Одним із перспективних напрямів у цьому контексті є застосування полімерних плівок для доставки препаратів у ротову порожнину, що має особливе значення при лікуванні стоматологічних патологій —

гінгівіту, пародонтиту, різних форм стоматиту, а також ушкоджень слизової оболонки після оперативних втручань.

Традиційні лікарські форми, такі як ополіскувачі, гелі чи мазі, характеризуються обмеженою ефективністю через короткий час утримання на слизовій оболонці. Це зумовлено постійним впливом слини та механічними рухами язика, що потребує частого повторного застосування. На відміну від них, мукоадгезивні плівки здатні міцно закріплюватися на вологій поверхні тканин, формуючи локальне депо діючої речовини та забезпечуючи її поступове й контрольоване вивільнення протягом тривалого часу.

Проектування таких систем вимагає комплексного підходу до вибору біополімерної матриці, оскільки фізико-хімічні властивості носія безпосередньо корелюють із кінетикою адгезії та десорбції активних молекул. Дослідження [1] було спрямоване на створення мукоадгезивних плівок для стоматології з екстрактом гвоздики CO<sub>2</sub> та ефірними оліями лаванди й грейпфрута. Плівки виготовляли методом лиття розчинником із різних полімерів та пластифікаторів. Найкращі властивості показало поєднання гідроксиетилцелюлози й гідроксипропілцелюлози з поліетиленгліколем 400, що забезпечило оптимальні фізико-хімічні характеристики та сильну адгезію ( $9,20 \pm 0,58$  Н). *In vitro* тести підтвердили пролонговане вивільнення евгенолу (до 90% за 360–420 хв), тривалий терапевтичний ефект і виражену антимікробну активність, що свідчить про потенціал плівок у лікуванні інфекцій та запальних процесів ротової порожнини.

### **1.1.2 Мікробіоценоз ротової порожнини та фактори патогенності біоплівки**

Ротова порожнина є складним біологічним середовищем, яке функціонує як багатокомпонентна екосистема з різними мікросередовищами, включаючи зубні поверхні, слизову оболонку щік, тверде та м'яке піднебіння, а також язик. У цьому середовищі формується мікробіота, що складається з бактерій, грибів та вірусів, серед яких провідну роль відіграють бактеріальні спільноти [2]. Основними таксонами є представники Firmicutes, Bacteroidetes,

Proteobacteria та Actinobacteria, які забезпечують відносну стабільність складу мікробіоти незалежно від географічних чи етнічних особливостей. На відміну від кишкової флори, бактеріальні угруповання ротової порожнини менш залежні від дієти та зовнішніх факторів, що свідчить про їхню консервативність та адаптивність до умов локального середовища.

Фунгіальний компонент мікробіоти, або мікобіом, представлений приблизно 85 видами грибів, серед яких найбільш поширеними є *Candida spp.*, зокрема *Candida albicans*. У стані мікробного гомеостазу ці види виконують роль комменсалів, проте при дисбіозі вони здатні переходити до умовно-патогенного стану. Важливим є їхнє вміння коагредувати з бактеріями, зокрема зі *Streptococcus spp.*, утворюючи стійкі біоплівки. Такі біоплівкові структури значно підвищують резистентність мікроорганізмів до антимікробних агентів та сприяють розвитку патологічних процесів, включаючи кандидоз та карієс. Біоплівки виступають ключовим фактором патогенності, оскільки забезпечують мікроорганізмам захист від імунної відповіді та створюють умови для хронічного перебігу інфекцій [3].

Вірусний компонент мікробіоти ротової порожнини менш досліджений, проте відомо, що герпесвіруси та папіломавіруси можуть бути присутніми у здорових людей і проявляти патогенний потенціал при зниженні імунітету. Взаємодія вірусів із бактеріями та грибами створює додаткові ризики для розвитку запальних процесів та ускладнень у порожнині рота. Імунна система людини відіграє вирішальну роль у підтриманні рівноваги між комменсальною та патогенною мікробіотою. Місцеві фактори захисту, такі як секреторний IgA, лізоцим та антимікробні пептиди, забезпечують контроль над мікробними популяціями, проте при порушенні балансу виникають умови для розвитку інфекційних захворювань [4].

Таким чином, мікробіота ротової порожнини є складною та динамічною системою, де бактерії, гриби та віруси взаємодіють між собою та з імунною відповіддю організму. Її стабільність у здорових людей забезпечує гомеостаз, тоді як дисбіоз призводить до формування біоплівок та розвитку патологій, що

має важливе значення для стоматологічної практики та створення нових полімерних матеріалів комбінованої дії, здатних впливати на мікробні угруповання та підтримувати регенеративні процеси.

У контексті стоматологічного матеріалознавства подолання мікробного дисбіозу та запобігання резистентності біоплівки вимагає переходу від класичних інертних полімерів до інноваційних біоактивних композитів комбінованої дії. Традиційні підходи, що базувалися виключно на системному чи локальному застосуванні антибіотиків, продемонстрували обмежену ефективність проти зрілих полімікробних асоціацій через наявність захисного екзополісахаридного матриксу біоплівки. Сучасний вектор досліджень спрямований на створення розумних (*smart*) матеріалів, які здатні не лише механічно заміщувати дефекти тканин або забезпечувати фіксацію ортопедичних і настільних конструкцій, а й виступати активними модуляторами локального мікробіому. Основними стратегіями при розробці таких антимікробних та регенеративних полімерних систем є модифікація архітектури поверхні (антиадгезивні властивості) для створення супергідрофобних або наноструктурованих інтерфейсів, які перешкоджають первинній колонізації бактерій (зокрема, ранніх колонізаторів типу *Streptococcus spp.*) та початковій коагрегації з грибами роду *Candida* [5].

Іншим критично важливим напрямком є контроль вивільнення терапевтичних агентів шляхом інтеграції у полімерну матрицю наночастинок металів, четвертинних амонієвих сполук або антимікробних пептидів, що забезпечує пролонгований бактерицидний та фунгіцидний ефект без ризику виникнення резистентності [6]. Водночас обов'язковим елементом залишається стимуляція тканинної біосумісності та регенерації через включення кальцій-фосфатних наповнювачів або біоактивного скла, які сприяють ремінералізації прилеглих твердих тканин зуба та інтеграції матеріалу з м'якими тканинами пародонту [7].

Особливий інтерес викликає інтеграція синергетичних систем, здатних одночасно пригнічувати бактеріальну проліферацію та руйнувати міцеліальні

форми *Candida albicans*, оскільки саме грибово-бактеріальні біоплівки асоційовані з найбільш агресивними формами періімплантиту та рецидивуючого карієсу. Застосування таких багатофункціональних полімерів дозволяє мінімізувати запальну відповідь макроорганізму, стабілізувати локальний імунний статус за рахунок збереження коменсальної мікрофлори навколо зони реставрації чи імплантації та запобігти передчасній деградації матриксу під дією мікробних ферментів [8].

Мікробіоценоз ротової порожнини являє собою складну екосистему, де бактерії, гриби та віруси взаємодіють між собою й з імунною системою людини, забезпечуючи гомеостаз у здоровому стані та формуючи біоплівки при дисбіозі, що підвищують резистентність мікроорганізмів і спричиняють розвиток патологій; саме тому у стоматологічному матеріалознавстві актуальним є перехід від інертних полімерів до інноваційних біоактивних композитів комбінованої дії, здатних модулювати локальний мікробіом, запобігати колонізації патогенів, забезпечувати пролонговане вивільнення терапевтичних агентів та стимулювати регенерацію тканин.

### **1.1.3 Сучасні полімерні системи для букальної доставки лікарських речовин**

Букальна доставка ліків у стоматології є актуальною завдяки швидкому початку дії та уникненню метаболізму першого проходження через печінку. Основні проблеми — низька розчинність препаратів, швидке вимивання слиною, ферментативна деградація та короткий час утримання на слизовій — обмежують ефективність традиційних систем [9]. Використання мукоадгезивних та амфіфільних полімерів дозволяє подолати ці бар'єри: мукоадгезія забезпечує тривале перебування плівки на слизовій завдяки взаємодії з муцином, а амфіфільність створює гідрофобні домени для стабілізації слабозчинних ліків. Біополімери, такі як хітозан, альгінат, пектин чи карагенан, здатні самоорганізовуватися у наноструктури — гідрогелі, наногелі, міцели та швидкорозчинні плівки [10]. Це забезпечує контрольоване вивільнення та підвищення біодоступності у 3–5 разів для

препаратів на кшталт ібупрофену, куркуміну чи мелатоніну. Враховуючи фармакокінетичну ефективність, біосумісність та відповідність регуляторним вимогам, мукоадгезивно-амфіфільні плівки формують перспективну основу для майбутніх стоматологічних систем комбінованої дії [11].

Полімерні плівкові матеріали у стоматології становлять окремий клас систем локальної доставки лікарських речовин, які поєднують структурну простоту з високою функціональністю. Їхня ефективність визначається не лише складом полімерної матриці, але й технологічними параметрами виготовлення, що забезпечують контрольовану товщину, рівномірність розподілу активних компонентів та стабільність фізико-хімічних характеристик [12].

Механізм мукоадгезії, який лежить в основі функціонування таких систем, базується на міжмолекулярних взаємодіях (водневі зв'язки, гідрофобні та електростатичні контакти) між функціональними групами полімерів та глікопротеїнами (муцином) слизової оболонки. На початковому етапі відбувається змочування та набухання плівки під дією ротової рідини, що забезпечує інтерпретацію (взаємопроникнення) полімерних ланцюгів у структуру слизу.

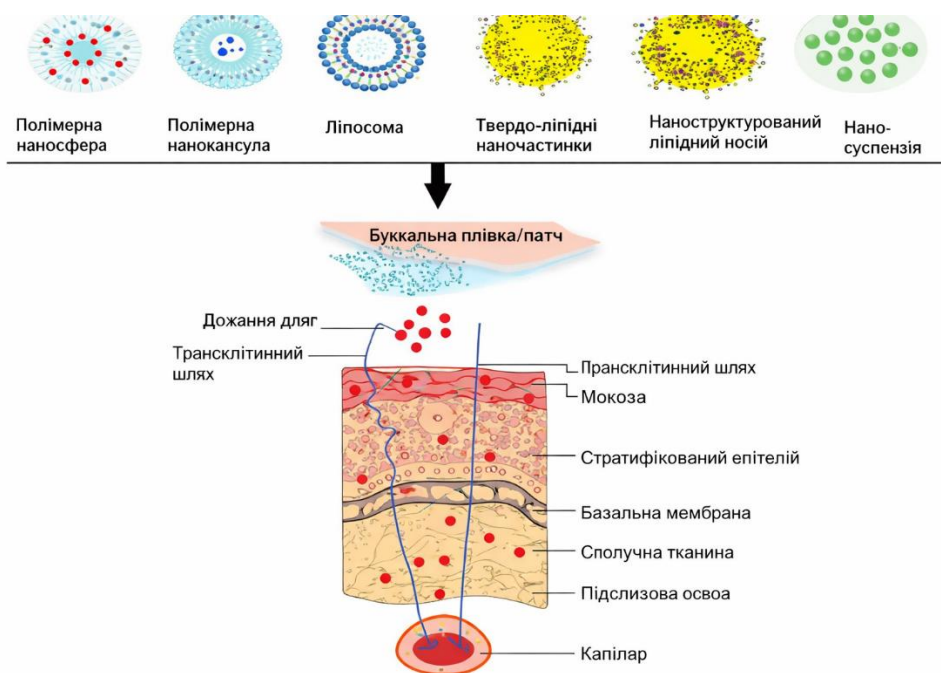


Рис. 1.1. Схема мукоадгезивного транспорту в ротовій порожнині [13].

Як показано на схемі, вивільнена з плівкової матриці речовина може транспортуватися через епітелій двома основними шляхами: параклітинним (між клітинами) та трансклітинним (безпосередньо через клітинні мембрани), що забезпечує як локальну терапевтичну дію на рівні lamina propria, так і потенційний доступ до капілярного русла.

Подальший розвиток технологій букальної доставки ліків пов'язаний із моделюванням кінетики вивільнення терапевтичних агентів та оптимізацією фізико-механічних властивостей плівок. Важливим аспектом проектування таких систем є забезпечення балансу між швидкістю ерозії полімерної матриці та часом, необхідним для повної дифузії лікарської речовини в епітеліальні тканини. На відміну від гідрогелів, які піддаються швидкому зсуву та вимиванню внаслідок артикуляції та ковтання, багат шарові плівкові конструкції дозволяють реалізувати векторний (спрямований) транспорт речовин. Завдяки нанесенню водонепроникного ізолюючого шару з гідрофобних полімерів (наприклад, етилцелюлози) на зовнішній бік плівки, вдається повністю запобігти втраті активного компонента у ротову рідину, спрямовуючи весь дифузійний потік виключно через мукоадгезивний інтерфейс углиб слизової оболонки [14].

Сучасний дизайн амфіфільних полімерних носіїв дозволяє одночасно інкапсулювати гідрофільні молекули у зовнішній фазі та гідрофобні сполуки у внутрішньому наноструктурованому ядрі. Це має вирішальне значення для комбінованої терапії складних стоматологічних патологій, де вимагається одночасне введення протизапальних та протимікробних засобів. При цьому процеси дифузії ліків підпорядковуються законам аномального транспорту, поєднуючи механізми Fickian-дифузії та релаксації макромолекулярних ланцюгів полімеру [15].

Перспективним напрямком є інтеграція у структуру букальних плівок стимул-чутливих компонентів (*smart-полімерів*), здатних змінювати ступінь набухання та швидкість вивільнення ліків у відповідь на локальні тригери, такі як коливання рН при запаленні або зміна ферментативної активності у вогнищі

ураження [16]. Досягнення стабільного терапевтичного ефекту в таких системах мінімізує системне токсичне навантаження на організм пацієнта, підвищуючи комплаєнс терапії у клінічній стоматології [17].

Таким чином, сучасні полімерні системи для букальної доставки лікарських речовин, зокрема багат шарові мукоадгезивно-амфіфільні та стимул-чутливі плівки, є високоефективною альтернативою традиційним стоматологічним формам. Завдяки здатності до міжмолекулярної інтеграції з муциновим шаром, наноструктурованій архітектурі носіїв та можливості реалізації спрямованого параклітинного або трансклітинного транспорту, такі системи забезпечують пролонговане й контрольоване вивільнення як гідрофільних, так і важкорозчинних сполук безпосередньо у вогнище патології. Оптимізація їхньої терапевтичної дії та архітектури безпосередньо залежить від інженерних підходів до формування матриксу, що зумовлює необхідність детального розгляду методичних аспектів їхнього виробництва.

#### **1.1.4 Технологічні методи одержання та класифікація функціональних плівок**

Сучасні дослідження демонструють, що використання методів лиття розчинником, електроспінінгу та 3D-друку дозволяє отримувати плівки з різними морфологічними властивостями, що визначають швидкість вивільнення лікарських речовин та ступінь їхньої мукоадгезії. Мукоадгезивні властивості є ключовим фактором терапевтичної ефективності, оскільки забезпечують тривале утримання системи на слизовій оболонці та пролонговане вивільнення активних сполук [18].

Особливу увагу приділяють амфіфільним плівкам, які здатні інкапсулювати слабкорозчинні препарати та створювати гідрофобні домени для їхньої стабілізації. Це дозволяє суттєво підвищити біодоступність лікарських речовин, що є критично важливим для терапії стоматологічних патологій [19].

Водночас біоактивні плівки з антимікробними та протизапальними агентами демонструють здатність впливати на мікробні угруповання ротової порожнини, знижуючи ризик формування біоплівок та розвитку дисбіозу [20].

Перспективним напрямом є створення регенеративних плівок, що включають фактори росту, пептиди або біополімерні комплекси, здатні стимулювати відновлення слизової оболонки та прискорювати процеси загоєння [21].

Регулювання кінетики розчинення таких функціональних плівок підпорядковується фундаментальним законам дифузійно-контрольованого масопереносу, де ключову роль відіграє ступінь зшивання макромолекулярних ланцюгів [22]. Така функціональна та технологічна диференціація закладає теоретичну основу для інтеграції плівкових інтерфейсів із більш складними об'ємними структурами.

Таким чином, полімерні плівкові системи у стоматології формують багатофункціональну платформу, яка поєднує захисні, терапевтичні та регенеративні властивості, забезпечуючи комплексний підхід до лікування локальних патологій.

У процесі еволюції полімерних плівкових матеріалів закономірним етапом стає звернення до гідрогелів, які являють собою більш складні тривимірні полімерні системи з високим потенціалом застосування у стоматології та біомедицині. Якщо плівкові конструкції виконують функцію локального бар'єрного захисту та забезпечують контрольоване вивільнення фармакологічних агентів на поверхні слизової оболонки, то гідрогелі здатні формувати об'ємні пористі матриці, що акумулюють значні кількості води та біологічних рідин. Така особливість створює оптимальне мікросередовище для клітинної інтеграції та стимуляції процесів регенерації тканин.

## **1.2 Гідрогелі стоматологічного призначення**

Гідрогелі характеризуються високою біосумісністю, здатністю утримувати вологу та створювати сприятливе середовище для клітинної активності. У стоматології вони використовуються для лікування пародонтальних кишень, покриття післяопераційних ран, носіїв для антибактеріальних та протизапальних препаратів.

Стан ротової порожнини є ключовим чинником, що визначає загальне фізичне здоров'я людини та рівень її життєвого комфорту [23]. Патології зубів і пародонту дедалі більше розглядаються як серйозна проблема громадського здоров'я як у країнах із високим рівнем розвитку, так і в державах, що розвиваються [24]. Найчастіше зустрічаються такі захворювання, як каріозні ураження, некротичні процеси пульпи, пародонтит, демінералізація емалі та інші [25].

Відновлення тканин зуба та процеси ремінералізації мають вирішальне значення для підтримання здоров'я ротової порожнини. Сучасна тканинна інженерія відкриває перспективи для створення матеріалів, здатних забезпечити регенерацію та ремінералізацію зубних структур. Зуби являють собою складні органи, що поєднують тверді та м'які тканини — емаль, цемент, дентин, пародонтальну мембрану та пульпу. Специфічне розташування та багатошаровість пародонтальних тканин висувають високі вимоги до властивостей відновлювальних матеріалів [26]. Для ремінералізації твердих тканин необхідні волокнисті шаблони. Завдяки швидкому розвитку полімерної науки нині з'являються матеріали, що відповідають вимогам біосумісності, технологічної гнучкості та універсальності, відкриваючи нові можливості для практики відновлення зубних тканин.

Гідрогелі, які виступають каркасними матеріалами в тканинній інженерії, останнім часом привертають особливу увагу дослідників [27, 28]. Це тривимірні зшиті полімерні мережі, утворені гідрофільними макромолекулами, що створюють пористе середовище, сприятливе для дифузії кисню та поживних речовин. Висока гідрофільність забезпечує стабільність їхньої структури після набухання у воді протягом тривалого часу. У процесі затвердіння гідрогелі здатні зберігати форму та об'єм. Окремі різновиди — термочутливі [29] та фоточутливі [30] — формують стабільні структури під дією температури чи світлового випромінювання певної довжини хвилі. Завдяки своїм фізико-хімічним характеристикам гідрогелі широко застосовуються у відновлювальних технологіях, особливо у випадках

складної анатомії зубів. Біосумісні модифікації включають ін'єкційні [31], тканинно-споріднені [32], нанокомпозитні [33] та «розумні» гідрогелі [34]. Останні здатні реагувати на фізіологічні та патологічні сигнали, що робить їх перспективними для широкого спектра біомедичних застосувань [35].

### **1.2.1 Структурно функціональна організація та фізико хімічні властивості гідрогелів**

Гідрогелі являють собою еластичні та пористі тривимірні структури, сформовані зі зшитих гідрофільних полімерів. Незважаючи на їхню нерозчинність у водному середовищі, такі полімерні мережі здатні поглинати значні кількості рідини, залишаючись у набухлому стані. Це забезпечує оптимальні умови для підтримання вологості та створює сприятливе середовище для біологічних процесів [36]. Такі системи здатні підтримувати міграцію клітин і сприяти частковій регенерації тканин, оскільки їхня структура нагадує природну організацію дерми. Архітектура гідрогелів подібна до позаклітинного матриксу, що створює сприятливе середовище для клітинної активності та відновлення [37].

Гідрогельні системи вирізняються широкими можливостями застосування завдяки своїй високій здатності до поглинання та утримання біологічно активних речовин протягом тривалого періоду. Ключовим аспектом їхнього використання у пародонтальній терапії є контрольоване вивільнення лікарських агентів, що забезпечує стабільність та збереження терапевтичної активності компонентів. Підтримання цілісності та ефективності таких речовин має вирішальне значення для успішного лікування пародонтальних захворювань [38].

Гідрогельні системи можуть ефективно виконувати роль носіїв лікарських речовин, забезпечуючи їх стабільне та контрольоване вивільнення у визначених ділянках організму. Крім того, вони знаходять застосування у поєднанні з біосенсорами, а також у складі носимих чи імплантованих біопристроїв та технологій біовізуалізації, що розширює спектр їхніх можливостей у біомедичних дослідженнях і клінічній практиці [39].

Гідрогелі розглядаються як ефективний матеріал для лікування пародонтальних захворювань завдяки їхній високій біосумісності, відсутності адгезії, здатності абсорбувати ексудат, утримувати вологу та забезпечувати газообмін. Первинне призначення гідрогелів як простого фізичного покриття для ран поступово трансформується у багатофункціональну концепцію, що поєднує кілька терапевтичних завдань і відкриває перспективи для подальшого розвитку інтелектуальних систем [40].

Для підвищення механічної міцності гідрогельних систем, оптимізації їхніх фармакокінетичних характеристик та посилення біологічної активності лікарських речовин, що інкапсулюються у їхній структурі, необхідно подолати низку існуючих обмежень. Незважаючи на те, що гідрогелі вже володіють багатьма властивостями, необхідними для створення сучасних пов'язок для ран, певні бар'єри залишаються актуальними. Саме тому науковці спрямовують свої зусилля на розробку інноваційних архітектур, які забезпечують ефективне розсіювання енергії та використовують різні методи зшивання — як хімічні, так і фізичні. Такий підхід дозволяє значно розширити потенціал застосування гідрогелів у біомедичних технологіях [41, 42].

### **1.2.2 Загальна класифікація гідрогелів та особливості кріоструктурування**

Класифікація гідрогелів нині є чітко сформованою та становить важливий інструмент для дослідників і інженерів, що працюють із цими матеріалами. Вона забезпечує основу для глибшого розуміння їхніх властивостей та поведінки, сприяючи вибору оптимальних систем для конкретних завдань. При цьому характеристики гідрогелів визначаються не лише технологічними процесами виготовлення, але й такими параметрами, як щільність, спосіб зшивання, концентрація полімерів та їхній склад [39].

Матеріали, отримані внаслідок кріотропного гелеутворення (кріоструктурування), являють собою макропористі гідрогелі з розвиненою системою взаємопов'язаних пор та властивістю «пам'яті форми». Останнім часом досягнуто значного прогресу у розумінні механізмів

кріоструктурування, а також у вдосконаленні співвідношень між компонентами, їхньою структурною організацією та практичним застосуванням кріогелів. Кріотропні полімерні матеріали, або кріогелі, визначаються як наноструктуровані макропористі гетерофазні системи, що утворюються шляхом послідовних стадій заморожування, витримання у замороженому стані та подальшого відтавання концентрованих полімерних розчинів чи колоїдно-дисперсних систем, у яких існують передумови для процесу гелеутворення [43-55].

Ключовою умовою формування гідрогелів методом кріоструктурування є процес заморожування, що супроводжується утворенням полікристалічної структури основної маси низькомолекулярного розчинника, який одночасно виконує роль пороутворювача. Саме ця стадія визначає морфологію майбутнього матеріалу та забезпечує формування макропористої архітектури [56-60].

Після розморожування в об'ємі зразка залишаються порожнини, заповнені відталим розчинником, тоді як безперервна полімерна мережа формує стінки цих пор. У результаті утворюються гетерогенні полімерні продукти — кріогелі або кріоструктурати — із системою взаємопов'язаних макропор. Залежно від типу середовища, у якому здійснюється кріотропне гелеутворення, кріогелі можуть бути синтезовані з різних вихідних систем [61-63]:

- хімічно зшиті гелі, що утворюються внаслідок полімеризації розчинів низько- або високомолекулярних мономерів у присутності ініціатора;
- системи на основі мономерів, здатних формувати ковалентно зшиті полімерні мережі шляхом поліконденсації;
- розчини, що містять полімери та хімічні зшивальні агенти, або ті, що утворюють гелеву матрицю під дією опромінення (УФ-,  $\gamma$ -випромінювання, фотоліз);

- розчини поліелектролітів із протийонами-зшивальниками, де після заморожування формується тривимірна мережа завдяки слабодисоціюючим іонним чи іонно-координаційним зв'язкам між ланцюгами поліелектроліту;

- системи на основі полімерних попередників, здатних до золь-гель переходу, індукованого охолодженням, що призводить до утворення фізично зшитої тривимірної полімерної структури;

- колоїдні дисперсії, заморожування яких спричиняє процес гелеутворення.

Кероване зшивання полімерів або білкових структур, що формують нано- чи мікропористі стінки макропор криогелів, може здійснюватися як хімічним шляхом, через утворення ковалентних зв'язків, так і фізичним, завдяки міжмолекулярним взаємодіям. Кількість перехресних зв'язків може варіюватися у широких межах, що дозволяє регулювати механічні та функціональні характеристики матеріалу. Саме тому важливим є розуміння закономірностей процесів заморожування за різних умов, які визначають текстуру та морфологію криогелів. Для біополімерів, таких як хітозан, альгінат, желатин, гіалуронова кислота та декстран, часто застосовують комбінований підхід, поєднуючи фізичні та хімічні методи зшивання або створюючи міжпроникні полімерні мережі, що забезпечує підвищену стабільність і функціональність отриманих матеріалів [64].

Хімічно зшиті криогелі зазвичай характеризуються більшими розмірами пор, що зумовлено використанням біфункціональних низькомолекулярних сполук як зшивальних агентів. Такі сполуки взаємодіють із функціональними групами або непередельними зв'язками полімерів, які беруть участь у процесі гелеутворення. Водночас реакція хімічного зшивання суттєво знижує здатність полімерних систем до необоротних деформацій та набухання. Для синтетичних і природних полімерів застосовують різні типи зшивачів: глутаровий альдегід утворює основи Шиффа з первинними амінами (наприклад, у желатині чи хітозані), які після відтавання можуть частково перетворюватися на більш стабільні структури, такі як циклічні ацеталі або

амінацеталі; карбодііміди активують карбоксильні групи, сприяючи утворенню амідних зв'язків (у системах на основі желатину чи альгінату); епоксидні зшивачі реагують з гідроксильними та амінними групами (ПВС, целюлоза, декстран); діізоціанати формують уретанові та сечовинні зв'язки; геніпін забезпечує м'яке та біосумісне зшивання аміновмісних біополімерів. У більшості випадків концентрацію зшивального агента та рН середовища підбирають таким чином, щоб реакція відбувалася вже у замороженому стані, що гарантує формування безперервних стінок каркаса кріогелю [65].

Фізичне (нековалентне) структурування кріогелів базується на утворенні термозворотних систем, які відзначаються високою здатністю утримувати вологу та відсутністю залишкових зшивальних агентів із потенційною токсичністю. Такі матеріали формуються завдяки різним механізмам: кристалізації сегментів у полівініловому спирті, асоціації спіральних структур у желатині, іонному зшиванню (наприклад, альгінат– $\text{Ca}^{2+}$ ), утворенню поліелектролітних комплексів (хітозан–гіалуронова кислота), а також завдяки множинним водневим зв'язкам. Подібні кріогелі є чутливими до температури, іонної сили та рН середовища, а їхні механічні властивості можна регулювати шляхом зміни концентрації полімеру, кількості циклів «заморожування–відтавання» та введенням різних наповнювачів, таких як кремнезем, глини чи наночастинки вуглецю [66].

Полівініловий спирт (ПВС) є одним із найпоширеніших полімерів для отримання кріогелів, що пояснюється його унікальними механічними, дифузійними та теплофізичними властивостями, а також доступністю, нетоксичністю, гідрофільністю, біосумісністю та здатністю до біорозкладу у біологічних середовищах людини [67-69].

Методика гелеутворення ПВС є відносно простою: концентрований розчин полімеру піддають заморожуванню з подальшим відтаванням. Завдяки великій кількості гідроксильних груп у макромолекулі ПВС структура кріогелю стабілізується внутрішньо- та міжмолекулярними водневими зв'язками. Процеси кріоструктурування цього полімеру детально досліджені у

працях Пеппаса, Лозінського, Ріккарді та Пазоса. Сформовані кріогелі ПВС є термозворотними, тобто вони плавляться при нагріванні. Експериментальні дані свідчать, що в'язкість вихідних розчинів і розчинів, отриманих після плавлення кріогелів, практично не відрізняється, що підтверджує відсутність міжмолекулярного хімічного зшивання. Властивості матеріалів, отриманих методом кріоструктурування, залежать від комплексу чинників вихідного полімерного розчину, включно з концентрацією, умовами заморожування та кількістю циклів «заморожування–відтавання» [70-72].

Основними складовими кріогелів є біорозкладні полімери, вибір яких визначає їхню здатність імітувати біологічне мікросередовище та властивості штучних тканин, а також безпечно деградувати чи метаболізуватися без утворення токсичних побічних продуктів. У науковій літературі підкреслюється, що для формування кріогелів можуть застосовуватися полімери різної хімічної природи, що дозволяє поєднувати корисні характеристики: синтетичні полімери забезпечують жорсткість і термостійкість, тоді як біополімери додають біосумісність, гідрофільність і здатність до біодеградації. Серед природних полісахаридів найбільш поширеними є хітозан і целюлоза, на основі яких створено унікальні кріогелі для медицини та біоінженерії [73, 74]. Такі матеріали використовуються як депо для адресної доставки лікарських речовин, пористі носії для клітинної інженерії, а також як ефективні сорбенти для очищення води та біологічних рідин від токсинів і іонів металів [75, 76].

Властивості природних полімерів, що застосовуються для отримання кріогелів, значною мірою залежать від їхньої хімічної природи (білкові чи полісахаридні системи), ступеня модифікації та умов проведення кріогелеутворення. Узагальнені підходи до синтезу таких матеріалів демонструють різноманітність методів та особливості їхньої деградації. Желатин і колаген широко використовуються як матриці завдяки біоактивності та наявності мотивів, що сприяють клітинній адгезії. Кріогелі на основі желатину можуть формуватися шляхом ковалентного зшивання

(геніпін, глутаровий альдегід у низьких концентраціях) або фізичного структурування з утворенням трьохспіральных доменів, яке часто доповнюється хімічним «фіксуванням». Такі системи зазвичай біодеградують під дією колагенази та інших протеаз, а швидкість розкладу регулюється щільністю зшивання та вмістом білкового компонента. Колагенові кріогелі забезпечують високу клітинну інфільтрацію та придатні для інженерії хрящової й кісткової тканини, особливо при модифікації неорганічними наповнювачами, такими як гідроксиапатит. Фібринові та альбумінові системи застосовуються для швидкого гемостазу та загоювання, проте потребують додаткового підсилення для забезпечення довготривалої механічної стабільності.

Альгінат натрію утворює кріогелі завдяки іонному зшиванню  $\text{Ca}^{2+}$  у замороженому стані; морфологія пор відображає структуру кристалів льоду. Збільшення концентрації кальцію та полімеру зменшує середній розмір пор і підвищує міцність на стиск, хоча недоліком є слабка клітинна адгезія. Гіалуронова кислота формує кріогелі через утворення амідних зв'язків або реакцію з гліцидильними та вінілсульфоновими агентами; можливе також зшивання геніпіном у присутності аміновмісних співавторів. Такі системи добре імітують позаклітинний матрикс м'яких тканин і деградують під дією гіалуронідаз. Декстран, целюлоза та їхні похідні (карбоксіметилцелюлоза, оксидований декстран) застосовуються для створення м'яких кріогелів із контрольованою гідролітичною стабільністю; альдегідні та карбонільні групи зручні для зшивання аміновмісних полімерів і іммобілізації лігандів. Глюкозамін та його похідні можуть виступати як мономерні або ковалентно інтегровані фрагменти у полісахаридних мережах, підвищуючи біоактивність і біорезорбцію; у кріогелях він використовується переважно як функціональний мотив для взаємодії з білками чи рецепторами або як будівельний блок у хітозан-базованих системах [77].

Хітозан є лінійним полісахаридом, що складається з  $\beta(1-4)$ -пов'язаних D-глюкозамінових залишків зі змінною кількістю випадково розташованих

N-ацетилглюкозамінових груп і отримується шляхом N-деацетилювання хітину. У нейтральних умовах він практично нерозчинний, проте легко розчиняється у присутності кислоти завдяки протонуванню аміногруп глюкозаміну. Хітозан є аналогом глюкозаміногліканів, що входять до складу екстрацелюлярного матриксу хряща, і здатний імітувати його середовище [78].

Матеріал доступний із різним ступенем деацетилювання, в'язкістю та молекулярною масою, що визначає кінцеві властивості кріогелю. Хітозан широко застосовується для створення тканинно-інженерних каркасів у регенерації кісток, хрящів і шкіри [79]. Завдяки наявності первинних аміногруп він утворює кріогелі як шляхом ковалентного зшивання (геніпін, глутаровий альдегід, епоксидні та карбодіімідні агенти), так і через поліелектролітні комплекси з гіалуроновою кислотою, альгінатом чи карбоксиметилцелюлозою.

Синтетичні макромолекули також посідають важливе місце у створенні кріоструктурованих матеріалів. Зокрема, на основі поліетиленгліколю отримують ковалентно зв'язані кріогелі, застосовуючи метод радикальної полімеризації. Швидкість руйнування таких систем у біологічному середовищі регулюють шляхом інтеграції в їхню структуру лабільних естерних, ацетальних фрагментів. Серед ключових переваг поліетиленгліколевих матриць виділяють відмінну біосумісність та можливість точного налаштування механічних параметрів, тоді як суттєвим мінусом є дефіцит специфічних ділянок для прикріплення клітин. ПВС дозволяє формувати фізичні кріогелі завдяки чергуванню циклів кріообробки та деструктуризації (заморожування–відтанення), де роль вузлів тривимірної сітки відіграють зони кристалізації. Окрім цього, для ПВС доступне і хімічне структурування за допомогою боратів, глутарового альдегіду чи гліцидильних сполук.

У своєму первинному вигляді цей полімер демонструє високу стійкість до біологічного розпаду. Для надання йому здатності до біодеградації застосовують методи хімічного окиснення, кополімеризації, а також

розробляють змішані матриці або композити з додаванням природних полімерів. Кріогелі на основі ПВС вирізняються чудовими пружними властивостями та здатністю стабільно утримувати задану форму. Полімолочна кислота та близькі за будовою складні поліестери вводяться до складу кріогелів або у формі зшитих макрономерів, або як зміцнювальні волокнисті структури та дисперсні наповнювачі. Руйнування таких компонентів відбувається шляхом гідролізу з утворенням безпечних для організму кислот, які легко включаються в обмін речовин.

Створення нових багатокомпонентних систем для потреб медицини та біотехнологій є одним із провідних векторів у сучасній хімічній науці. Раціональним та дієвим інструментом для цього є інтеграція у структуру матриць різноманітних розчинних чи дисперсних домішок, які завдяки своїм хімічним характеристикам забезпечують формування специфічного комплексу властивостей кінцевого продукту.

Такі гібридні матриці гармонійно поєднують переваги усіх залучених інгредієнтів. Це дозволяє цілеспрямовано конструювати матеріали із заздалегідь запрограмованими параметрами, як-от антибактеріальним ефектом, підвищеною жорсткістю, термостабільністю чи високим сорбційним потенціалом. Кріогелі самі по собі є гідрофільними, міцними, безпечними для живих систем та здатними до біодеградації структурами з розвиненою мережею інертних пор. Проте для суттєвого підвищення їхніх експлуатаційних показників часто використовують модифікацію за допомогою низькомолекулярних агентів або інших полімерних ланцюгів.

Комбінування макромолекул природного та штучного походження, а також залучення гетерогенних наповнювачів (серед яких гідроксиапатит, високодисперсний кремнезем, глинисті мінерали, оксиди металів та вуглецеві наноструктури) дозволяє оптимізувати архітектуру пор, покращити трибомеханічні характеристики та надати виробам нових функцій: електропровідності, біоактивності, здатності затримувати рентгенівське випромінювання чи пригнічувати ріст мікрофлори. Подібні композити не є

продуктом механічного поєднання кількох полімерів; їхня архітектура формується завдяки імплантації в матрикс сторонніх фаз у вигляді нано-, мікро- чи макрочастинок [81]. Як дисперсійне середовище (основу) застосовують синтетичні сполуки (полівініловий спирт, поліакрилати, поліакриламід), протеїни (альбумін, желатин, колаген), а також складні інтерполімерні комплекси. Їхнє поєднання з неорганічними агентами, зокрема активованим вугіллям, оксидом графену чи металооксидними сполуками, відкриває шлях до одержання гібридів із чітко вивіреними фізико-хімічними та біологічними параметрами. Окрім механічного зміцнення каркаса, введення таких наповнювачів допомагає вирішити завдання пролонгованого та контрольованого транспорту біологічно активних сполук в організмі [82].

Одержання композитних кріогелів на основі полівінілового спирту в комбінації з протеїнами та полісахаридами є ефективним шляхом створення багатофункціональних матриць. Як зазначалося раніше, тривимірні системи на основі ПВС мають виражену гідрофільність, механічну витривалість, нетоксичність для живих організмів і здатність до розпаду в біологічних середовищах, володіючи при цьому хімічно інертною системою взаємопов'язаних пор.

Для суттєвого підвищення їхніх робочих характеристик і розширення сфери застосування найчастіше використовують стратегію модифікування матриксу сторонніми макромолекулами або низькомолекулярними компонентами. Шляхом інтеграції різноманітних функціональних домішок у початковий розчин перед заморожуванням вдається синтезувати унікальні полімерні комплекси із заздалегідь запрограмованими адаптивними властивостями — так звані «розумні» (smart) матеріали, здатні динамічно реагувати на зміни зовнішнього середовища.

Імплантація у структуру гелю фармакологічних препаратів та протимікробних агентів дозволяє досягти ефекту пролонгованого вивільнення: вимивання активного компонента відбувається під впливом

осмотичного тиску або ж за рахунок вільної дифузії рухливих іонів крізь комірки тривимірної сітки [83, 84].

У сучасних дослідженнях, присвячених конструюванню інноваційних біоматеріалів, усе більшої популярності набуває метод спільного кріоструктурування ПВС із різноманітними полісахаридами. Значний науковий інтерес до таких систем викликаний присутністю у структурі полісахаридних ланцюгів реакційноздатних ефірних, гідроксильних та аміногруп, які здатні утворювати міцні внутрішньо- та міжмолекулярні контакти. Крім того, більшість сполук цього класу демонструють відмінну сумісність із тканинними структурами та рідкими середовищами людського організму, завдяки чому вони затребувані у найрізноманітніших сферах — від клітинної інженерії та трансплантології до розробки високоефективних сорбентів. Серед усього різноманіття полісахаридів найдетальніше вивчено особливості модифікації кріогелів ПВС за допомогою целюлози та хітозану.

У роботі [85] детально проаналізовано потенціал композитних сорбентів на основі полісахарид-глинистих комплексів для очищення водних середовищ від метиленового синього. Гібридну систему, що складалася з альгінату та монтморилоніту, синтезували методом кріотропного гелеутворення за температури  $-21^{\circ}\text{C}$ . Автори довели, що саме процес заморожування сприяв суттєвому зростанню сорбційної місткості матеріалу, оскільки забезпечив формування розвиненої питомої поверхні адсорбенту. Додатково в дослідженні було оцінено, як змінюються робочі параметри матриць за умов хімічної модифікації їхньої поверхні та в разі інтеграції сторонніх сорбційних компонентів.

Пародонтит, що формується внаслідок накопичення зубного нальоту, є складним для лікування через багатофакторний характер, у якому поєднуються бактеріальні інфекції та оксидативний стрес. Хоча механічні методи терапії залишаються базовим підходом, сучасні дослідження свідчать про доцільність одночасного впливу на обидва патогенетичні чинники. Завдяки своїм фізико-хімічним та біологічним властивостям гідрогелі

розглядаються як перспективні біоматеріали для пародонтальної терапії. Особливу увагу привертають системи на основі гідрогелів, що містять антимікробні компоненти та антиоксидантні агенти, оскільки вони забезпечують комплексний підхід до лікування і можуть стати ефективним інструментом у відновленні пародонтальних тканин [86].

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється гідрогелям як перспективним матеріалам для терапії пародонтальних захворювань [87]. Їхня здатність утримувати великі об'єми води та водночас зберігати стабільність структури після набухання пояснюється особливостями будови. Гідрогелі визначають як тривимірні полімерні мережі зі зшитою архітектурою, що забезпечує просторову стійкість та функціональність матеріалу [88-91].

Звичайні гідрогелі мають певні обмеження, зокрема недостатні механічні характеристики та неспроможність відтворювати природну мікроструктуру тканин, що знижує їхню ефективність у лікуванні пародонтальних патологій [92]. Окрім створення лише вологого середовища, їхній терапевтичний потенціал залишається обмеженим. У відповідь на ці виклики численні дослідження спрямовані на розробку багатофункціональних гідрогелів, які демонструють значно вищу ефективність у стимуляції загоєння ран та лікуванні пародонтиту завдяки комплексній біологічній активності [93].

Сучасні багатофункціональні гідрогелі поступово стають пріоритетним вибором для терапії складних форм пародонтиту [94]. Їхня перевага полягає у здатності доставляти лікарські препарати безпосередньо до уражених тканин, одночасно активуючи процеси регенерації та забезпечуючи механічну підтримку. Високий вміст води та специфічні фізичні властивості таких систем створюють сприятливе середовище для відновлення пародонту, що робить їх перспективними для клінічного застосування [95].

Низка досліджень останніх років довела, що функціональні біоматеріали з антиоксидантними та антимікробними властивостями можуть бути ефективними у терапії пародонтальних захворювань. Особливо перспективним є поєднання антимікробних агентів та антиоксидантів із

гідрогельними системами, оскільки така комбінація не лише подовжує час локальної дії препарату, але й зменшує негативний вплив слиновиділення, доповнюючи власні антибактеріальні та антиоксидантні характеристики гідрогелю. Крім того, ці матеріали забезпечують двофазне контрольоване вивільнення лікарських речовин — швидке початкове та пролонговане — що значно підвищує ефективність лікування пародонтиту [96].

Варто зазначити, що багатофункціональні гідрогелі не завжди створюються з метою одночасного поєднання антиоксидантних та антибактеріальних властивостей. Проте у низці експериментальних робіт вони використовувалися як носії для терапевтичних препаратів, демонструючи позитивні результати у лікуванні пародонтальних патологій [97, 98].

### **1.3 Функціональні властивості багатофункціональних гідрогелів для лікування захворювань пародонту**

Створення багатофункціонального гідрогелю з антимікробними та антиоксидантними властивостями передбачає ретельний підхід до проектування, спрямований на синергетичне включення біоактивних агентів, здатних боротися з пародонтопатогенами, одночасно пом'якшуючи оксидативний стрес у уражених тканинах пародонту.

#### **1.3.1 Вибір біосумісних полімерів**

Розробка матеріалу бере початок із прискіпливого добору нетоксичних, сумісних із живими тканинами полімерних матриць, які виступатимуть базою для майбутнього гідрогелю. Сама ця основа виконує роль каркаса, всередину якого інтегруються (інкапсулюються) активні сполуки з антиоксидантними та протимікробними властивостями. Найчастіше для таких цілей залучають природні макромолекули, зокрема хітозан чи альгінат, або ж звертаються до синтетичних аналогів — полівінілового спирту (ПВС) чи поліетиленгліколю (ПЕГ), які цінуються у науковій практиці за високу біосумісність та можливість гнучко налаштовувати фізико-хімічні параметри [99-100].

### 1.3.2 Включення антимікробних засобів

Для ефективного пригнічення патогенної мікрофлори порожнини рота до складу гідрогелевої основи вводять спеціалізовані антимікробні компоненти. У ролі таких агентів можуть виступати традиційні антибіотики, інноваційні протибактеріальні пептиди або ж біоактивні речовини природного походження. Головним критерієм підбору цих сполук є їхній цілеспрямований терапевтичний вплив на ключових збудників пародонтиту, зокрема на такі штами, як *Aggregatibacter actinomycetemcomitans* та *Porphyromonas gingivalis*. Рівномірний розподіл і гомогенне диспергування лікувальних субстанцій усередині полімерного каркаса гарантують стабільну дію безпосередньо на бактеріальні конгломерати (біоплівки), що дозволяє зупинити подальший розвиток деструктивних процесів у тканинах пародонта [101, 102].

У сучасній стоматологічній практиці для боротьби із захворюваннями пародонта застосовують широкий спектр протимікробних засобів, які призначають або локально, або у вигляді загальної терапії. Схема системного прийому медикаментів зазвичай використовується при агресивних, швидкопрогресуючих та запущених формах патології. Такий вибіркового підхід дозволяє знизити ймовірність розвитку загальних побічних реакцій організму та запобігти формуванню стійкості (резистентності) у хвороботворних мікроорганізмів [103]. Натомість локальна терапія вважається більш раціональною, оскільки вона дозволяє знизити як загальну дозу, так і періодичність застосування медикаментів, забезпечуючи при цьому максимальне накопичення діючої речовини безпосередньо в ділянці ясенної борозни. Подібна стратегія не лише полегшує для пацієнта дотримання терапевтичного протоколу, але й нівелює ризик розвитку небажаних ефектів, характерних для загального прийому препаратів [104].

Довгий час антибіотикотерапія залишалася базовим інструментом у комплексній схемі лікування патологій пародонта. Зокрема, у клінічній практиці активно призначали препарати тетрациклінового ряду. Проте наслідком тривалого й масового використання цієї групи ліків став стрімкий

ріст резистентності мікрофлори та активне поширення генетичних детермінант стійкості серед збудників інфекцій [105].

Високу терапевтичну ефективність серед сучасних протимікробних агентів виявляє моксифлоксацину гідрохлорид — фторхінолоновий дериват IV генерації. Ця сполука характеризується вираженою бактерицидною дією щодо таких еталонних патогенів, як *Staphylococcus aureus* та *Escherichia coli* [106].

Речовини природного походження традиційно посідають вагоме місце у фармакологічній практиці, причому їхньою характерною ознакою нерідко є поєднання антиоксидантної та протимікробної дії. Оскільки ці молекули виділяють із найрізноманітніших біологічних об'єктів — від рослинної і тваринної сировини до представників мікросвіту (бактерій, грибів та водоростей), вони формують потужну та різнопланову базу для створення нових терапевтичних засобів [107]. Особливу наукову та практичну цінність мають фенольні речовини — продукти вторинного метаболізму рослин, серед яких яскраво виділяються флавоноїди та поліфеноли. Ці біомолекули відомі своєю комплексною дією, що поєднує в собі виражений антиоксидантний ефект, здатність пригнічувати патогенну мікрофлору та купірувати запальні процеси [108-110]. Ця поєднання властивостей робить їх безцінними в пародонтологічній терапії.

Типовими представниками цієї групи є куркумін [111], *Ocimum sanctum* (базилік священний) [112], а також екстракт *Scutellaria baicalensis* (шоломниці байкальської) []. Значний терапевтичний інтерес становлять терпени та їхні модифіковані аналоги фітохімічного походження. Завдяки здатності ефективно руйнувати як грампозитивні, так і грамнегативні клітинні оболонки, ці метаболіти позиціонуються як альтернативна стратегія у подоланні полірезистентності інфекційних штамів [114].

Як ілюстрацію можна навести монотерпеноид тимол — ключову складову ефірних олій родини Глухокропивових. Його інтеграція до складу гідрогелевих каркасів гарантує тривалу бактерицидну дію, спрямовану на

пригнічення життєдіяльності *Streptococcus mutans* та *Staphylococcus aureus* [115].

Паралельно зі звичними антибіотиками та фітоекстрактами, у сучасній терапії активно заявляють про себе передові протимікробні агенти, серед яких особливе місце посідають Herbmedocin™ та сурфактин. Останній є ліпопептидним біосурфактантом, який синтезується бактеріями роду *Bacillus* і характеризується широким спектром біологічної активності, що охоплює антивірусну, онкосупресорну та антибактеріальну дію [116-118]. Своєю чергою, Herbmedocin™, що базується на катіонних рослинних компонентах, діє шляхом механічної деструкції негативно заряджених клітинних оболонок мікроорганізмів, деактивуючи їх. Обидва агенти виявляють потужну бактерицидну дію щодо ключових деструкторів пародонта, зокрема *Pseudomonas aeruginosa*, *Fusobacterium nucleatum*, *Streptococcus mutans* та *Porphyromonas gingivalis* [119].

Сучасні тенденції в пародонтологічній науці вказують на пріоритетність розробки нетрадиційних підходів, зокрема фотодинамічної деконтамінації (знезараження) та біотерапії з використанням пробіотиків. Синергічне поєднання цих новітніх тактик із традиційними схемами фармакотерапії забезпечує комплексний (мультиmodalний) вплив на вогнище інфекції, закладаючи підґрунтя для створення інтелектуальних лікувальних платформ нового покоління [120].

### **1.3.3 Методологічні підходи до інтеграції біологічно активних агентів**

Незалежно від обраної технології крос-лінкінгу (молекулярного зшивання), інтеграція протимікробних та антиоксидантних компонентів у структуру гідрогелю є ключовим етапом створення композиту. Введення активних речовин зазвичай реалізують за допомогою трьох основних підходів:

Пряме введення – лікувальні субстанції додають безпосередньо в рідкий розчин полімеру ще до моменту запуску реакції гелеутворення [121].

Попередня інкапсуляція – активні агенти спочатку іммобілізують (закривають) усередині носіїв — ліпосом або наноструктурованих частинок, і лише потім отримані комплекси розподіляють у гідрогелевій масі [122].

Поверхнева функціоналізація – модифікація та фіксація діючих речовин на зовнішніх шарах або всередині пор уже сформованого, повністю зшитого гідрогелевого каркаса [123].

Завдяки комбінуванню цих технологічних рішень стає можливим проектування розумних багатофункціональних гідрогелів із заданими параметрами. Такі системи забезпечують пролонговане й контрольоване вивільнення ліків безпосередньо у вогнище запалення, мають оптимізовані механічні характеристики та дозволяють досягти якісно нових результатів у клінічній терапії патологій пародонта.

#### **1.3.4 Оцінка клінічної ефективності та перспективні лікарські форми гідрогелів**

Можливості клінічного застосування гідрогелевих систем у пародонтологічній практиці вже стали об'єктом низки успішних медичних випробувань [124]. Зокрема, терапію деструктивних уражень тканин пародонта здійснювали із залученням гідрогелів на основі гіалуронової кислоти, що виконували роль матриці-носія для рекомбінантного фактора росту фібробластів людини (rhFGF-2). За результатами спостереження за групою з тридцяти пацієнтів було зафіксовано виражену позитивну динаміку: ключові клінічні індекси загоєння та регенерації пародонтальних ран суттєво покращилися після дванадцяти місяців від початку лікування [125].

Клінічна ефективність систем пролонгованого вивільнення була підтверджена у дослідженні [126], де брали участь пацієнти з пародонтитом, обтяженим деструкцією кісткової тканини. Терапевтичний підхід базувався на тривалій дифузії базового фактора росту фібробластів (bFGF) із желатинових гідрогелевих носіїв. Хірургічне втручання із формуванням мукоперіостального (слизово-окісного) клаптя було успішно проведене загалом у 23 соматичних пацієнтів.

Розробка та клінічна апробація композитних гелів, модифікованих твердими ліпідними мікрочастинками із вмістом доксицикліну гідрохлориду та метронідазолу, була успішно зреалізована Гадам (*Gad*) із співавторами. Сконструйовані ними локальні лікарські форми продемонстрували високу терапевтичну результативність під час санації вогнищ запалення у пацієнтів із деструктивними ураженнями пародонта [127].

Класичні методи терапії пародонтальних хвороб, зокрема пародонтиту, забезпечують лише часткову регенерацію тканин, тоді як сам процес супроводжується незворотною втратою структур, що утримують зуб, та системними ускладненнями. У цьому напрямі актуальні дослідження гідрогелів з природних полімерів, які виконують роль біоміметичних матриць, що здатні регулювати запалення, локально доставляти біоактивні речовини та тимчасово підтримувати тканини [128].

### **Висновок до розділу 1.**

Створення багатофункціональних гідрогелевих систем відкриває нові горизонти у консервативній та хірургічній пародонтології. Композитні матриці, насичені антиоксидантними комплексами та протимікробними компонентами, забезпечують точковий вплив безпосередньо у зоні деструкції тканин. Поєднання стандартного механічного очищення із аплікацією таких інноваційних біоматеріалів дозволяє значно успішніше купірувати деструктивні процеси в альвеолярному комплексі. Перспективи подальшого розвитку цієї галузі пов'язані з глибокою модернізацією існуючих рецептур. Окрему увагу вчені приділяють імуномодуючим властивостям новітніх носіїв — незважаючи на дефіцит досліджень на стику гідрогелевих технологій та пародонтальної імунотерапії, цей напрямок визнано вкрай багатообіцяючим.

Основними орієнтирами для майбутніх розробок мають стати підвищення клінічної ефективності, налаштування кінетики тривалого вивільнення інкапсульованих ліків і досягнення бездоганної біосумісності матеріалів із живими тканинами. При цьому проведення довгострокових

рандомізованих випробувань є критично важливим для підтвердження безпеки та результативності таких матриць у повсякденній практиці. Паралельно з цим, залучення нових полімерних сполук та передових методів виготовлення здатне прокласти шлях до систем наступного покоління, які гарантуватимуть вищу терапевтичну точність і кращий комплаєнс з боку пацієнтів. Перехід мультифункціональних гідрогелів у практичну медицину здатний кардинально змінити підходи до лікування захворювань ясен. Проте успішна реалізація цього потенціалу та покращення результатів у сфері здоров'я ротової порожнини безпосередньо залежать від активної міждисциплінарної взаємодії біоматеріалознавців, спеціалістів із клінічної фармакології та практикуючих стоматологів.

## **РОЗДІЛ 2. ВИХІДНІ МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.**

Цей розділ присвячено детальному опису вихідних матеріалів та методів, що були використані для розробки полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення комбінованої дії. Представлено характеристики використаних у роботі полімерів — полівінілового спирту, картопляного крохмалю та карбоксиметилкрохмалю.

Розглянуто роль модифікаторів полімерних композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, а саме фітоекстрактів кори дуба й кропиви, а також мінерального наповнювача – глини монтморилонітового типу, які обумовлюють стійкість композитів, їхні сорбційні та фізико-механічні властивості. Описано методику приготування зразків плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення, що включала змішування компонентів, формування плівкових матеріалів методом аплікаційного поливу та гідрогелів – кріоструктуруванням.

Крім того, узагальнено використані методи дослідження реології розчинів, сорбційних характеристик, деформаційних та мікробіологічних параметрів, а також спектрофотометричне дослідження вивільнення екстрактів кори дуба.

### **2.1 Вихідні матеріали для досліджень**

Для формування стоматологічних гідрогелів та плівок використовували полімерну матрицю на основі ПВС, Кр та КМК. склад та властивості вихідних речовин, задіяних у. Об'єктами опису є синтетичні й природні полімерні матриці, високодисперсні мінеральні добавки та терапевтичні рослинні екстракти. Наведені характеристики є основою для розрахунку експериментальних рецептур та прогнозування експлуатаційних параметрів готових полімерних композитів.

Об'єктами опису є синтетичні й природні полімерні матриці, високодисперсні мінеральні добавки та рослинні екстракти. Наведені фізико-хімічні та структурні характеристики є основою для розрахунку експериментальних рецептур, оптимізації технологічних режимів їхнього

одержання, а також для прогнозування експлуатаційних, сорбційних і фізико-механічних параметрів готових полімерних композитів. Систематизація вихідних показників дозволяє встановити закономірності взаємодії між окремими компонентами систем та обґрунтувати їхню біомедичну безпеку.

### 2.1.1 Полівініловий спирт

Для створення полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення комбінованої дії в якості полімерних основ в роботі використовували полівініловий спирт марки та ПВС 16/1 із масовою часткою ацетатних груп не більше 0,9–1,7%, ПВС 17-99, масова частка ацетатних груп менше 2 % CAS 9002-89-5.

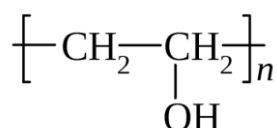


Рис. 2.1 Структурна формула ПВС

Полівініловий спирт характеризується низкою виняткових властивостей, серед яких особливе значення мають його нетоксичність та відсутність антигенності. Це зумовлює високу сумісність із клітинними структурами та кров'ю, а також гарантує відсутність канцерогенних та алергенних ефектів. Додатково ПВС вирізняється значною гідрофільністю, здатністю активно поглинати вологу та набухати. Він демонструє підвищену реакційну активність щодо широкого спектру хімічних реагентів, утворює водородні зв'язки з різними полярними сполуками як низько-, так і високомолекулярної природи, а також може зшивати макромолекули за участю альдегідів, дикарбонових кислот, діізоціанатів, діепоксидів тощо [129].

Сукупність цих характеристик робить ПВС перспективним матеріалом для створення різноманітних лікарських форм та медичних виробів. Узагальнені дані щодо властивостей полівінілового спирту наведено в таблиці 2.1. Водний розчин ПВС є прозорим текучим середовищем, реологічні властивості якого залежать від термічних умов та концентрації полімеру. Зокрема, показник в'язкості системи падає із ростом температури й перебуває

у прямій залежності від масового співвідношення компонентів. Підвищення температури дозволяє отримати більш концентровані розчини, тоді як використання високоінтенсивних молекулярних мас ПВС, навпаки, обмежує граничний вміст полімеру у воді. Зниження температури супроводжується зростанням густини розчину та його поступовим помутнінням.

Таблиця 2.1.

Показники	Марка	
	ПВС 17-99	ПВС 16/1
Ступінь гідролізу	99,7%	99,8%
Динамічна в'язкість 4%-го розчину	22,0 – 28,0 мПа·с	14 – 17 мПа·с
Леткі речовини	≤ 5,0%	≤ 4,0%
Масова частка основної речовини	≥ 94,0%	≥ 96,0%
Зола	≤ 0,7%	≤ 0,5%

Завдяки відсутності токсичної, антигенної, канцерогенної чи алергенної дії, ПВС характеризується відмінною біосумісністю із клітинними структурами та кров'ю. Для цього полімеру притаманні виражена гідрофільність, здатність поглинати вологу та інтенсивно набухати. Хімічна активність ПВС зумовлена наявністю функціональних груп, які легко утворюють системи водневих зв'язків із полярними речовинами різної молекулярної маси. Крім того, макроланцюги ПВС здатні до структурування (зшивання) під дією різноманітних агентів, зокрема дикарбонових кислот, альдегідів, діепоксидів чи діізоціанатів.

### 2.1.2 Крохмаль

У якості одного з базових компонентів для створення плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення комбінованої дії було використано картопляний крохмаль (Кр) CAS: 9005-25-8

Крахмаль картопляний є природним біополімером, який широко використовують у фармацевтичних та медико-біологічних технологіях завдяки своїй доступності, біосумісності та можливості модифікації. Його

структура представлена двома основними фракціями — амілозою та амілопектином, які визначають фізико-хімічні та технологічні властивості матеріалу.

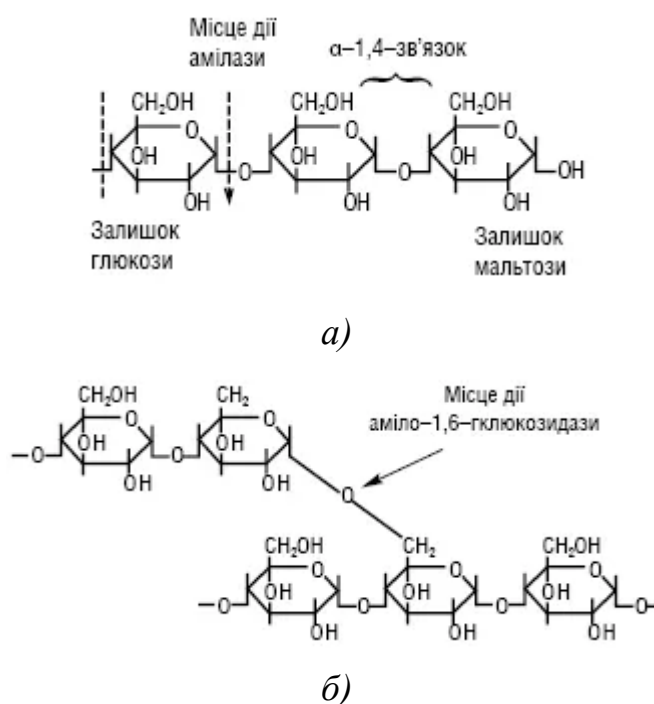


Рис. 2.2 Структурна формула амілозою (а) та амілопектином (б).

Амілоза, як лінійний полімер глюкози, забезпечує здатність до утворення гелів та формування міцних структур, тоді як амілопектин, завдяки розгалуженій будові, надає системі еластичності та впливає на реологічні характеристики. Картопляний крохмаль характеризується високою гідрофільністю, здатністю до набухання та утворення стабільних гідрогелів, що робить його перспективним для створення стоматологічних матеріалів комбінованої дії. Він не виявляє токсичності та антигенності, що підтверджує його біосумісність із клітинними структурами та тканинами організму. Крім того, крохмаль може бути підданий різним видам хімічної модифікації, зокрема карбоксиметилуванню, ацетилюванню чи окисленню, що дозволяє регулювати його розчинність, механічну міцність та сорбційні властивості.

Густина абсолютно сухого картопляного крохмалю  $\sim 1,65 \text{ г/см}^3$ .

У стоматологічних матеріалах крахмаль виконує роль структуроутворювача, що забезпечує контрольоване набухання та поступове вивільнення лікарських речовин, а також сприяє формуванню біодеградованих систем, які не потребують видалення після виконання терапевтичної функції.

Таблиця 2.2

Фізико-хімічні показники крохмалю

Показник	Вміст на 100 гр, мас.%
	Картопляний
Колір	білий з блиском
Масова частка вологи, %	17 – 20
Масова частка загальної зольності	0,30
Білки	0,1
Жири	-
Вуглеводи	79,6
Мінеральні речовини (Na, K, Ca, P, Mg)	0,10
Кислотність, не більше ніж	7,5
Кількість вкраплень на 1 дм <sup>2</sup> рівної поверхні під час розглядання неозброєним оком, шт., не більше ніж	60,0

Поєднання картопляного крохмалю з синтетичними полімерними матрицями, такими як полівініловий спирт, дозволяє отримати матеріали з оптимальними реологічними, сорбційними та механічними характеристиками, що відкриває широкі перспективи для його застосування у створенні сучасних стоматологічних гідрогелів та плівкових систем.

### 2.1.3 Карбоксиметилкрохмаль

Як один з основних складників при одержанні плівкових матеріалів та гідрогелів комбінованої дії для стоматології було застосовано карбоксиметилкрохмаль (КМК) CAS: 9063-38-1.

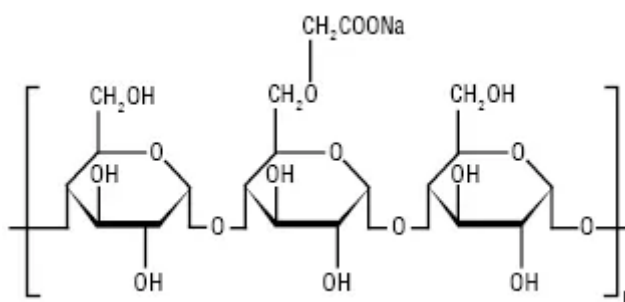


Рис. 2.3 Структурна формула КМК

Карбоксиметильований крахмаль є модифікованим похідним природного полісахариду, який одержують шляхом введення карбоксиметильних груп у структуру глюкозних ланок крахмалу. Така модифікація суттєво змінює його фізико-хімічні властивості, зокрема підвищує розчинність у воді, збільшує гідрофільність та здатність до утворення стабільних гідрогелів. Карбоксиметильні групи надають молекулі додаткових функціональних можливостей, що забезпечує утворення водородних та іонних зв'язків із різними біологічними та синтетичними компонентами. Завдяки цьому карбоксиметильований крахмаль характеризується високою біосумісністю, відсутністю токсичності та антигенності, що робить його придатним для використання у фармацевтичних та стоматологічних матеріалах.

Фізико-хімічні показники КМК наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Фізико-хімічні показники КМК Марка С

Показник	Норма
Зовнішній вигляд	Дрібнозернистий, порошкоподібний або волокнистий матеріал від білого до кремового кольору
Масова частка основної речовини,%, не менше	75,0
Масова частка вільного NaOH, %, не менше	1,0

Розчинність у воді,%, не менше	98,0
Активність водневих іонів (рН) водного розчину з масовою часткою КМК 1,5%	8-11

Особливе значення має його здатність до регулювання реологічних властивостей полімерних систем: він може виступати як стабілізатор, структуроутворювач та сорбент, що забезпечує контрольоване набухання та поступове вивільнення лікарських речовин. Крім того, карбоксиметильований крахмаль здатний взаємодіяти з іншими полімерними матрицями, такими як полівініловий спирт, утворюючи міжмолекулярні зшивки, що підвищують механічну міцність та еластичність матеріалів. Це відкриває перспективи його застосування у створенні біодеградованих стоматологічних гідрогелів, плівкових систем та композитів, які поєднують високу функціональність із безпекою для організму.

#### 2.1.4 Глина монтморилонітового типу

Як мінеральну добавку в гідрогелі стоматологічного призначення комбінованої дії в композицію вводили глину монтморилонітового типу виробництва компанії «Дашбент», Дашуківське родовище Черкаської обл. з другого продуктивного шару марки М-5, яка представляє собою шаруватий силікат із загальною формулою  $(Ca,Na)(Al,Mg,Fe)_2(OH)_2[(Si,Al)_4O_{10}] \times nH_2O$ . Хімічний склад мінералу:  $SiO_2$  – 51,9%,  $Al_2O_3$  – 17,10%,  $Fe_2O_3$  – 7,92 %,  $MgO$  – 1,18%,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  і  $CaO$  до 2% і  $H_2O$  – 8,78%.

Кристалічна решітка монтморилоніту складається з трьох основних шарів: октаедричного шару, в якому центральним іоном є алюміній (або магній), та двох зовнішніх силікатно-кисневих тетраедричних шарів (рис. 2.3).

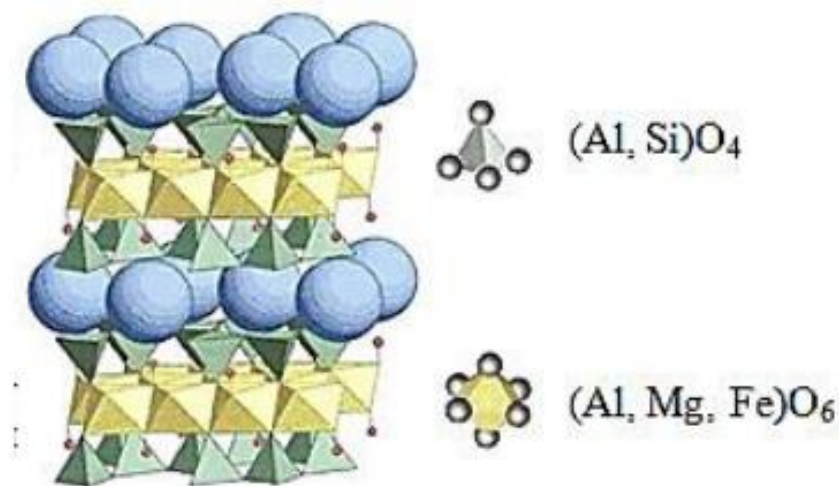


Рис. 2.3. Кристалічна структура монтморилоніту

Утворюється осаджувальним шляхом, внаслідок вивітрювання порід, вулканічного попелу та скла, рідше – гідротермальним способом [130]. Вперше мінерал виявили у Франції, також розвідано родовища у Грузії, Німеччині, США та на території України (Черкаське, Горбське). Серед форм виділення відомі тонкодисперсні, приховано кристалічні, щільні землясті агрегати. Іноді монтморилоніт утворює змішаношаруваті зростання з каолінітом та гідрослюдами.

Мінерал на ряду з бентонітом, асканітом, гумбрином широко використовують у будівельній, нафтопереробній, текстильній та гумовій галузях промисловості в якості сорбентів, відбілювачів та очисних засобів. Цікавими властивостями монтморилоніту є його висока сорбційна здатність, мінерал здатний інтенсивно поглинати вологу у значних кількостях та утримувати її, що супроводжується набряканням.

Серед інших властивостей матеріалу, що представляють інтерес для застосування монтморилоніту в якості мінеральної добавки – його антибактеріальні властивості та напівкристалічна структура. Деякі фізико-хімічні властивості монтморилоніту наведено у таблиці 2.3.

Основною особливістю монтморилоніту є його здатність до адсорбції різноманітних іонів, здебільшого катіонів, а також схильність до іонного

обміну. У кристалічній решітці монтморилоніту приблизно 1/6 атомів алюмінію в середньому шарі заміщена атомами магнію.

Таблиця 2.4.

Фізико-хімічні властивості монтморилоніту

Колір	Білий з сіруватим і червонуватим відтінками та матовим блиском
Сингонія	Моноклінна
Густина	2
Твердість	1-2

Це заміщення  $Al^{3+}$  на  $Mg^{2+}$  спричиняє утворення надлишкового від'ємного заряду. У міжпакетному просторі розташовуються обмінні катіони  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  та  $Mg^{2+}$ , які у водному розчині можуть здійснювати еквівалентний оборотний обмін, що характеризується так званою обмінною здатністю глини [131].

### 2.1.5 Кропива дводомна *Urtica dioica*

В роботі використовувалася висушені листя кропиви дводомної *Urtica dioica* ТМ «Ліктрави», Україна.

Кропива дводомна *Urtica dioica* є багаторічною трав'янистою рослиною (рис.2.4), яка поширена на території Європи, Азії та Північної Америки. Вона характеризується високим вмістом біологічно активних сполук, серед яких дубильні речовини, білки, органічні кислоти (зокрема мурашина), глікозид уртицин, вітаміни (К, С, пантотенова кислота, каротиноїди), хлорофіл, фітостерини, гістамін та мінеральні солі, особливо заліза.



Рис 2.4 Кропива дводомна *Urtica dioica*

Фармакологічні властивості кропиви зумовлені комплексом цих речовин. Вітамін К стимулює синтез протромбіну у печінці, що забезпечує виражений гемостатичний ефект. Препарати на основі кропиви застосовуються при легеневих, маткових, ниркових та кишкових кровотечах. Крім того, вони мають жовчогінну та протизапальну дію, сприяють регенерації слизових оболонок шлунково-кишкового тракту, а також чинять позитивний вплив на серцево-судинну систему та процеси грануляції тканин.

Сучасні огляди літератури [132] підтверджують, що *Urtica dioica* має широкий спектр фармакологічних застосувань, включаючи лікування анемії, атеросклерозу, гастритів, виразкової хвороби, дерматологічних патологій та як допоміжний засіб у післяпологовий період. У клінічній практиці екстракти кропиви використовуються як кровоспинні та полівітамінні засоби, а також як стимулятори скоротливої здатності гладкої мускулатури матки [133].

Таким чином, кропива дводомна є перспективним природним джерелом біологічно активних речовин для створення фармацевтичних препаратів та біополімерних матеріалів стоматологічного призначення. Її екстракти можуть бути інтегровані у полімерні матриці, зокрема на основі полівінілового спирту та крахмалу, для отримання гідрогелів із комбінованою дією, що поєднують гемостатичні, протизапальні та регенеративні властивості.

### 2.1.5 Кора дуба *Quercus cortex*

Кора дуба звичайного *Quercus cortex* є цінною фітосировиною (рис. 2.5), хімічний склад якої відзначається надзвичайно високим вмістом дубильних речовин (танінів) — до 29 %. Крім того, у ній ідентифіковано значні концентрації флавоноїдів (зокрема кверцетину), галової та елагової кислот до 1,6 %. Серед інших важливих компонентів присутні флобафен, пентозани до 14 %, пектинові сполуки до 6 %, цукри, слиз, білкові речовини, крохмаль та мінеральні елементи [134]. Екстракти кори дуба *Quercus cortex* демонструють розширений спектр фармакологічної активності, включаючи виражену в'язучу, протизапальну, антимикробну, противірусну та спазмолітичну дії. Додатково засвідчені гіпотензивний, антиоксидантний, антиканцерогенний та радіопротекторний ефекти.



Рис.2.5. Кора дуба *Quercus cortex*

Завдяки здатності зупиняти запалення, сприяти загоєнню та забезпечувати протигнільну дію, сировина знайшла активне застосування у стоматології для терапії таких патологій, як гінгівіт, стоматит, пародонтоз та періостит (флюс). У дерматологічній практиці кора дуба *Quercus cortex* використовується зовнішньо (у вигляді примочок) для лікування екземи, тріщин, опіків та інших уражень шкірного покриву. Дезінфекційні, антигеморагічні та протипроменеві властивості кори дуба *Quercus cortex* безпосередньо пов'язані з наявністю галової кислоти та її похідних. Саме з цими сполуками корелює здатність лікарського засобу підвищувати щільність і знижувати проникність судинно-тканинних мембран.

У межах даного дослідження для одержання водного екстракту використовувалась кора дуба *Quercus cortex* ТМ Ліктрави, яка є єдиною сировиною, що внесена в Державний реєстр лікарських засобів України за складом діючих речовин. Реєстраційне посвідчення: UA/5672/01/01 Наказ МОЗ №1810 від 04.10.2018, термін дії реєстраційного посвідчення необмежений з 30.05.2016. В Державному реєстрі лікарських засобів України зазначений наступний склад діючих речовин: дуба кора *Quercus cortex* містить: не менше 2,5 % танінів у перерахунку на пірогалол та суху сировину або не менше 8,0 % дубильних речовин у перерахунку на танін і суху сировину. Одержання водного витягу кори дуба *Quercus cortex* проводилася за класичною інструкцією від виробника «Ліктрави».

## **2.2. Приготування компонентів полімерних композитів для зразків плівкових матеріалів та гідрогелів**

Одержання композиційних плівок та гідрогелевих структур із заданим комплексом властивостей безпосередньо залежить від точності дотримання технологічних параметрів на етапі підготовки вихідних речовин. Оскільки досліджувані системи є багатокомпонентними і поєднують у собі як синтетичні, так і модифіковані природні полімери, біоактивні рослинні екстракти та мінеральні наповнювачі, першочерговим завданням є переведення їх у стабільний та гомогенний стан.

Процес приготування компонентів майбутніх композитів містив серію послідовних операцій: теплову та механічну активацію гідрофільних полімерних матриць, рідинну екстракцію біологічно активних речовин із рослинної сировини, а також цільове змочування мінеральної добавки для забезпечення її подальшого рівномірного розподілу в об'ємі.

### **2.2.1 Приготування розчинів полівінілового спирту**

В роботі готували 10% розчин ПВС на дистильованій воді при постійному перемішування механічною мішалкою на водяній бані протягом 40-50 хвилин.

Також для приготування фітогідрогелів 10% розчинів ПВС готували на основі водних екстрактів кропиви дводомної *Urtica dioica* та кори дуба *Quercus cortex*.

### **2.2.2 Приготування розчинів крохмалю картопляного**

В роботі готували 10% розчин крохмалю картопляного. Для цього у холодну дистильовану воду при постійному перемішуванні додають крохмаль та, продовжуючи перемішування поміщають суміш на водяну баню. Нагрівання продовжують до утворення прозорого в'язкого розчину приблизно протягом 10 хвилин.

Також для приготування фітогідрогелів 10% розчин крохмалю готували при додаванні в якості основи водних екстрактів кропиви дводомної *Urtica dioica* та кори дуба *Quercus cortex*.

### **2.2.3 Приготування розчинів карбоксиметильованого крохмалю**

5% розчини карбоксиметильованого крохмалю готують настоюванням у дистильованій воді, або у водному екстракті кропиви дводомної *Urtica dioica* або кори дуба *Quercus cortex* при кімнатній температурі протягом 15 хвилин.

### **2.2.4 Приготування мінеральної добавки на основі глини монтморилонітового типу**

Мінеральну добавку для створення гібридних гідрогелів порошок глини, оброблюють при постійному перемішуванні 0,025% розчином ПВС у співвідношенні 1:6 з метою одержання змоченого мінерального наповнювача.

### **2.2.5 Приготування екстракту кропиви дводомної *Urtica dioica***

Для створення основи розчинів ПВС, Кр та КМК готували водний екстракт кропиви дводомної *Urtica dioica* за рецептурою 100 гр. сухої сировини листя кропиви дводомної *Urtica dioica* заливають 1 л холодної дистильованої води. Екстрагування здійснюють шляхом нагрівання суміші на водяній бані упродовж 15 хв. при температурі екстракції 95°C, а потім охолодження протягом 45 хв. при кімнатній температурі. Після чого проводили проціджування з наступною фільтрацією через складчастий фільтр для виключення частин рослин в водному екстракті.

[135, 136]

### **2.2.6 Приготування екстракту кори дуба *Quercus cortex***

Водний екстракт кори дуба *Quercus cortex* готували методом рідинної екстракції. Наважку сухої подрібненої рослинної сировини масою 100 г переносили в емальований посуд та додавали 1 л гарячої дистильованої води. Процес вилучення активних речовин проводили на киплячій водяній бані протягом 30 хвилин, суворо контролюючи термодинамічний режим — температура суміші мала становити 85 °С. Одержану систему охолоджували, після чого розділяли фази шляхом декантації та належного фільтрування крізь складчастий паперовий фільтр, що дозволило повністю позбутися зважених часток і досягти високої прозорості цільового розчину.

### **2.2.7 Приготування зразків плівкових матеріалів та гідрогелів**

Методика формування експериментальних зразків плівкових матеріалів та гідрогелів передбачала попереднє приготування розчинів базових полімерних матриць, підготовку активних рослинних екстрактів та модифікуючих мінеральних добавок із наступним їх поєднанням. Створення комплексних систем відбувалося у кілька послідовних етапів, що включали розчинення синтетичних і природних полімерів, екстрагування біоактивних речовин та механічне диспергування наповнювача.

Процес одержання вихідних компонентів, розчинів та функціональних добавок здійснювали за описаними нижче критеріями та технологічними режимами.

#### **2.2.7.1 Приготування композицій для зразків плівкових матеріалів та гідрогелів**

Для виготовлення гідрогелів на основі 10% розчину ПВС марки 16/1 з 10% розчину Кр або 5% розчину КМК готували композиції розчинів у співвідношенні об'ємних частин наведених в таблиці 2.5. механічною мішалкою при температурі 40 °С.

Таблиця 2.5.

Рецептура композицій ПВС/Кр, ПВС/КМК

Композиція	Зразок										
ПВС/Кр	10/0	9/1	8/2	7/3	6/4	5/5	4/6	3/7	2/8	1/9	0/10
ПВС/КМК	10/0	9/1	8/2	7/3	6/4	5/5	4/6	3/7	2/8	1/9	0/10

Для створення гібридних гідрогелів готували композиції на основі 10% розчин ПВС марки 16/1 і 5% розчин КМК та змішували у співвідношенні 1/1. Додавали порошок глини, попередньо обробленого 0,025% розчином ПВС у співвідношенні 1:6 з метою одержання змоченого мінерального наповнювача. В результаті отримано зразки з наступним об'ємним співвідношенням ПВС/КМК:глина наведеними в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6.

Рецептура композицій ПВС/КМК модифікованих глиною  
монтморилонітового типу

Композиція	Зразок										
ПВС/КМК	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1
Глина	10/0	9/1	8/2	7/3	6/4	5/5	4/6	3/7	2/8	1/9	0/10

Для виготовлення гідрогелів на основі 10% розчину ПВС марки 17-99 з 10% розчину Кр модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica* готували композиції розчинів у співвідношенні об'ємних частин наведених в таблиці 2.7. механічною мішалкою при температурі 60 °С.

Таблиця 2.7.

Рецептура композицій ПВС/Кр модифікованих екстрактом кропиви  
двodomної *Urtica dioica*

Композиція	Зразок										
ПВС/Кр	10/0	9/1	8/2	7/3	6/4	5/5	4/6	3/7	2/8	1/9	0/10

Для виготовлення плівкових матеріалів та гідрогелів на основі 10% розчину ПВС марки 17-99 з 10% розчину Кр та 5% КМК модифікованих

водним екстрактом дуба *Quercus cortex* готували у наступних об'ємних співвідношеннях (Таблиця 2.8) механічною мішалкою при температурі 60 °С.

Таблиця 2.8.

Рецептура композицій ПВС/Кр, ПВС/КМК модифікованих водним екстрактом дуба *Quercus cortex*

Композиція	Зразок										
ПВС/Кр	10/0	9/1	8/2	7/3	6/4	5/5	4/6	3/7	2/8	1/9	0/10
ПВС/КМК	10/0	9/1	8/2	7/3	6/4	5/5	4/6	3/7	2/8	1/9	0/10

### 2.2.7.2 Методика приготування плівкових матеріалів та гідрогелів

Полісахаридні плівкові матеріали формували на підкладці з оргскла, використовуючи ручний рамковий аплікатор (робоча ширина — 100 мм, зазор — 1 мм) [137]. Нанесення здійснювали за температури розчину 60 °С, після чого зразки витримували впродовж 48 годин за кімнатних умов до повного висихання.

Синтез гідрогелів реалізували шляхом кріоструктурування. Цей підхід передбачав витримання сумішей при -15 °С протягом доби з подальшим контрольованим відтаванням за умов кімнатної температури. На етапі криогенного заморожування відбувалося структурування ПВС, тоді як тривимірна сітка Кр та КМК формувалася безпосередньо під час розморожування [138-140].

### 2.3. Методи дослідження

Комплексна оцінка властивостей розроблених полімерних композицій, плівкових матеріалів та фітогідрогелів потребувала застосування взаємопов'язаної системи сучасних фізико-хімічних, структурно-реологічних, фізико-механічних та біологічних методів аналізу. Вибір інструментальних методик обумовлений специфікою цільового призначення матеріалів — зокрема, перспективою їх використання у стоматологічній практиці, що висуває суворі вимоги як до структурної стабільності й міцності, так і до біомедичної ефективності систем.

### 2.3.1 Вимірювання реологічних властивостей композицій

Визначення в'язкості проводили за допомогою ротаційного віскозиметра Vevor NDJ-9S (КНР). Вимірювання виконувались відповідно до інструкції з експлуатації приладу та стандартів, зокрема ДСТУ 1929-2002.

Для проведення експерименту підготовлені зразки поміщали у вимірювальний циліндр віскозиметра, де обертальний ротор генерував сили опору, створювані в'язкістю рідини. Ці сили фіксувались калібрувальною спіральною пружиною, що дозволяло отримати точні значення в'язкості. Для проведення експерименту використовувався ротор №4, за допомогою якого вимірювали в'язкість усіх композицій послідовно. Процес вимірювання здійснювався за швидкостях обертання ротора від 60 об./хв до 0,1 об./хв та у зворотному напрямку. В'язкість розраховується, як співвідношення між напругою зсуву  $\tau$  та градієнтом швидкості зсуву  $\gamma$  за формулою:  $\eta = \tau/\gamma$ .

Для встановлення характеристик структурних змін, які відбуваються під дією напруження зсуву, застосовують показник індексу течії розчину  $n = dl\gamma\tau/dl\gamma$ .

### 2.3.2 Визначення вологовмісту зразків гідрогелів

Вміст води у початкових зразках гідрогелів на основі полісахаридів визначали на аналізаторі вологості MA-50 R Radwag при температурі висихання 70 °С.

### 2.3.3 Визначення сорбційних характеристик плівкових матеріалів та гідрогелів

Сорбційну здатність плівкових матеріалів та гідрогелів визначали шляхом вимірювання зміни поглинання дистильованої води та фізіологічного розчину NaCl (%) при температурі 37 °С. Для цього використовували розрахункове співвідношення:

$$X = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\%,$$

де  $m_2$  – маса зразка в певний момент часу перебування у воді або фізіологічному розчині NaCl, г;  $m_1$  – маса сухого зразка, г.

### 2.3.4 Визначення десорбційної здатності гідрогелів

В роботі десорбційну здатність досліджували гравіметричним методом. Зразки гідрогелів розмішали при кімнатній температурі для висушування. Втрату вологи оцінювали за зміною маси зразка в часі.

$$X_B = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\%,$$

де  $m_2$  – маса зразка в певний момент часу висушування, г;  $m_1$  – маса сухого зразка, г.

### 2.3.5 Визначення фізико-механічних властивостей плівкових матеріалів та гідрогелів

Визначення фізико-механічних властивостей плівкових матеріалів та гідрогелів дозволило оцінити їхню міцність, еластичність і здатність витримувати механічне навантаження. Зразки плівкових матеріалів та гідрогелів мали стандартну ширину 10 мм та довжину 85 мм. Міцність на розрив та відносне видовження при розриві визначали відповідно до стандартного методу випробувань ASTM D882-18 для властивостей на розтяг тонких пластикових листів [141]. Використовували прилад для вимірювання міцності на розрив BDO–FBO.5TH (ZwickRoell, Німеччина)

Методика визначення механічних властивостей плівок під час розтягу.

Розривне навантаження ( $F_p$ , Н) та відносне видовження під час розривання ( $\varepsilon_p$ , %) плівки досліджували. Під час дослідження вимірювали навантаження та видовження зразка: безперервно, в момент досягнення границі текучості та в момент руйнування зразка. Відносне видовження під час розривання ( $\varepsilon_p$ , %) розраховували за формулою:

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta l_p}{l_0} \cdot 100\%,$$

де  $\Delta l_p$  – зміна розрахункової довжини зразка в момент розриву, мм;  $l_0$  – початкова розрахункова довжина зразка, мм.

Показник міцності при розриві  $\sigma_{pp}$  у мегапаскалях (МПа) чи ньютонях на квадратний метр (Н/м<sup>2</sup>) визначають за співвідношенням

$$\sigma = \frac{F_{pp}}{A_0},$$

де  $F_{pp}$  — навантаження, за якого відбувається руйнування зразка,  $A_0$  - площа його початкового поперечного перерізу, мм<sup>2</sup>.

Іншими словами, величина міцності при розриві характеризує здатність матеріалу протистояти дії зовнішнього навантаження до моменту руйнування і є одним із ключових параметрів для оцінки механічних властивостей полімерних композицій.

### 2.3.6 Визначення щільності плівкових матеріалів та гідрогелів

Для визначення щільності гідрогелів та плівок методом гідростатичного зважування використовували аналітичні ваги Radwag AS 220.R2, оснащені модулем для вимірювання щільності.

Відповідно до вимог стандарту ISO 1183-1:2019 щільність плівкових матеріалів та гідрогелів визначали методом гідростатичного зважування, що ґрунтується на законі Архімеда та забезпечує точне встановлення об'єму твердого тіла шляхом його зважування у повітрі та в рідині. Для проведення вимірювань зразки плівкових матеріалів та гідрогелів спочатку важили у повітрі за допомогою аналітичних терезів, фіксуючи масу  $m_1$ . Потім його занурювали в рідину з відомою густиною - зазвичай дистильовану воду при температурі 23 °С - і визначали масу в рідині  $m_2$ . Під час експерименту забезпечували повне занурення зразка без утворення повітряних бульбашок на поверхні, а температура рідини контролювалася для дотримання умов стандарту. Густиною зразка обчислювали за формулою

$$\rho = \frac{m_1 \cdot \rho_{\text{рідини}}}{m_1 - m_2},$$

Де  $m_1$  - маса зразка у повітрі, г;  $m_2$  - маса зразка у рідині, г;  $\rho_{\text{рідини}}$  - густина рідини при заданій температурі, г/см<sup>3</sup>. Застосування методу гідростатичного зважування дає змогу з високою точністю визначати густиною полімерних

матеріалів і використовується для контролю їхньої якості та однорідності композицій.

### **2.3.7 Визначення вивільнення рослинних екстрактів спектрометричним методом**

Для визначення оптичної густини розчинів використовувався фотоелектроколориметр КФК - 2.

На першому етапі було проведено калібрування спектрофотометра для формування базового калібрувального графіка. При цьому налаштування приладу включали довжину хвилі 315 нм, чутливість 3, і використання кювет товщиною 1,065 мм. Калібрувальний графік базувався на вимірюванні оптичної густини чистої води та розчину натрій хлориду.

Для визначення вивільнення водного витягу кори дуба *Quercus cortex* будували калібрувальну криву. Для цього готували розчини з концентрацією водного витягу від 0,78 до 100 % та вимірювали оптичну густину при довжині хвилі 315 нм в кюветі 1,065 см. В результаті обробки даних отримано лінійну залежність  $C=0,5838 D + 0,0159$ ;  $R^2=0,9946$ , де  $C$  – концентрація водного витягу кори дуба,  $D$  – оптична густина. Оптичну густину проб після 24 годин інкубації визначали за рівнянням калібрувального графіка, що дозволяло визначити кількість водного витягу кори дуба, яка вивільнилася у середовище.

Отримані дані були використані для побудови графіків залежності оптичної густини від концентрації розчинених речовин, що дозволило оцінити ефективність вивільнення рослинних екстрактів у кожному з розчинів.

### **2.3.8 Визначення антибактеріальних властивостей**

У цьому контексті отримання посівного матеріалу стандартних штамів (*Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Escherichia coli* ATCC 25922, *Pseudomonas aeruginosa* PA01) забезпечує відтворюваність результатів і дозволяє моделювати реальні мікробіологічні умови порожнини рота. Визначення чутливості цих культур до екстракту кори дуба методом відновлення резазурину дає можливість оцінити антимікробний потенціал

біоактивної добавки у складі полімерних систем. Дослідження антиадгезивних властивостей за допомогою фарбування генціанвіолетом дозволяє встановити здатність екстракту запобігати утворенню біоплівки, що є ключовим чинником у профілактиці стоматологічних інфекцій.

Таким чином, наведені методичні підходи безпосередньо інтегруються у завдання дисертації, оскільки підтверджують можливість створення полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів комбінованої дії, які поєднують механічну міцність із антимікробними та антиадгезивними властивостями, що є перспективним напрямом сучасної стоматології.

#### **2.3.8.1 Отримання посівного матеріалу тест-культур**

Для оцінки антибактеріальної та антиадгезивної активності було використано стандартні штами *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Escherichia coli* ATCC 25922 та *Pseudomonas aeruginosa* PA01. Вказані культури походять з Української колекції мікроорганізмів Інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України. Їх культивували у середовищі Nutrient broth протягом 24 годин при температурі 37 °C з інтенсивністю перемішування 220 об/хв. Після інкубації проводили спектрофотометричний контроль, забезпечуючи, щоб оптична густина суспензії при довжині хвилі 600 нм перебувала у межах 0,2–0,6, що відповідало необхідній концентрації клітин. [142].

#### **2.3.8.2 Визначення чутливості тест-культур до екстракту кори дубу з використанням резазурину**

Антимікробну дію водного екстракту кори дуба оцінювали методом відновлення резазурину [142]. Для цього посівний матеріал тестових культур переносили у свіже середовище Nutrient broth (NB), до якого додавали різні концентрації екстракту. Контрольні зразки склалися з клітинної суспензії без додавання екстракту, а також зразків, де ріст культур перевіряли безпосередньо на самому екстракті.

Штами *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Escherichia coli* ATCC 25922 та *Pseudomonas aeruginosa* PA01 після вирощування у NB вносили у

96-лункові планшети (по 10 мкл суспензії у кожен лунку з 90 мкл середовища). Інкубацію проводили протягом 24 год при 37 °С. У трикратних повторях додавали екстракт кори дуба так, щоб кінцеві концентрації становили 1%, 5%, 10%, 20% та 50%. Після закриття планшетів їх витримували у термостаті за температури 37 °С ще 24 год.

Далі у кожен лунку вносили розчин резауринату натрію (20 мкМ, об'єм 100 мкл) та залишали у термостаті до 4 год при 37 °С. Життєздатність клітин визначали спектрофотометрично на мікропланшетному УФ-ридері НІРРО 96 (Biosan, Литва) за довжинами хвиль 570 нм та 620 нм. Отримані дані використовували для розрахунку відсоткового вмісту живих клітин у дослідних зразках відносно контролю.

### **2.3.8.3 Визначення впливу екстракту кори дуба на анти-адгезивні властивості тест-культур**

Вплив екстракту кори дуба на здатність бактерій до адгезії визначали за допомогою барвника генціанвіолет (Gentian Violet) [142]. Для цього суспензію тестових культур (*Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Escherichia coli* ATCC 25922, *Pseudomonas aeruginosa* PA01) у кількості 10 мкл вносили у 96-лункові планшети, що містили 90 мкл поживного середовища NB. До зразків додавали екстракт кори дуба, формуючи кінцеві концентрації 1%, 5%, 10%, 20% та 50%. Після закриття планшетів їх інкубували у термостаті при температурі 37 °С протягом 24 год.

Для фіксації та фарбування клітин, що прикріпилися до поверхні, у кожен лунку додавали по 100 мкл 0,02% розчину генціанвіолету, приготованого на деіонізованій воді. Після 30-хвилинної інкубації планшети промивали дистильованою водою. Екстракцію барвника здійснювали за допомогою 96% етанолу (по 100 мкл у кожен лунку), витримуючи 5–10 хв до повного вивільнення фарби. Оптичну густину отриманих зразків вимірювали при довжині хвилі 570 нм. Відсотковий рівень адгезованих клітин визначали відносно контрольних зразків, у які екстракт кори дуба не вносили.

## Висновок до розділу 2.

У другому розділі визначено об'єкти, вихідні матеріали та інструментальні методи досліджень, необхідні для створення й оцінки властивостей полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення комбінованої дії.

Як гідрофільні полімерні матриці обрано синтетичний полівініловий спирт (ПВС 16/1, ПВС 17-99) та полісахариди: картопляний крохмаль і карбоксиметилкрохмаль. Для надання матеріалам гемостатичних, в'язучих та протизапальних властивостей обрано рослинну сировину — листя кропиви дводомної *Urtica dioica* та кору дуба *Quercus cortex* ТМ «Ліктрави». Як нанорозмірний сорбент і структуроутворювач обґрунтовано застосування мінерального наповнювача — глини монтморилонітового типу марки М-5, Черкаське родовище.

Було розроблено методику приготування зразків плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення, що включала модифікацію композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК водними екстрактами біоактивних речовин, а також методику цільової обробки глини 0,025% розчином ПВС у співвідношенні 1:6 для її гомогенного диспергування в полімерних матрицях.

Визначено методики формування плівкових матеріалів методом аплікаційного поливу та гідрогелів – кріоструктуруванням при температурі – 15 °С. Для оцінювання комплексу властивостей розроблених матеріалів передбачено реологічні випробування вихідних розчинів із визначенням динамічної в'язкості та індексу течії, гравіметричне дослідження вологовмісту, десорбції та кінетики сорбції у воді й фізіологічному розчині, а також вимірювання щільності методом гідростатичного зважування. Фізико-механічні випробування дозволили визначити характер зміни границі міцності при розтязі та відносного видовження, тоді як спектрофотометричний контроль вивільнення екстрактів при довжині хвилі 315 нм забезпечив оцінку кінетики виходу екстракту кори дуба *Quercus cortex*.

Для верифікації біомедичної ефективності інтегровано мікробіологічні експрес-методики оцінки антимікробної дії та антиадгезивних властивостей щодо біоплівки із використанням еталонних тест-культур *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* та *Pseudomonas aeruginosa*. У межах даного розділу систематизовано стандартизовані методики випробувань, що забезпечують відтворюваність результатів.

Таким чином, проведена в межах другого розділу робота заклала методичну та матеріальну основу для подальших експериментальних досліджень, наведених у наступних розділах дисертації, спрямованих на встановлення закономірностей впливу рецептурних факторів на реологічну поведінку, механічну міцність та терапевтичні властивості розроблених плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення комбінованої дії.

## РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОЛІСАХАРИДІВ НА ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙ ПВС/КР ТА ПВС/КМК.

### 3.1 Реологічні властивості композицій ПВС/КМК

На рис. 3.1 та 3.2 наведено залежності в'язкості розчинів полімерної композиції на основі ПВС/КМК у співвідношеннях від 0/10 до 10/0 від градієнту швидкості зсуву [143].

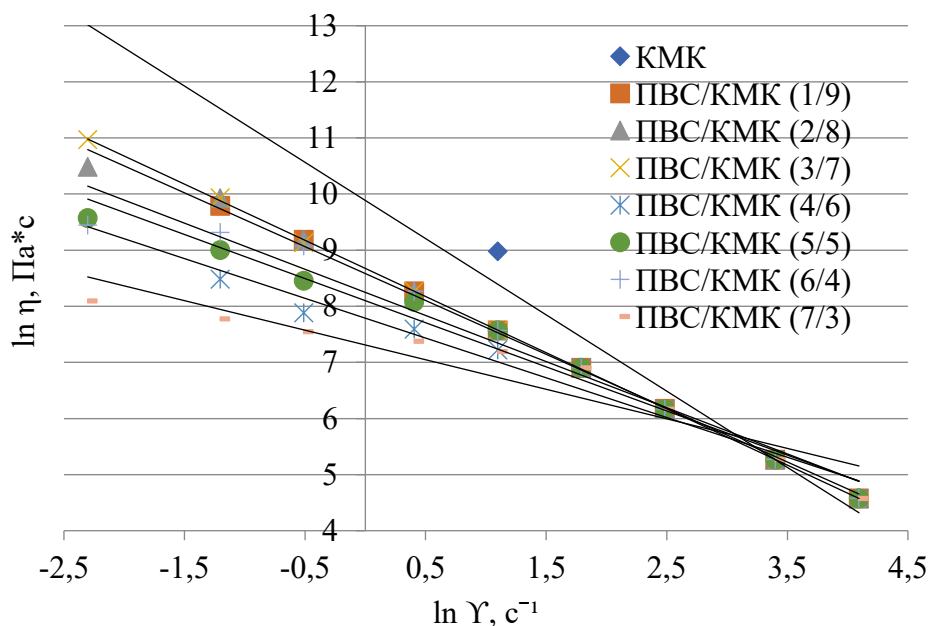


Рис. 3.1. Залежність в'язкості від швидкості зсуву розчинів полімерних композицій ПВС/КМК у співвідношенні від 0/10 до 7/3.

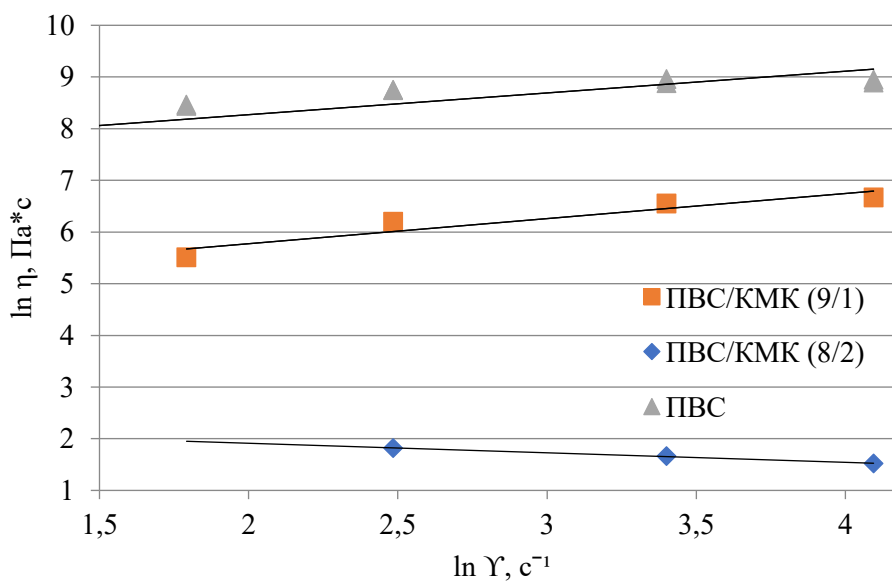


Рис. 3.2. Залежність в'язкості від швидкості зсуву розчинів полімерних композицій ПВС/КМК у співвідношенні від 8/2 до 10/0.

Як видно з рис. 3.1 зі збільшенням швидкості зсуву відбувається аномальне зниження в'язкості, як і для більшості полімерних систем. При чому кут нахилу ліній тренду залежності логарифму в'язкості від логарифму швидкості зсуву тим більший чим більше в системі вміст КМК. Усі криві мають негативний нахил, що свідчить про псевдопластичну поведінку системи. Найбільш виражене зниження спостерігається для композицій із високим вмістом КМК, тоді як для рівноважної системи ПВС/КМК 5/5 нахил менший, що вказує на більш стабільну структуру.

На рисунку 3.2 наведено залежність  $\ln \eta$  від  $\ln \dot{\gamma}$  для чистого ПВС та композицій ПВС/КМК 9/1 і 8/2. Для ПВС спостерігається зростання  $\ln \eta$  зі збільшенням  $\ln \dot{\gamma}$ , що відповідає дилатантній поведінці з індексом течії  $n > 1$ . Для ПВС/КМК 9/1 нахил кривої близький до нуля, що свідчить про перехідний характер між дилатантною та псевдопластичною поведінкою. Для ПВС/КМК 8/2 нахил негативний, що підтверджує псевдопластичність системи. Таким чином, рисунки демонструють поступовий перехід від дилатантної поведінки чистого ПВС до псевдопластичної поведінки композицій із високим вмістом КМК.

Отже, зі збільшенням частки КМК у системі відбувається зменшення індексу течії та перехід від дилатантної до псевдопластичної поведінки. Це свідчить про ключову роль співвідношення компонентів у формуванні реологічних властивостей. Композиції ПВС/КМК 5/5 та 8/2, забезпечують баланс між стабільністю та здатністю до деформації, що має практичне значення для створення матеріалів із заданими характеристиками.

В досліджуваному інтервалі швидкостей зсуву, в'язкість розчинів композиції на основі ПВС/КМК відповідає ступеневому закону та описується рівнянням Оствальда–де Вілла:  $\eta = K \dot{\gamma}^{n-1}$ , де  $K$  – коефіцієнт консистенції, що залежить як від природи матеріалу, так і від виду вимірювальної апаратури, та  $n$  – індекс течії.

За рівняннями ліній тренду в роботі було визначено константи  $K$  та  $n$  рівняння Оствальда–де Вілла для розчинів ПВС, КМК та їх композицій з

різним співвідношенням компонентів. Встановлено, що при зростанні частки ПВС в полімерній композиції ПВС/КМК індекс течії розчину  $n$  зростає порівняно з чистими КМК, це, ймовірно, пов'язане зі зниженням структурованості системи. У таблиці 3.1 наведені значення констант рівняння Оствальда–де Вілла, отримані методом лінійної регресії.

Таблиця 3.1.

Розрахункові значення констант  $K$  та  $n$  рівняння Оствальда–де Вілл для композицій полімерних композицій ПВС/КМК

Композиція ПВС	Рівняння лінії тренду	$R^2$	$n$	$K$
ПВС	$y = 0,4204x + 7,4299$	0,7508	0,5796	7,4299
ПВС/КМК (9/1)	$y = -0,9913x + 8,6508$	0,9998	1,9913	8,6508
ПВС/ КМК (8/2)	$y = -0,9595x + 8,5828$	0,9953	1,9595	8,5828
ПВС/ КМК (7/3)	$y = -1,0015x + 8,675$	0,9998	2,0015	8,675
ПВС/ КМК (6/4)	$y = -0,7863x + 8,1001$	0,9792	1,7863	8,1001
ПВС/ КМК (5/5)	$y = -0,8225x + 8,2477$	0,9623	1,8225	8,2477
ПВС/ КМК (4/6)	$y = -0,7081x + 7,7876$	0,9659	1,7081	7,7876
ПВС/ КМК (3/7)	$y = -0,5267x + 7,3103$	0,8932	1,5267	7,3103
ПВС/ КМК (2/8)	$y = -0,1844x + 2,2812$	0,9977	1,1844	2,2812
ПВС/ КМК (1/9)	$y = 0,486x + 4,8017$	0,8927	0,5140	4,8017
КМК	$y = 0,7438x + 3,2731$	0,9347	0,2562	3,2731

Для чистого ПВС індекс течії становить  $n=0,5796$ . Для композицій ПВС/КМК 9/1 та 8/2 значення індексу течії зменшуються до  $n=1,99$  та  $n=1,96$ , що вказує на зниження дилатантності. Подальше збільшення частки КМК призводить до поступового зменшення  $n$  для композицій ПВС/КМК 6/4  $n=1,79$ , для ПВС/КМК 4/6  $n =1,71$ , для ПВС/КМК 2/8  $n=1,18$ . Найнижчі значення індексу течії отримані для ПВС/КМК 1/9  $n=0,51$  та чистого КМК  $n=0,26$ , що відповідає класичній псевдопластичній поведінці.

Отримані числові параметри підтверджують, що зі збільшенням частки КМК відбувається поступове зменшення індексу течії та коефіцієнта

консистенції, що свідчить про перехід від дилатантної до псевдопластичної поведінки. Це дозволяє кількісно описати реологічні властивості системи та визначити оптимальні співвідношення компонентів для практичного використання.

### 3.2 Визначення сорбційної здатності гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК

В роботі були створені гідрогелі на основі 10% ПВС та 10% крохмалю у співвідношеннях від 1/9 до 10/0. Зразки, які містять чистий крохмаль не утворили гідрогелевий матеріал. Композиції на основі ПВС/КМК, які містять 2/8-0/10 КМК не утворили криогелів, які б зберігали свою форму. Тому придатними для подальших досліджень були зразки із співвідношенням ПВС/КМК 3/7 – 10/0.

Відомо, що для композицій ПВС/Кр при заморожуванні відбувається кристалізація крохмалю, а при розморожуванні – ПВС (рис. 3.3).

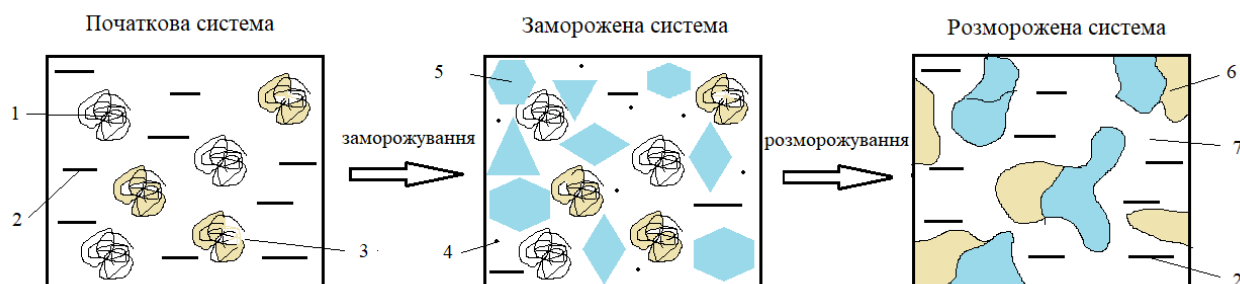
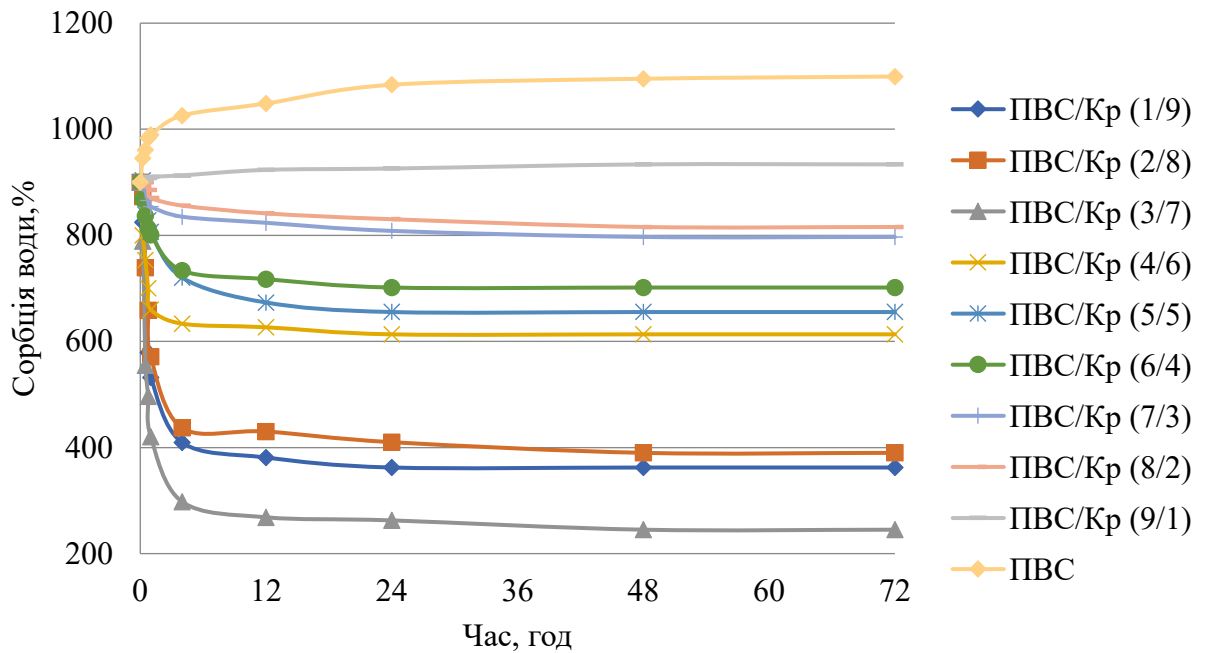


Рис. 3.3. Загальна схема гелеутворення композиції ПВС/Кр в криоумовах. 1 – глобули молекул ПВС; 2 – розчинник; 3 – молекули крохмалю; 4 – незамерзла рідка мікрофаза; 5 – полікристали замерзлого розчинника; 6 – полімерна сітка гідрогелю на основі ПВС та крохмалю; 7 – макропори

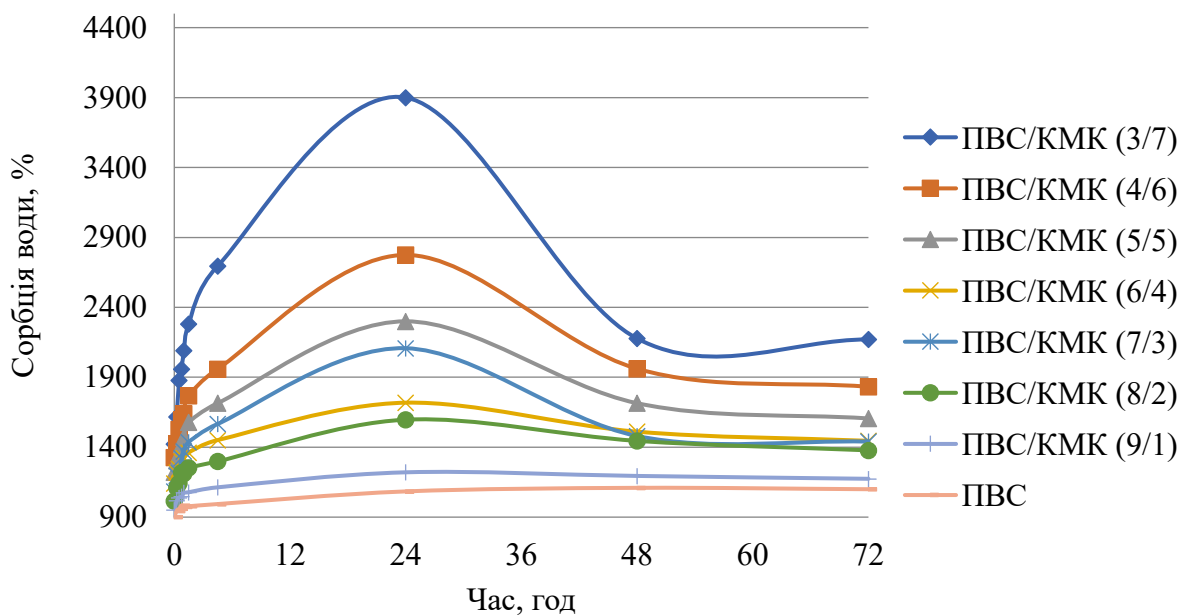
Таким чином, утворюється трикомпонентний гідрогель, який має у своїй структурі компоненти фізично зшитих гідрогелів ПВС та крохмалю.

В роботі було досліджено сорбційні властивості гідрогелів на основі ПВС/Кр у співвідношенні від 1/9 до 10/0 (рис.3.4 а) та гідрогелів на основі ПВС/КМК 3/7 – 10/0 (рис.3.4 б). Всі зразки піддавали дослідженню шляхом

занурення у дистильовану воду. Розрахунок сорбційної здатності проводили гравіметричним методом.



а)



б)

Рис. 3.4. Сорбція дистильованої води для зразків гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр (а) та ПВС/КМК (б)

Аналізуючи представлені графіки сорбції дистильованої води для зразків гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, можна

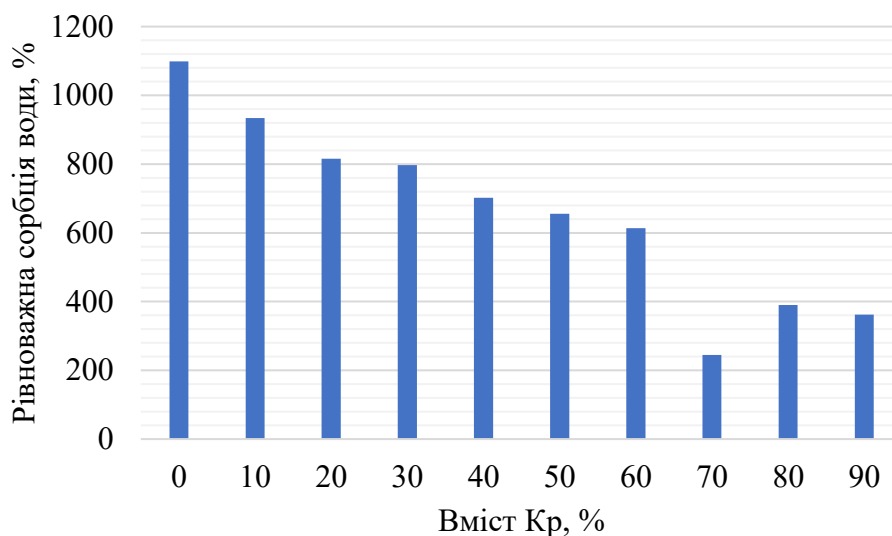
відзначити суттєві відмінності у водопоглинальних властивостях цих систем. Для композицій ПВС/Кр характерна помірна сорбція, яка стабілізується на рівні близько 1000–1100% для чистого ПВС, тоді як суміші з крохмалем демонструють нижчі значення, що свідчить про обмежену здатність до набухання. Це пояснюється меншою кількістю гідрофільних функціональних груп у структурі крохмалю, які беруть участь у водневих та іонних взаємодіях з молекулами води. Натомість композиції ПВС/КМК характеризуються значно вищою сорбцією, яка у випадку співвідношення 3/7 сягає понад 4000%, що свідчить про інтенсивне набухання та високу гідрофільність системи. Такий ефект зумовлений наявністю карбоксильних груп у КМК, які забезпечують додаткові центри зв'язування води та формування розгалуженої гідратованої структури. Подальше перебування гідрогелів у воді призводить до поступового зменшення ваги зразків, що можливо пов'язано з вимиванням водорозчинного КМК. Після 48 годин втрата ваги практично припиняється і встановлюється рівновага.

Для обох систем основне поглинання води відбувається протягом перших 24 годин, після чого процес наближається до рівноважного стану. Проте у випадку ПВС/КМК спостерігається більш виражене зростання сорбції з досягненням пікових значень, що вказує на здатність цих гідрогелів утримувати значно більшу кількість рідини.

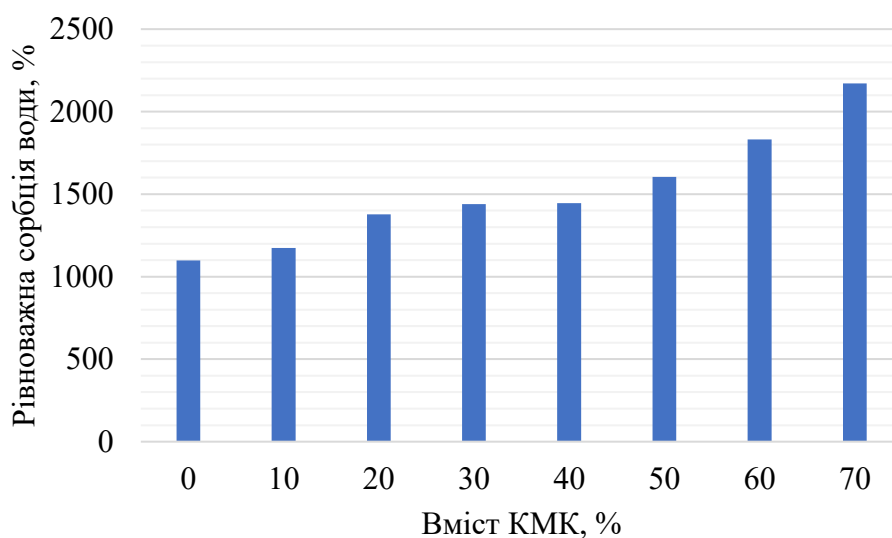
Таким чином, можна зробити висновок, що модифікація ПВС крохмалем незначно впливає на водопоглинальні властивості, тоді як використання карбоксиметилкрохмалю суттєво підвищує сорбційну здатність гідрогелів, що відкриває перспективи їх застосування у біомедичних технологіях, де важливим є контроль вологоутримання та біосумісність матеріалів.

Для всіх зразків на основі ПВС/Кр у співвідношенні від 1/9 до 10/0 різка зміна сорбції води спостерігалася перші 12 годин, а рівноважне значення встановилося через 17 годин.

На рис. 3.5. наведено гістограму рівноважного значення сорбції дистильованої води для зразків гідрогелів на основі ПВС/Кр в залежності від вмісту ПВС.



a)



б)

Рис. 3.5. – Рівноважна сорбція дистильованої води гідрогелями на основі композицій ПВС/Кр (а) та ПВС/КМК (б) в залежності від вмісту полісахариду у гідрогелі

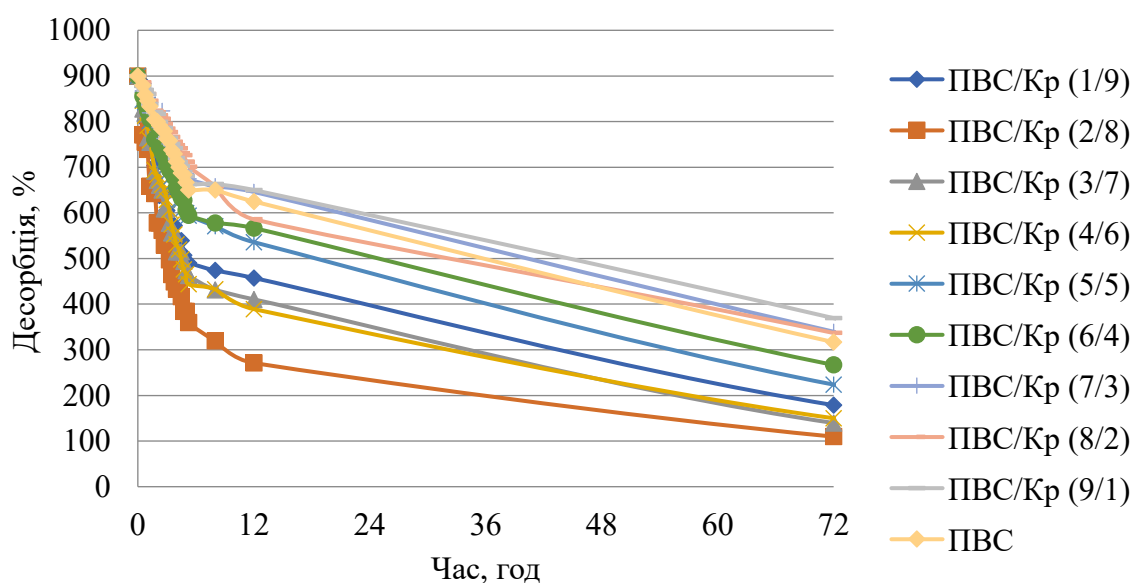
Аналіз наведених експериментальних даних із залученням кількісних показників дозволяє зробити більш аргументовані висновки щодо впливу вмісту полісахаридів на рівноважну сорбцію дистильованої води гідрогелями.

Для системи ПВС/Кр при нульовому вмісті крохмалю сорбція становить близько 1100%, однак зі збільшенням його концентрації до 30% вона знижується до приблизно 797%, а при 90% — до рівня близько 362%. Така динаміка свідчить про майже трикратне зменшення водоутримувальної здатності, що підтверджує ущільнення структури та зменшення кількості доступних гідрофільних центрів у полімерній матриці.

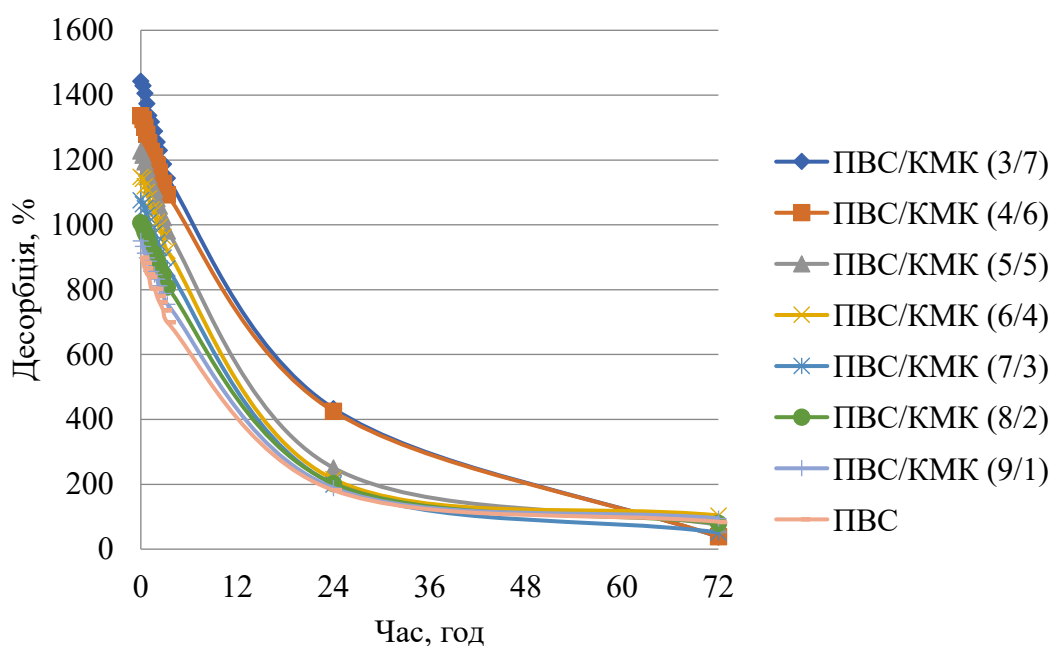
У випадку системи ПВС/КМК спостерігається протилежна тенденція, при 30% вмісту КМК рівноважна сорбція сягає приблизно 1440%, а при 70% — понад 2170%. Це означає майже двократне зростання водоутримувальної здатності, що пояснюється наявністю карбоксильних груп у структурі КМК, які активно взаємодіють з молекулами води та формують більш розгалужену гідрофільну мережу. Таким чином, введення КМК у композицію з ПВС є ефективним способом підвищення сорбційних властивостей гідрогелів.

### 3.3 Визначення десорбційної здатності гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК

З метою оцінки кінетики втрати вологи гідрогелями на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, було проведено дослідження з висушування зразків. Отримані дані про залежність масової частки води в гідрогелі від часу висушування наведено на рисунку 3.6.



a)



б)

Рис. 3.6. Десорбція зразків гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр (а) та ПВС/КМК (б)

Аналіз кривих десорбції гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК із кількісними характеристиками дозволяє чітко простежити залежність кінетики дегідратації від співвідношення компонентів. Для системи ПВС/Кр при складі 1/9 початкове значення десорбції становить близько 900%, протягом 72 годин воно знижується до 250%. Збільшення частки ПВС у системі призводить до зменшення швидкості дегідратації майже у 3–4 рази порівняно з композиціями з високим вмістом крохмалю.

Зменшення кількості вологи відносно до її початкового значення у гідрогелях становили від 2 до 6,5 разів. Найбільшу втрату вологи зазнають зразки з співвідношенням ПВС/Кр 3/7 та 4/6.

Отже, для стоматології гідрогелі ПВС/Кр можуть бути корисними у випадках, коли необхідне короткочасне зволоження або створення тимчасового бар'єру, однак їхня швидка дегідратація та нижча залишкова вологість обмежують застосування у довготривалих аплікаціях.

Для зразків на основі композиції ПВС/КМК у співвідношенні 3/7 та 4/6 характерно найбільша кількість початкової вологи, що становить 1444% та

1337% та найменше значення залишкової 38% для обох зразків. Волога за 72 години для цих криогелей зменшується у 38 та 34 рази відповідно. Для зразків із вмістом ПВС 6, 9 та 10 частин залишкова волога через 72 години становить 104%, 95% та 84,5% відповідно. Тобто гідрогелі із співвідношенням ПВС/КМК 6/4 мають найбільшу залишкову вологу, яка менша у порівнянні з початковою в 11 разів. Отже зразок, який містить 6 частин ПВС та 4 частини КМК буде повільніше висихати при експлуатації на відкритій площині, разом з цим дані зразки мають високу початкову вологість. Така властивість є надзвичайно важливою для стоматології, адже матеріал, який повільно висихає, забезпечує тривале зволоження слизової оболонки, створює оптимальні умови для регенерації тканин та може слугувати ефективною матрицею для контрольованого вивільнення лікарських препаратів.

Таким чином, гідрогелі ПВС/КМК у співвідношенні 3/7 та 4/6 доцільно застосовувати у випадках, коли потрібна швидка дія та інтенсивне початкове зволоження, тоді як композиція 6/4 є більш перспективною для довготривалих стоматологічних аплікацій, що потребують стабільного утримання вологи та поступового вивільнення біоактивних речовин.

### **3.4 Визначення фізико-механічних властивостей гідрогелів на основі композицій ПВС/КМК**

Експлуатаційна цінність гідрогелевих матеріалів у стоматології визначається не лише їхньою сорбційною активністю, а й фізико-механічними характеристиками, які забезпечують стабільність та довговічність при контакті зі слизовою оболонкою ротової порожнини. До ключових параметрів належать твердість, еластичність та міцність, адже саме вони визначають здатність матеріалу витримувати механічні навантаження під час жування, артикуляції та інших функціональних процесів.

На рис. 3.7 наведено залежність величини навантаження при розриві від вмісту КМК у композиції гідрогелів ПВС/КМК.

При вмісті КМК у межах 20–40% навантаження при розриві залишається майже незмінним і становить близько 1 Н, що свідчить про недостатню

міцність матеріалу для практичного використання. Подальше збільшення концентрації КМК до 50% призводить до невеликого зниження показника до рівня приблизно 0,8 Н, що підтверджує нестабільність структури у цьому діапазоні. Однак при вмісті КМК 60% спостерігається різке зростання навантаження при розриві до 6 Н, тобто майже у 6–7 разів порівняно з попередніми значеннями. Це свідчить про формування більш щільної та міцної полімерної мережі, яка здатна витримувати значні механічні навантаження.

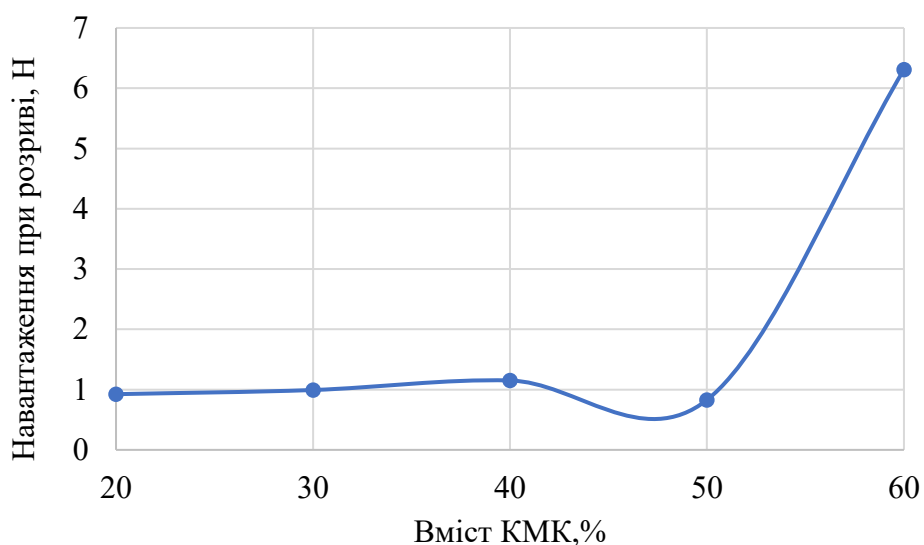


Рис. 3.7. Залежність величини навантаження при розриві від вмісту КМК у композиції гідрогелів ПВС/КМК

Отримані результати демонструють, що оптимальним для забезпечення високої міцності є підвищений вміст КМК у композиції, тоді як низькі концентрації не забезпечують достатньої стійкості. Така залежність має практичне значення для стоматології, адже матеріали з високим навантаженням при розриві здатні зберігати цілісність під час експлуатації у ротовій порожнині, де вони піддаються механічному впливу (жування, тиск язика, рухи губ).

Так як гідрогелі є еластичними, то, для встановлення експлуатаційних характеристик, необхідно визначити відносне подовження при розриві. Якщо зразок розірвався без видовження, тобто відразу, як тільки приклали зусилля

значення відносного видовження відсутнє, як, наприклад для зразка ПВС/КМК 9/1. На рис. 3.8 наведено залежність відносного видовження від вмісту КМК у композиції гідрогелів із співвідношенням ПВС/КМК від 4/6 до 8/2.

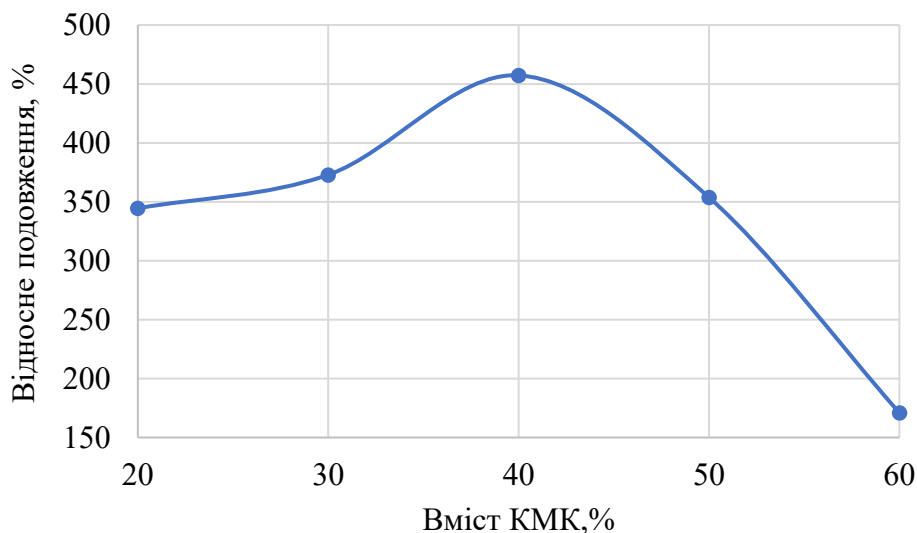


Рис. 3.8. Залежність відносного подовження від вмісту КМК у композиції гідрогелів ПВС/КМК

При вмісті КМК 20% відносне подовження становить близько 350%, що свідчить про помірну еластичність. Зі збільшенням концентрації КМК до 40% показник зростає до максимального значення приблизно 450%, тобто майже у 1,3 раза порівняно з початковим рівнем. Це свідчить про оптимальне співвідношення компонентів, яке забезпечує найбільшу гнучкість та здатність матеріалу витримувати значні деформації без руйнування. Подальше збільшення вмісту КМК до 60% призводить до різкого зниження відносного подовження до рівня близько 200%, що означає втрату еластичності та підвищену крихкість структури.

Таким чином, найбільш перспективним для практичного застосування, зокрема у стоматології, є діапазон концентрацій КМК близько 40%, коли матеріал поєднує високу еластичність із достатньою міцністю. Це дозволяє використовувати такі гідрогелі як аплікаційні покриття або матриці, здатні

адаптуватися до складної геометрії ротової порожнини та витримувати механічні навантаження без втрати цілісності.

Границя, або межа міцності є пороговою величиною статичного механічного напруження, після перевищення якого це механічне напруження зруйнує якесь тіло з конкретного матеріалу, в нашому випадку криогелі на основі ПВС/КМК у співвідношенні від 4/6 до 9/1. На рис. 3.9 наведена залежність межі міцності від частки ПВС для композицій гідрогелів ПВС/КМК.

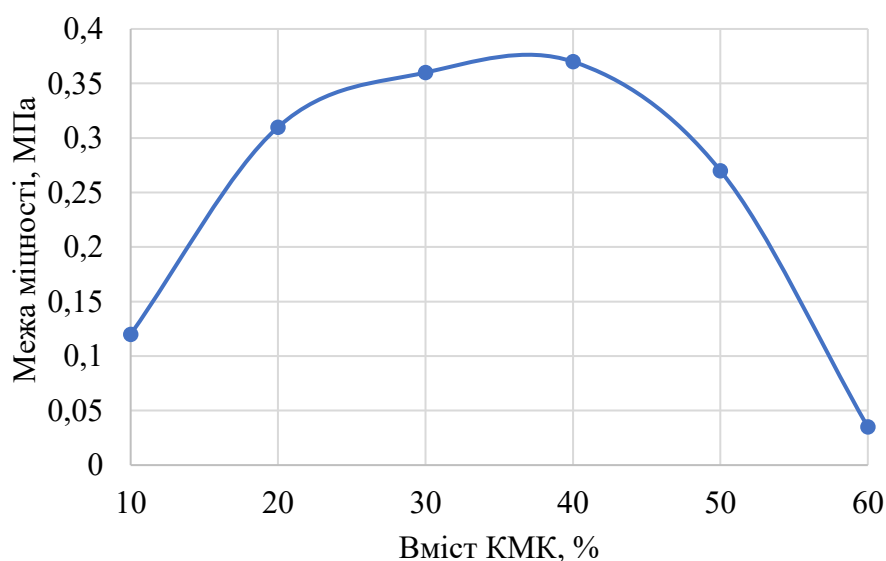


Рис. 3.9. Залежність межі міцності від вмісту КМК для композицій гідрогелів на основі ПВС/КМК

Як видно з графіка крива залежності межі міцності від вмісту КМК в композиції гідрогелів на основі ПВС/КМК має схожий до логарифмічно-нормального розподілу з максимальними значеннями в інтервалі 0,31 – 0,37 МПа для гідрогелів, які містять 30-50% КМК. Зразки з вмістом КМК 10, 20, 60% мають відносно невисоку межу міцності від 0,035 до 0,11 МПа. Отже гідрогелі із співвідношенням ПВС/КМК 5/5, 6/4, 7/3 мають достатню міцність і можуть бути рекомендовані для використання у біомедичній галузі.

Отже встановлено, що зі збільшенням вмісту КМК розривне навантаження зростає з 0,92 до 6,31 Н, а відносне подовження максимальне

457% в композиції при співвідношенні ПВС/КМК 6/4. Подальше збільшення вмісту КМК призводить до зменшення відносного подовження гідрогелів.

### **Висновки до розділу 3**

Встановлено, що реологічні властивості композицій ПВС/КМК суттєво залежать від співвідношення компонентів. Для чистого ПВС індекс течії становить  $n=2,36$ , що відповідає дилатантній поведінці, тоді як для чистого КМК він знижується до  $n=0,26$ , що підтверджує псевдопластичність. Коефіцієнт консистенції  $K$  також зменшується від 9,89 для ПВС до 3,27 для КМК, що свідчить про зниження структурної стійкості системи. Оптимальні значення індексу течії спостерігаються для композицій 5/5  $n=1,82$  та 6/4  $n=1,79$ , які забезпечують баланс між стабільністю та здатністю до деформації.

Сорбційні властивості показали, що гідрогелі ПВС/Кр мають помірну водопоглинальну здатність — від 1100% для чистого ПВС до 362% при 90% крохмалю. Натомість композиції ПВС/КМК демонструють значно вищі показники: при співвідношенні 3/7 сорбція сягає понад 4000%, а при 70% КМК рівноважне значення становить понад 2170%. Це пояснюється наявністю карбоксильних груп у КМК, які забезпечують додаткові центри зв'язування води.

Десорбційні дослідження підтвердили, що гідрогелі ПВС/Кр швидко втрачають вологу при складі 1/9 вона зменшується з 900% до 250% за 72 години. Для композицій ПВС/КМК початкове значення становить 1444% 3/7 та 1337% 4/6, а залишкова волога після 72 годин — лише 38%. Найбільш перспективною для тривалих стоматологічних аплікацій є композиція 6/4, яка утримує 104% залишкової вологи, що у 11 разів менше від початкової, але забезпечує повільне висихання.

Фізико-механічні властивості показали, що при вмісті КМК 60% навантаження при розриві зростає до 6 Н, тоді як при 20–40% воно становить лише  $\sim 1$  Н. Максимальне відносне подовження  $\sim 450\%$  спостерігається при 40% КМК, після чого воно різко знижується до 200% при 60% КМК. Межа

міцності сягає 0,31–0,37 МПа для композицій із 30–50% КМК, що підтверджує їхню придатність для біомедичного застосування.

Таким чином, результати розділу 3 підтверджують, що введення КМК у композицію з ПВС є ефективним способом регулювання реологічних, сорбційних та механічних властивостей гідрогелів. Оптимальні співвідношення компонентів ПВС/КМК 5/5, 6/4, 7/3 забезпечують баланс між стабільністю, еластичністю та здатністю до утримання вологи, що визначає перспективність їхнього використання у стоматології як матеріалів комбінованої дії для тривалого зволоження слизової оболонки, регенерації тканин та контрольованого вивільнення біоактивних речовин.

## РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЛИНИ МОНТМОРИЛОНІТОВОГО ТИПУ НА ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ГІДРОГЕЛІВ ПВС/КМК.

### 4.1 Реологічні властивості композицій ПВС/КМК з додаванням глини монтморилонітового типу

В роботі було досліджено вплив кількості глини як наповнювача, для створення гібридних гідрогелів. Утворення гібридних гідрогелів на основі ПВС/КМК:Глина відбувається кріоструктуруванням, при заморожуванні кристалізується КМК, а при розморожуванні – ПВС (рис. 4.1).

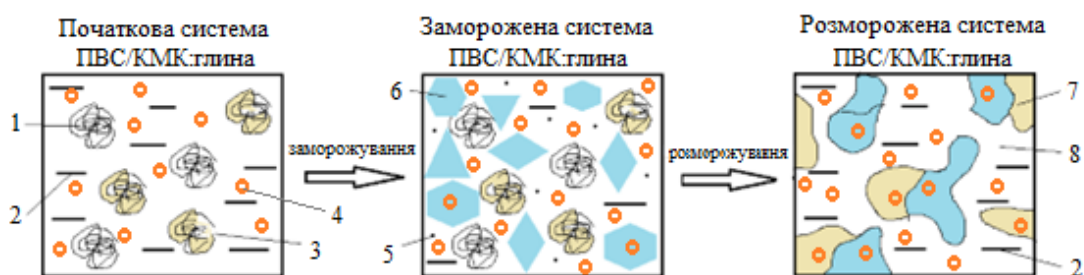


Рис. 4.1. Загальна схема гелеутворення композиції ПВС/КМК : глина в кріоумовах. 1 –глобули молекул ПВС; 2 – розчинник (вода); 3 – молекули КМК; 4 – частинки глини монтморилонітового типу; 5 – незамерзла рідка мікрофаза; 6 – полікристали замерзлого розчинника; 7 – полімерна сітка гідрогелю на основі ПВС та КМК; 8 – макропори

Встановлено, що композиції з вмістом глиняної компоненти вище 8 об'ємних частин не утворюють стійкої структури гідрогелевого матеріалу, тобто недостатня кількість структуруючої полімерної матриці та частинки порошкового наповнювача, очевидно перешкоджають утворенню гідрогелевого матеріалу. Такі зразки легко руйнувалися, навіть при незначних навантаженнях, тому їх сорбційні властивості не досліджувалися. Зразки, з наповненням глиною до 8 об'ємних частин включно, мали достатню міцність.

Регулювати реологічні характеристики гібридних матеріалів можливо шляхом зміни концентрацій їхніх складових. У дослідженні було проаналізовано вплив співвідношення полімерної матриці та мінерального

наповнювача на в'язкість системи. Крім складу, на реологічну поведінку впливають гідрофільність та температура. В'язкість високомолекулярних сполук значно відрізняється від низькомолекулярних, оскільки визначається не лише молекулярною масою, а й просторовою конфігурацією макромолекул та їх взаємодіями [138].

Полімери, їхні розчини, суспензії та гелі зазвичай демонструють неньютонівську поведінку, тобто їхня в'язкість змінюється залежно від умов деформації (швидкості зсуву, температури тощо), на відміну від неньютонівських рідин, де вона є сталою.

На рисунку 4.2 наведено реологічні криві для водних розчинів ПВС, КМК та монтморилонітової глини, попередньо обробленої 0,025% розчином ПВС у співвідношенні 1:6. Характер залежностей свідчить про зниження в'язкості зі збільшенням градієнта швидкості, що є типовим для високомолекулярних систем. При цьому поведінка ПВС найбільш наближена до властивостей неньютонівських рідин.

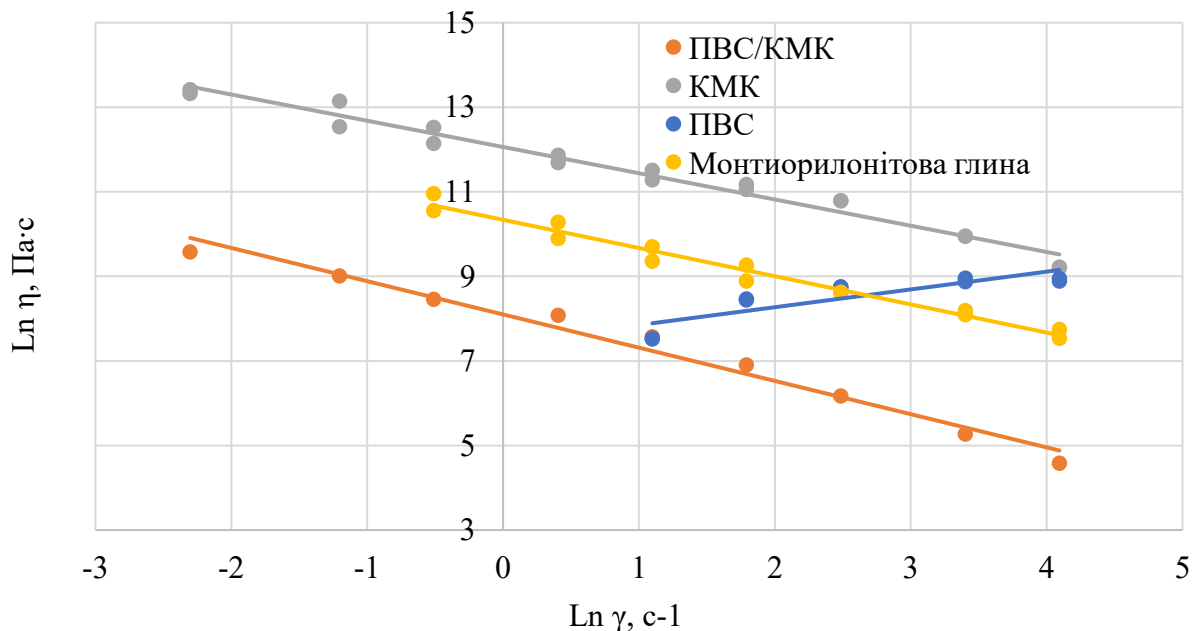


Рис. 4.2. Залежність в'язкості від градієнта швидкості для композиції ПВС/КМК у співвідношенні 1/1, монтморилонітової глини, обробленої 2,5% розчином ПВС

Всі досліджувані системи — ПВС, КМК та монтморилонітова глина, модифікована розчином ПВС — демонструють зниження в'язкості зі

збільшенням градієнта швидкості зсуву, що є типовим для високомолекулярних полімерних систем із неньютонівською поведінкою. Для чистого ПВС індекс течії становить близько  $n=0,5796$ , а для КМК він зменшується до  $n=0,26$ , що підтверджує псевдопластичність. Композиція ПВС/КМК у співвідношенні 1/1 характеризується значеннями індексу течії  $n=1,8225$ . Монтморилонітова глина, оброблена розчином ПВС, демонструє криву з негативним нахилом, що вказує на псевдопластичну поведінку.

Таким чином, результати свідчать, що використання монтморилонітової глини, модифікованої ПВС, дозволить отримати систему з прогнозованою псевдопластичною поведінкою, що розширює можливості її застосування як наповнювача у стоматологічних матеріалах комбінованої дії. Це підтверджує, що регулювання співвідношення компонентів та введення мінеральних модифікаторів є ефективним способом керування реологічними властивостями полімерних композицій для практичного використання.

В'язкість гідрогелевої композиції на основі ПВС/КМК описується степеневим законом, що формалізується рівнянням Оствальда–де Вілля:

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

У дослідженні було проаналізовано вплив концентрації мінерального наповнювача на зміну реологічних характеристик полімерної композиції. На рисунку 4.3 наведено залежності в'язкості гідрогелевої системи від вмісту наповнювача у межах від 1 до 7 об'ємних частин.

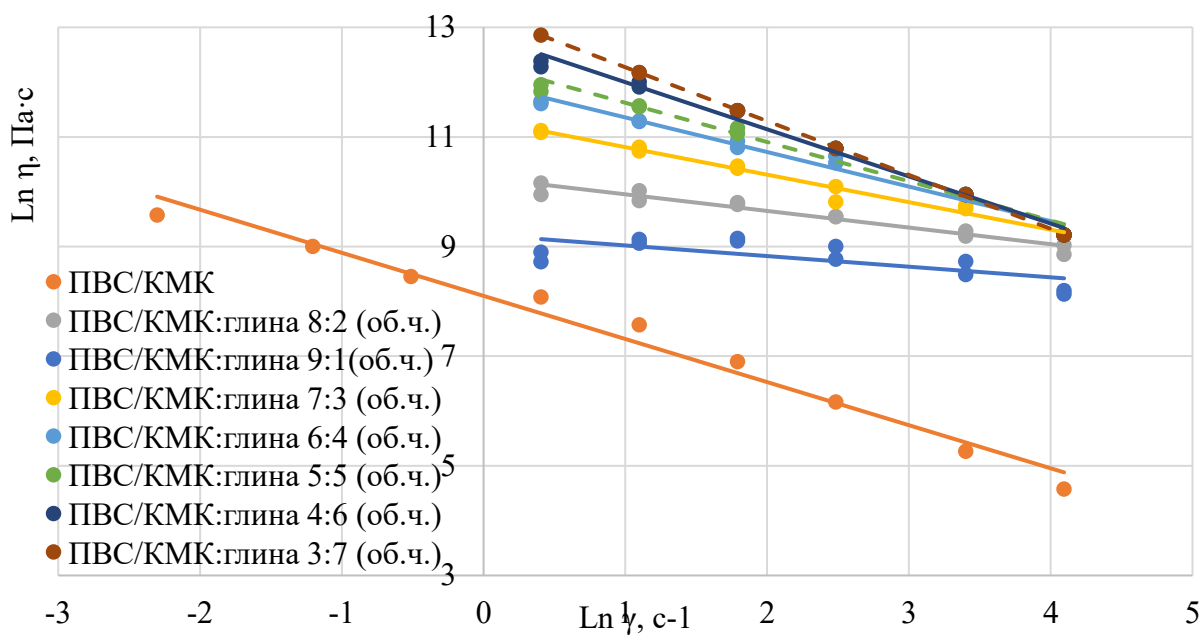


Рис. 4.3. Залежність в'язкості композиції ПВС/КМК від вмісту монтморилонітової глини.

Отримані результати підтверджують, що збільшення кількості мінерального компонента призводить до зміни індексу течії та константи консистенції, що дозволяє цілеспрямовано регулювати реологічні властивості матеріалу для оптимізації його технологічної обробки.

Таким чином, застосування рівняння Оствальда–де Вілля забезпечує кількісний опис поведінки гідрогелевих композицій на основі ПВС/КМК та створює основу для прогнозування технологічних процесів у виробництві стоматологічних матеріалів комбінованої дії.

У таблиці 4.1. наведені значення констант  $K$  та  $n$  для рівняння, що описує розчини ПВС, КМК, монтморилонітової глини, обробленої 0,025% розчином ПВС, та композицій на основі ПВС/КМК у співвідношенні 1/1 з додаванням монтморилонітової глини від 1 до 7 об'ємних частин.

Таблиця 4.1.

Розрахункові значення констант  $K$  та  $n$  рівняння Оствальда–де Вілля для розчинів ПВС, КМК та ПВС/КМК з додаванням монтморилонітової глини, обробленої 0,025% розчином ПВС.

Композиція ПВС	Рівняння лінії тренду	$R^2$	$n$	$K$
ПВС	$y = 0,4204x + 7,4299$	0,7508	0,5796	7,4299
КМК	$y = -0,6208x + 12,06$	0,9746	1,06208	12,06

ПВС/КМК	$y = -0,8225x + 8,2477$	0,9623	1,8225	8,2477
Монтморилонітова глина, оброблена 2,5%-вим розчином ПВС	$y = -0,667x + 10,339$	0,975	1,667	10,339
ПВС/КМК:глина 9:1(об.ч.)	$y = -0,1938x + 9,2142$	0,7775	1,1938	9,2142
ПВС/КМК:глина 8:2(об.ч.)	$y = -0,3032x + 10,256$	0,9494	1,3032	10,256
ПВС/КМК:глина 7:3(об.ч.)	$y = -0,5019x + 11,316$	0,979	1,5019	11,316
ПВС/КМК:глина 6:4(об.ч.)	$y = -0,6308x + 11,986$	0,976	1,6308	11,986
ПВС/КМК:глина 5:5(об.ч.)	$y = -0,7158x + 12,338$	0,9749	1,7158	12,338
ПВС/КМК:глина 4:6(об.ч.)	$y = -0,8597x + 12,858$	0,9881	1,8597	12,858
ПВС/КМК:глина 3:7(об.ч.)	$y = -0,9821x + 13,253$	0,9997	1,9821	13,253

Встановлено, що ПВС проявляє виражену псевдопластичність, тоді як КМК характеризується майже ньютонівською поведінкою при високому коефіцієнті консистенції. Композиція ПВС/КМК демонструє перехід до дилатантного режиму, що свідчить про формування більш жорсткої структурної сітки.

Додавання монтморилонітової глини, модифікованої ПВС, призводить до поступового зростання показника течії  $n$  від 1,19 до 1,98. Це вказує на посилення дилатантних властивостей і підвищення в'язкості системи зі збільшенням вмісту глини. Найбільш структуровані композиції спостерігаються при співвідношенні ПВС/КМК:глина 3:7, де параметри наближаються до  $n \approx 2$  та  $K > 13$ .

Таким чином, монтморилонітова глина, оброблена ПВС, виступає ефективним реологічним модифікатором, що забезпечує перехід від псевдопластичної до дилатантної поведінки та сприяє підвищенню структурованості полімерних систем. Отримані результати підтверджують перспективність використання таких композицій у створенні матеріалів із

регульованими реологічними характеристиками для технологічних та прикладних застосувань

На рисунку 4.4 наведено залежність константи індексу течії  $n$  від вмісту монтморилонітової глини, обробленої 0,025% -вим розчином ПВС.

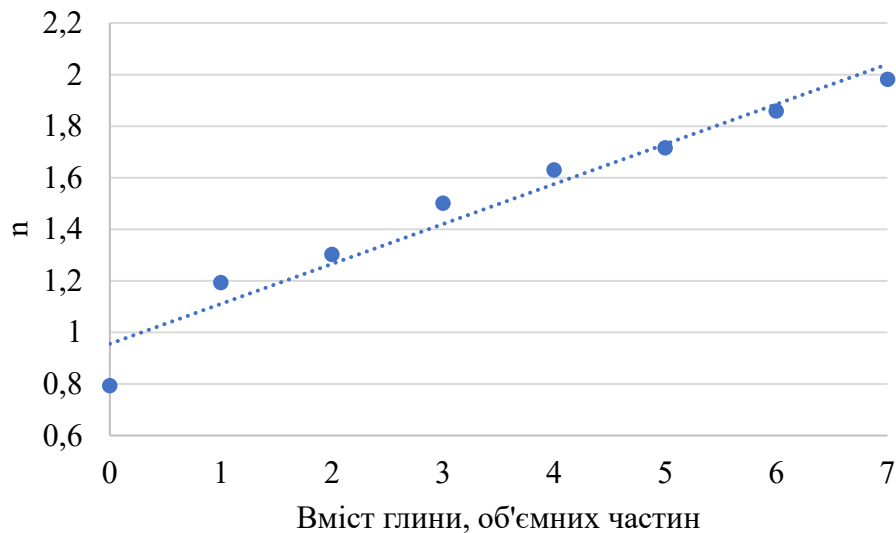


Рис.4.4. Залежність константи індексу течії  $n$  від вмісту монтморилонітової глини, обробленої 0,025% -вим розчином ПВС.

Зі збільшенням частки монтморилонітової глини у композиції спостерігається поступове зростання індексу течії. Це означає, що введення глини змінює реологічний режим системи, оскільки значення  $n$  перевищує одиницю. Така тенденція свідчить про перехід до дилатантної поведінки. Підвищення показника  $n$  може бути інтерпретоване як ознака зниження впорядкованості внутрішньої структури полімерної композиції при модифікації її мінеральним наповнювачем.

#### 4.2 Вологовміст гідрогелів на основі композицій ПВС/КМК з додаванням глини монтморилонітового типу

Зі збільшенням концентрації монтморилонітової глини у складі гідрогелів спостерігається поступове зменшення їхньої вологості — від 1150% до 670%. Для зразків із мінімальним вмістом глини (1 об'ємна частина) після 72 годин експозиції у водному середовищі рівень вологості знижується

приблизно на 27%. При введенні глини у кількості від 2 до 8 об'ємних частин втрата води становить 50–65% від початкового значення. Найбільш інтенсивне зневоднення зафіксовано для композицій із вмістом глини на рівні 5 об'ємних частин (див. рис. 4.5).

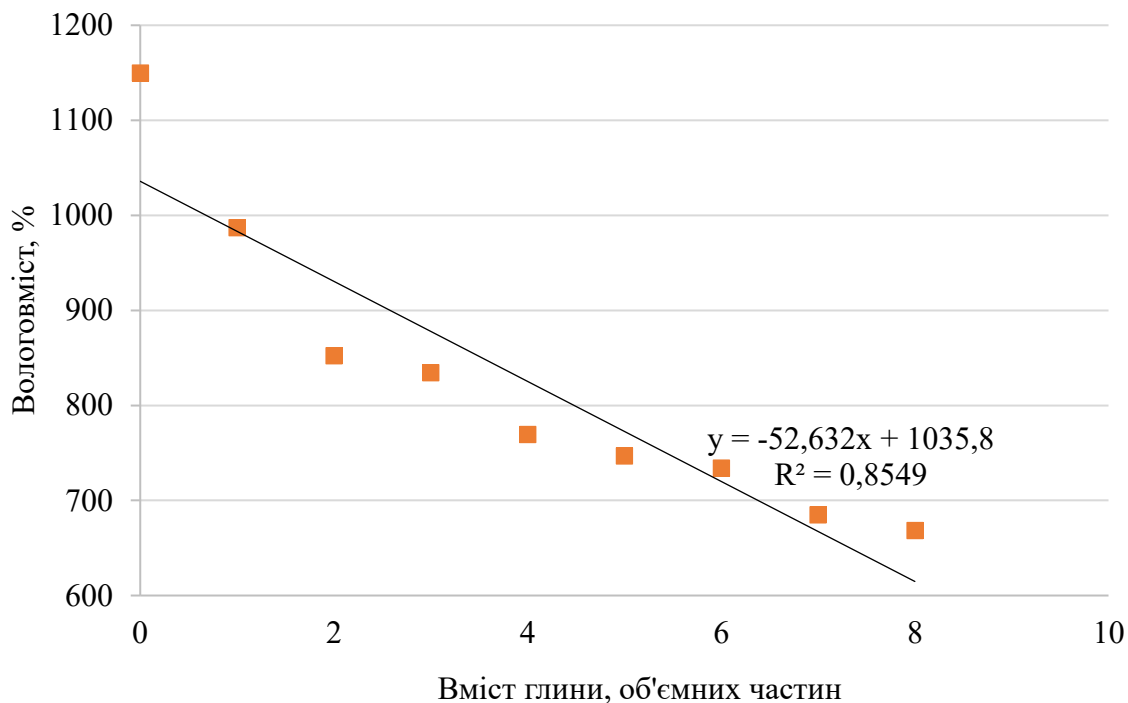


Рис. 4.5. Залежність вологовмісту зразків гібридних гідрогелів ПВС/КМК, від вмісту мінерального наповнювача на початковому етапі дослідження

Початковий рівень вологовмісту гібридних гідрогелів ПВС/КМК зменшується зі збільшенням концентрації монтморилонітової глини — від 1150% до 670%. Це свідчить про те, що введення мінерального наповнювача істотно впливає на здатність матеріалу утримувати воду вже на стартовому етапі дослідження. Найбільш виражене зниження початкової вологості спостерігається при складі з 5 об'ємними частинами глини, що вказує на критичний вплив цього співвідношення на структуру та водоутримуючі властивості гідрогелів.

### 4.3 Визначення сорбційної здатності гідрогелів на основі композицій ПВС/КМК

Гібридні гідрогелі — це особливий клас гідрофільних полімерних матеріалів, які здатні інтенсивно поглинати та утримувати значні об'єми води

без розчинення. Системи на основі крохмалю та його похідних вирізняються підвищеною сорбційною активністю, біосумісністю та здатністю до біодеградації, що робить їх надзвичайно привабливими для використання у медичних технологіях та біоінженерії.

Сорбційна здатність таких матеріалів визначається низкою чинників: хімічною будовою, іонною силою, рН середовища та температурою. Її кількісною характеристикою є ступінь набухання — співвідношення маси зволоженого зразка до його сухої маси. Важливу роль відіграє хімічна структура: наявність гідрофільних груп значно підвищує здатність до водопоглинання, тоді як гідрофобні компоненти її обмежують.

Для дослідження сорбційних властивостей було отримано зразки гідрогелів на основі матриці ПВС/КМК з різним вмістом монтморилонітової глини як мінерального наповнювача. Їх аналізували на здатність до водопоглинання з метою визначення ролі наповнювача та оцінки змін кінетики сорбції у сформованих гібридних системах.

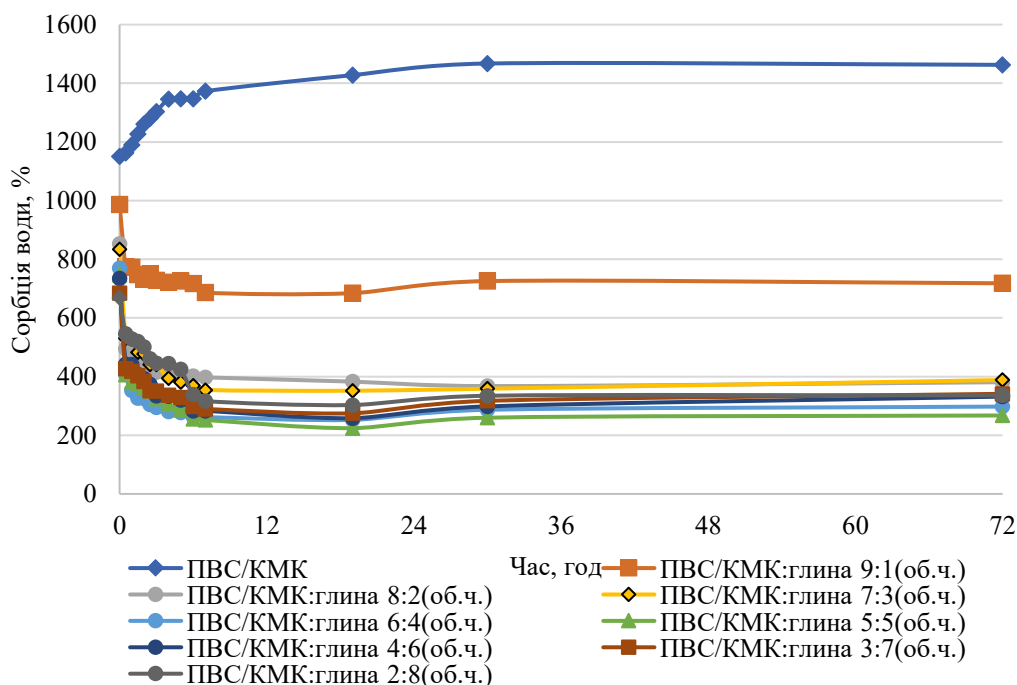


Рис.4.6. Сорбція води для зразків гібридних гідрогелів на основі ПВС/КМК у співвідношенні 1/1 з додаванням глини монтморилонітового типу

Крива сорбції для гідрогелю ПВС/КМК демонструє, що матеріал має просторово зшиту полімерну структуру з обмеженою здатністю до набухання. У дистильованій воді початковий рівень вологості зростає від 1150% до 1463%, тобто приблизно у 0,8 раза. Додавання монтморилонітової глини марки М-5 суттєво змінює характер сорбційних кривих. Вже на початкових етапах експозиції маса зразків зменшується, спостерігається зниження об'єму та падіння вологості в середньому у 2,3 рази. Це явище відповідає колапсу гідрогелів, тобто витісненню води з їхньої структури.

Рівноважний рівень вологості встановлюється через 72 години для всіх композицій із глиною незалежно від її кількості. Мінімальна втрата вологи 270% характерна для зразків із 1 об'ємною частиною наповнювача, тоді як максимальна 480% — для систем із 5 частинами глини. Далі збільшення її вмісту призводить до зниження сорбційної здатності після колапсу, яка становить 668–730%.

Таким чином, введення монтморилонітового наповнювача кардинально змінює кінетику сорбції гідрогелів ПВС/КМК, зумовлюючи ефект структурного колапсу та обмеження водоутримуючих властивостей.

#### **4.4 Визначення десорбційної здатності гідрогелів на основі композицій ПВС/КМК з додаванням глини монтморилонітового типу**

З огляду на практичне застосування гідрогелевої матриці, спосіб зберігання гідрогелів має забезпечити вологе середовище. В зв'язку з тим, що гідрогелеві матеріали можуть утримуватися на певній ділянці шкіри людини, слід враховувати властивість гідрогелю висихати на відкритому повітрі, що обумовлюється здатністю до десорбції. Для чого в роботі фіксували зміну маси зразків у часі, залишивши їх на відкритому повітрі.

На рис.4.7 наведено залежність десорбції води від часу висихання зразків гідрогелей на основі ПВС/КМК у співвідношенні 1/1 з додаванням глини. Найбільше значення початкової вологості характерне для зразків ПВС/КМК, які не містять глиняний наповнювач, а десорбція перші 6 годин

відбувається швидко, після чого швидкість втрати вологи вирівнюється і встановлюється в межах 0,03 г/год.

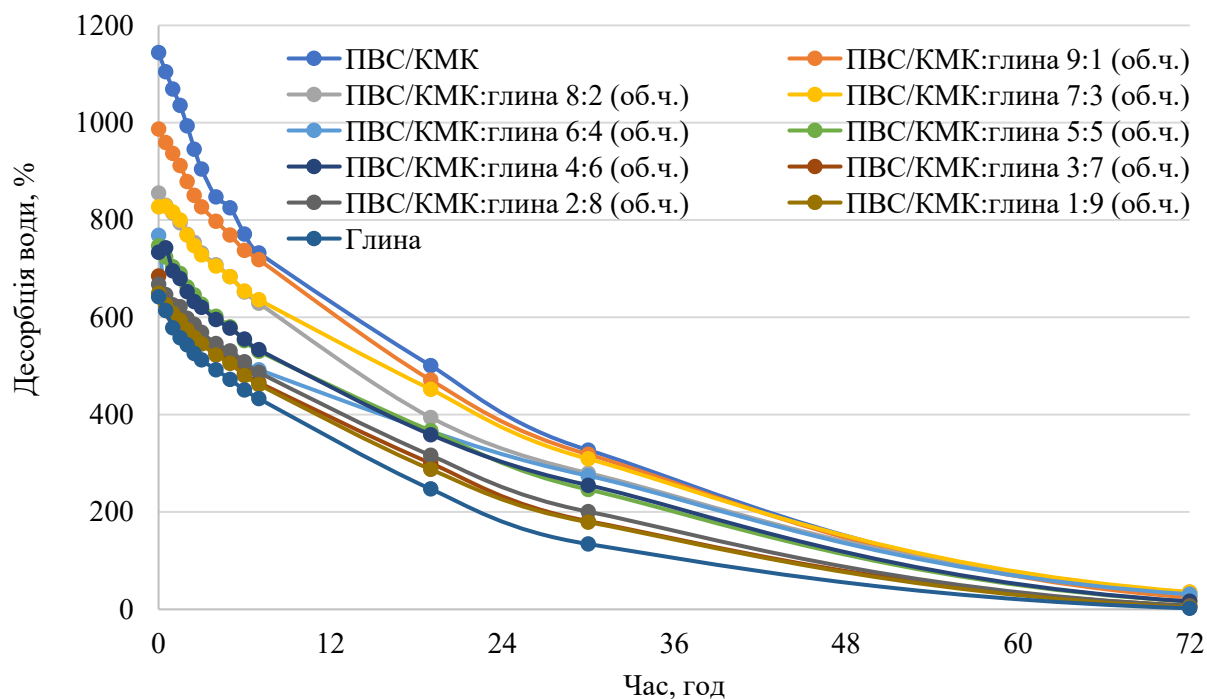


Рис.4.7 Залежність десорбції води від часу висихання зразків гідрогелів на основі ПВС/КМК у співвідношенні 1/1 з додаванням глини.

Для зразків, які містять глинистий наповнювач від 1 до 9 об'ємних частин характерне зменшення кута нахилу кривих десорбції, що свідчить про уповільнення процесу висихання гібридних гідрогелевих матеріалів. При чому збільшення вмісту глини призводить до зменшення періоду швидкої десорбції з 6 до 3 годин. Для зразка, на основі лише глини, обробленої 0,025% розчином ПВС період швидкої десорбції складає 2 години.

Через 72 години всі зразки не залежно від вмісту глини втрачають вологу до мінімального значення, при чому швидкість висихання тим вища, чим більший вміст глини. Було проведено розрахунок середньої швидкості десорбції для композицій гідрогелів ПВС/КМК у співвідношенні 1/1, які містять різну кількість об'ємних частин глини (рис. 4.8).

Найбільшу швидкість втрати вологи мають зразки гідрогелів на основі ПВС/КМК у співвідношенні 1/1 та становить 15 %/год. При вмісті 1 об'ємної частини монтморилонітової глини висихання гідрогелевого матеріалу уповільнюється і досягає 13%/год. Подальше збільшення глини в композиції

не суттєво впливає на швидкість висихання гідрогелевих матеріалів і в середньому становить 9,8 %/год.

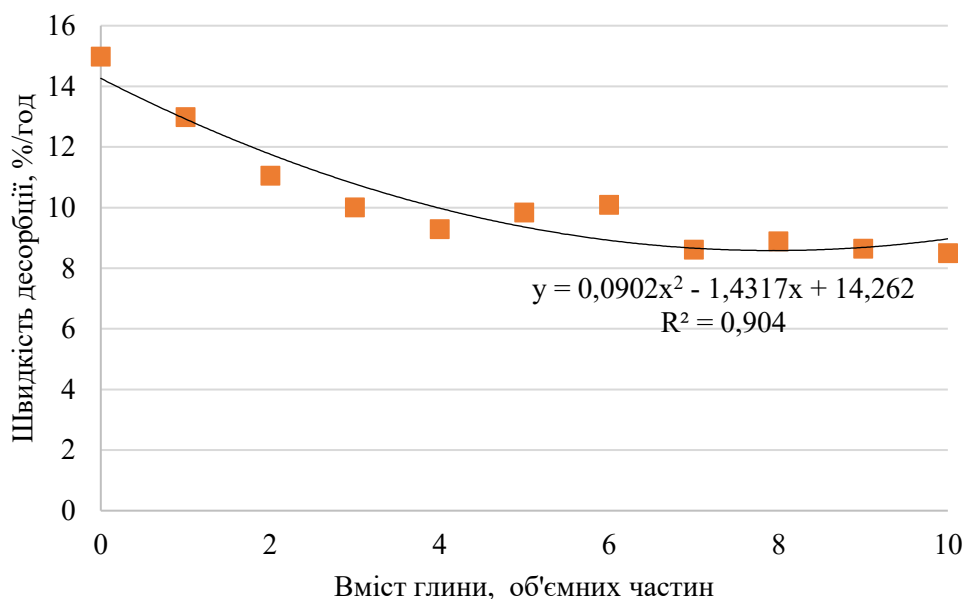


Рис.4.8 Кінетика десорбції зразків гідрогелей на основі ПВС/КМК у співвідношенні 1/1 від вмісту глини

Залежність швидкості десорбції від вмісту глини відповідає емпіричному рівнянню  $y = 0,0009x^2 - 0,1432x + 14,262$ ,  $R^2 = 0,904$ . Тобто збільшення вмісту глини в гібридних гідрогелях на основі ПВС/КМК уповільнює десорбцію. Для всіх зразків був досліджений початковий вміст вологи, який становив в середньому 89%. Тобто на швидкість висихання має вплив лише вміст глини. Максимальна швидкість десорбції гідрогелевих матеріалів спостерігається протягом перших 5-7 годин експерименту для всіх зразків, і становить в середньому 60 %/год, для зразка, який не містить глину, та 30 %/год для зразків, що містять монтморилонітову глину. Отже додавання глини монтморилонітового типу уповільнює процес десорбції гідрогелів на основі ПВС/КМК.

#### Висновки до розділу 4

У дослідженні підтверджено ефективність застосування кріоструктурування для синтезу гібридних гідрогелів на основі полімерної композиції ПВС/КМК у співвідношенні 1/1 із введенням монтморилонітової глини (М-5). Встановлено, що наявність мінерального наповнювача істотно

модифікує форму сорбційних кривих. У глинонаповнених системах спостерігається їхній колапс із досягненням рівноважного стану протягом 72 годин. Найбільш виражене зменшення сорбційної здатності на 480% зафіксовано для композицій із п'ятьма об'ємними частинами глини, де рівноважне значення становить 300%. Аналіз процесів десорбції показав, що введення монтморилонітового наповнювача зменшує втрату вологи в гідрогелях системи ПВС/КМК.

Таким чином, полімерні композиції ПВС/КМК у співвідношенні 1/1 та додаванням 1–2 об'ємних частин монтморилонітової глини можна розглядати як перспективні кріогідрогелі з підвищеною сорбційною здатністю та зниженою швидкістю висихання.

Сучасна стоматологія потребує матеріалів із контрольованими сорбційно-десорбційними властивостями, що забезпечують пролонговане вивільнення біологічно активних речовин та підтримання оптимального рівня зволоження слизової оболонки. Використання кріоструктурування та введення монтморилонітових наповнювачів у полімерні системи ПВС/КМК дозволяє досягти регульованої водоутримувальної здатності та вповільненої десорбції, що безпосередньо відповідає вимогам до стоматологічних матеріалів нового покоління. Таким чином, розроблення таких композицій має значний науковий і практичний потенціал, оскільки сприяє підвищенню ефективності лікування, комфорту пацієнтів та розширює можливості клінічного застосування полімерних гідрогелів у стоматології.

## РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕКСТРАКТУ КРОПИВИ ДВОДОМНОЇ *URTICA DIOICA* НА ВЛАСТИВОСТІ ГІДРОГЕЛІВ ПВС/КР

### 5.1 Визначення густини гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*

На рисунку 5.1 наведено залежність густини гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica* в залежності від вмісту крохмалю.

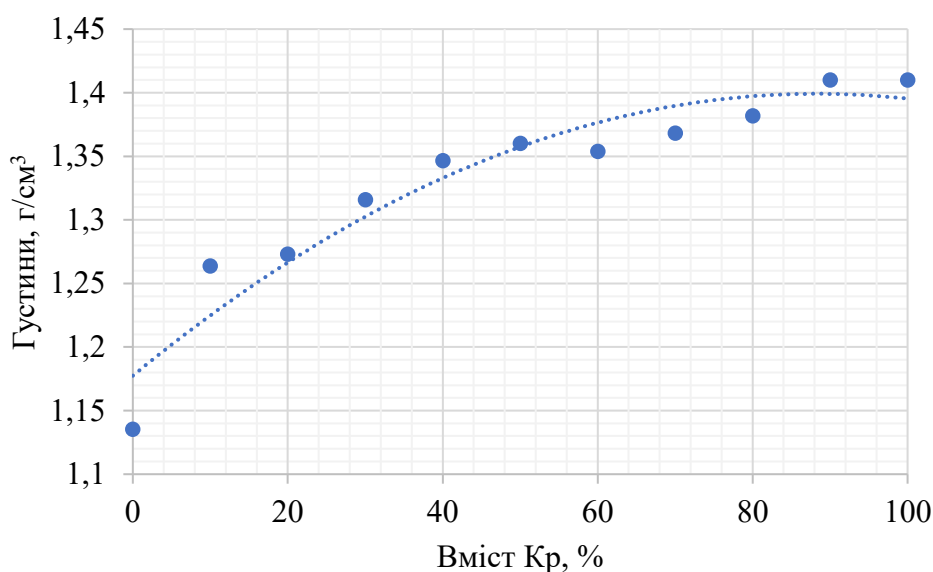


Рис. 5.1. Залежність густини гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica* в залежності від вмісту крохмалю.

Аналіз отриманих експериментальних даних свідчить про чітку залежність густини гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, від вмісту крохмалю. При низьких концентраціях крохмалю (0–10%) густина матеріалу становить близько 1,12 г/см<sup>3</sup>, що вказує на відносно пористу структуру полімерної матриці. Подальше зростання вмісту крохмалю до 20–60% супроводжується інтенсивним підвищенням густини до рівня 1,28–1,36 г/см<sup>3</sup>, що пояснюється ущільненням просторової сітки та формуванням більшої кількості міжмолекулярних зв'язків між макромолекулами ПВС та крохмалю.

При концентраціях понад 80% густина досягає значень близько 1,42 г/см<sup>3</sup>, однак подальше зростання показника практично не спостерігається, що свідчить про вихід системи на плато та насичення ефекту ущільнення. Такий нелінійний характер залежності підтверджує, що оптимальний діапазон введення крохмалю для досягнення максимального ефекту зміцнення структури знаходиться у межах 20–60%, тоді як надмірне його додавання не призводить до суттєвого покращення властивостей.

Важливим є й вплив екстракту кропиви дводомної *Urtica dioica*, який, ймовірно, виступає як природний модифікатор, що сприяє стабілізації полімерної матриці та підвищенню її щільності. Таким чином, результати дослідження демонструють, що збільшення вмісту крохмалю у композиціях ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica* забезпечує зростання густини гідрогелів від 1,12 до 1,42 г/см<sup>3</sup>, причому найбільш ефективним є інтервал 20–60%, що має практичне значення для розробки біомедичних матеріалів з покращеними механічними характеристиками.

## **5.2 Визначення сорбційної здатності гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica***

В роботі було досліджено вплив кількості крохмалю на сорбцію дистильованої води гідрогелями на основі ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica* (рис. 5.2).

Аналіз кінетики сорбції дистильованої води гідрогелевими зразками на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, свідчить про наявність чітко вираженої залежності гідрофільних та структурно-механічних властивостей матеріалу від співвідношення його базових полімерних компонентів [139].

Експериментальні дані демонструють дихотомічний характер поведінки розроблених композитів, розділяючи їх на два протилежних сімейства кінетичних кривих відносно вихідної точки сорбції, що фіксується для всіх зразків на уніфікованому рівні 900%. Характерною особливістю для всієї серії

є висока швидкість проходження дифузійних процесів у початковий період дослідження, коли протягом перших 2–4 годин фіксуються екстремальні швидкості набрякання або деструкції, після чого в інтервалі від 24 до 48 годин кінетичні криві виходять на асимптотичну стабілізацію.

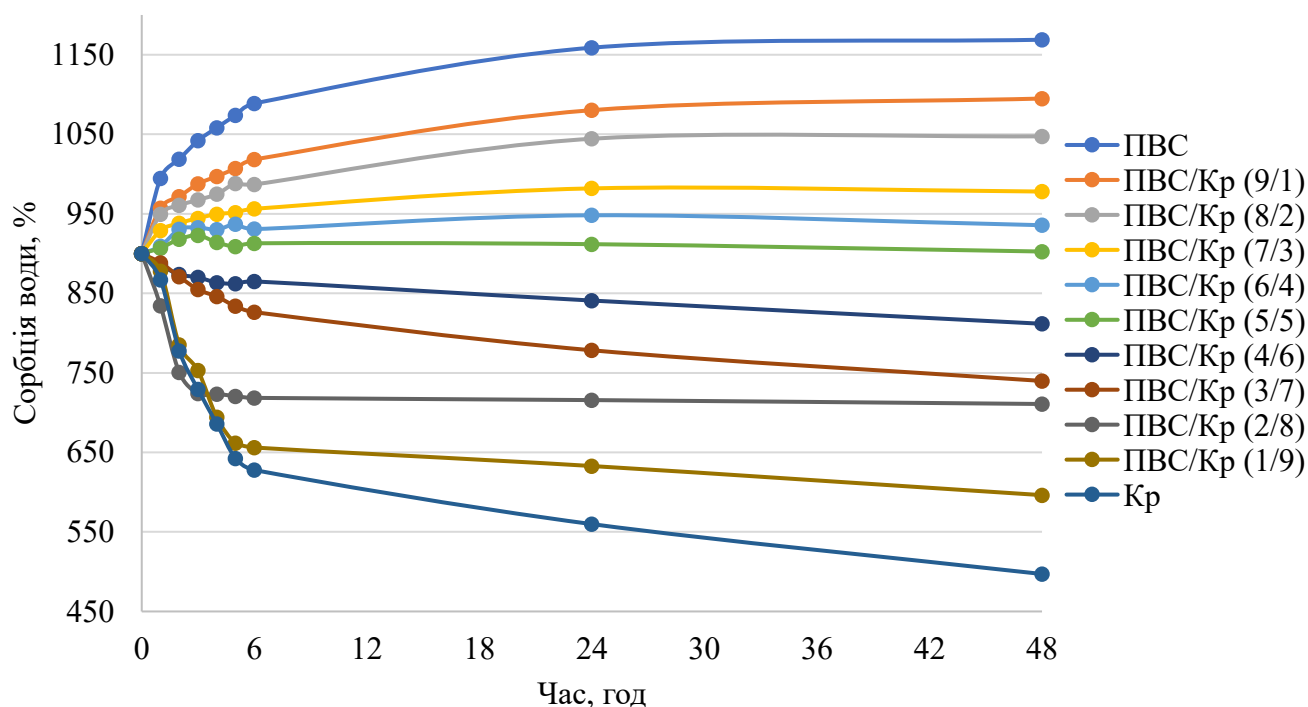


Рис. 5.2. Сорбція дистильованої води для зразків гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*

Для зразків із домінуванням ПВС, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, у складі матриці: чистий ПВС, а також композиції зі співвідношенням ПВС/Кр 9/1, 8/2, 7/3 та 6/4, притаманний класичний процес сорбції дистильованої води, що супроводжується інтенсивним набряканням тривимірної полімерної сітки. Вже за перші 2 години дослідження чистий ПВС, збагачений екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, демонструє стрімке зростання сорбції від 900% до 1018%, досягаючи значення 1090% на 6-ту годину та фіксуючи максимальний показник 1170% наприкінці 48-ї години експерименту.

Із послідовним збільшенням частки Кр у структурі зазначених зразків спостерігається закономірне зниження граничного рівня водопоглинання. Так, для композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, 9/1 та 8/2 максимальні значення сорбції на 48-ту годину становлять 1095% та 1048% відповідно, що на 75% та 122% менше порівняно з чистим полімером. Подальше наповнення матриці крохмалем у зразках 7/3 та 6/4 обмежує кінетичне набрякання на рівні 978% та 935% відповідно наприкінці експерименту. Особливе місце в досліджуваному ряду посідає еквімасове співвідношення компонентів ПВС/Кр 5/5, яке демонструє найвищу хронологічну стабільність: після незначного флуктуаційного максимуму на 4-ту годину 922% сорбційна здатність цієї системи стабілізується на позначці 912% на 24-ту годину і утримується на рівні 902% до 48-ї години спостереження, що свідчить про досягнення оптимального термодинамічного балансу та комплементарної міжмолекулярної взаємодії між гідрофільними групами обох полімерів.

Натомість композиції з переважанням крохмалю у суміші ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, від 4/6 до чистого Кр, демонструють аномальний характер кінетики, який зовні виражається у стрімкому падінні відносного показника сорбції нижче вихідного рівня 900%. Для зразків 4/6 та 3/7 падіння сорбції є поступовим, досягаючи на 48-ту годину значень 811% та 739% відповідно. Проте критичне переважання Кр у зразках 2/8, 1/9 та чистій Кр викликає різкий стрибкоподібний спад маси вже в перші 2 години: сорбція зменшується до 752%, 785% та 732% відповідно. Описане падіння кривих для висококрохмальних зразків може бути обґрунтоване явищем структурного та термодинамічного колапсу гідрогелевої матриці та стиснення залишків сітки ПВС, що супроводжується синерезисом — витисканням вільної води з об'єму гелю.

Таким чином, варіюванням співвідношення ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, можна цілеспрямовано

моделювати експлуатаційні параметри гідрогелів. Матеріали з високим вмістом ПВС від 100% до 60% у суміші є перспективними для створення високоємних суперабсорбентів із робочим діапазоном сорбції 935–1170%, тоді як системи з високим вмістом крохмалю 60–100%, з огляду на їхню здатність до контрольованої втрати маси та структурного колапсу у водному середовищі до рівнів 811–497%, доцільно розглядати як потенційні матриці для біодеградабельних матеріалів або систем із пролонгованим вивільненням біологічно активних речовин екстракту.

В роботі було досліджено вплив кількості крохмалю на сорбцію фізіологічного розчину NaCl гідрогелями на основі ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica* (рис. 5.3).

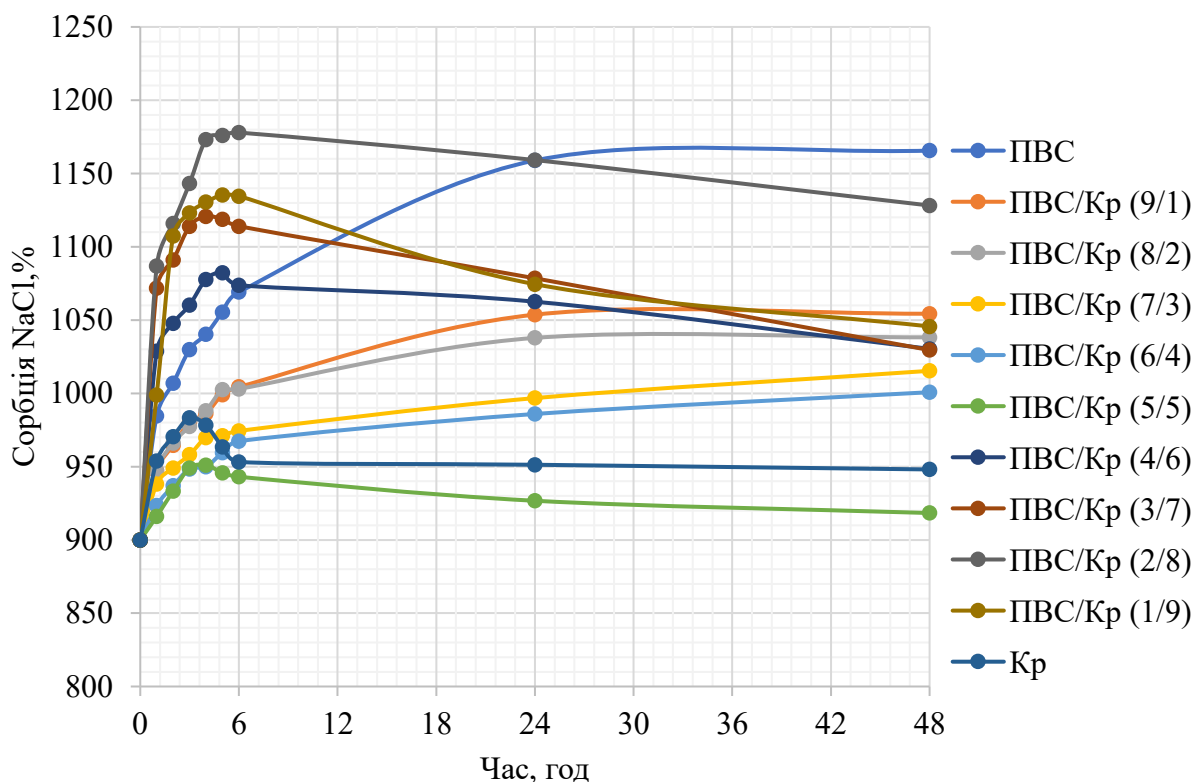


Рис. 5.3. Сорбція фізіологічного розчину NaCl для зразків гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*

Дослідження кінетики сорбції фізіологічного розчину NaCl гідрогелями на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної

*Urtica dioica*, дозволило виявити чіткі кількісні закономірності залежності поглинальної здатності матеріалів від їхнього компонентного складу та часу експозиції від 0 до 48 годин. Для всіх досліджених полімерних систем характерним є двофазний характер процесу сорбції. Протягом перших 4–6 годин спостерігається інтенсивне поглинання фізіологічного розчину NaCl, за якого значення сорбції стрімко зростають від початкової точки у 900% до екстремумів у діапазоні 950–1178%, що зумовлено швидкою гідратацією вільних гідрофільних груп полімерної матриці та високим початковим осмотичним тиском усередині тривимірної сітки гідрогелю.

Після досягнення максимуму сорбційної здатності у цьому часовому діапазоні характер кривих змінюється між 6 та 24 годинами, для більшості зразків фіксується вихід на плато або поступове зниження маси, яке триває до 48 годин.

Аналіз впливу співвідношення базових полімерів виявив, що індивідуальні компоненти та їхні суміші поведуться принципово різнонаправлено. Чистий ПВС, модифікований екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, демонструє характер кінетики, за якого сорбція зростає плавно від 900% на початку експерименту, досягає 1073% на 6-й годині, 1159% на 24-й годині та фіксується на максимальній позначці 1165% на 48-й годині без ознак десорбції, що свідчить про формування стійкої та щільної просторової сітки. Натомість чистий Кр, модифікований екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, швидко насичується від 900% до 1082% на 5-й годині, проте вже на 6-й годині його сорбція падає до 1073%, а на 24-й та 48-й годинах стабілізується на значно нижчому рівні 951% та 948% відповідно, що підтверджує його високу гідрофільність у поєднанні з низькою структурною стабільністю за відсутності сшиваючого агента.

Найвищі стартові показники поглинання фізіологічного розчину зафіксовано для композицій із суттєвим надлишком крохмалю, зокрема для співвідношення ПВС/Кр 2/8, яке забезпечує абсолютний максимум сорбції 1178% на 6-й годині з наступним зниженням до 1159% на 24-й годині та 1128%

на 48-й годині. Аналогічно зразки ПВС/Кр 1/9 та ПВС/Кр 3/7 демонструють високі екстремуми на 5-6 годинах на рівні 1136% та 1121% відповідно, після чого до 24-ї години спостерігається спад до 1078% та 1075%, який завершується на 48-й годині показниками 1046% та 1030%, що пов'язано з розпушенням структури та збільшенням об'єму вільних пор за наявності великої кількості полісахариду разом із фітоекстрактом.

Особливий інтерес викликає область інверсії властивостей, яка спостерігається при наближенні до еквімасового співвідношення компонентів у системі. Зразки гідрогелів на основі ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, 4/6, 5/5 та 6/4 продемонстрували найнижчу сорбційну здатність в усьому досліджуваному часовому інтервалі. Зокрема, мінімальні значення зафіксовано для системи ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, 5/5, де сорбція на 4-й годині становить лише 951%, на 6-й годині — 943%, на 24-й годині — 927%, а на 48-й годині сягає найнижчого показника експерименту у 919%. Схожі низькі параметри сорбції виявляє зразок ПВС/Кр 6/4, де поглинання на 6-й, 24-й та 48-й годинах фіксується на рівні 969%, 986% та 1001% відповідно, а також зразок ПВС/Кр 4/6, що утримує стабільні показники біля 967% на 5-й годині та 951% на 24-й годині. Таке явище можна пояснити формуванням максимально щільного пакування макромолекулярних ланцюгів та утворенням розгалуженої системи міцних міжмолекулярних водневих зв'язків між гідроксильними групами обох полімерів, що суттєво обмежує рухливість сітки й перешкоджає дифузії молекул води та іонів солі всередину матеріалу.

Із подальшим збільшенням частки ПВС сорбційна здатність знову помірно зростає. Зразок ПВС/Кр 7/3, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, послідовно піднімається від 975% (6 год) до 997% (24 год) та 1016% (48 год), а зразок ПВС/Кр 9/1 досягає 1005% на 6-й годині, 1054% на 24-й годині та утримує 1055% на 48-й годині, демонструючи пологіший та стабільніший вигляд кінетичних кривих.

Таким чином, експериментальні дані доводять можливість спрямованого регулювання експлуатаційних параметрів гідрогелів на основі ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, композиції з надлишком крохмалю є ефективними для швидкого експрес-поглинання рідини, тоді як системи, близькі до рівноважного складу або з високим вмістом ПВС, забезпечують довготривалу структурну стабільність у сольових середовищах.

### 5.3 Визначення десорбційної здатності гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*

З метою оцінки кінетики втрати вологи гідрогелями на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, було проведено дослідження з висушування зразків. Отримані дані про залежність масової частки води в гідрогелі від часу висушування наведено на рисунку 5.4.

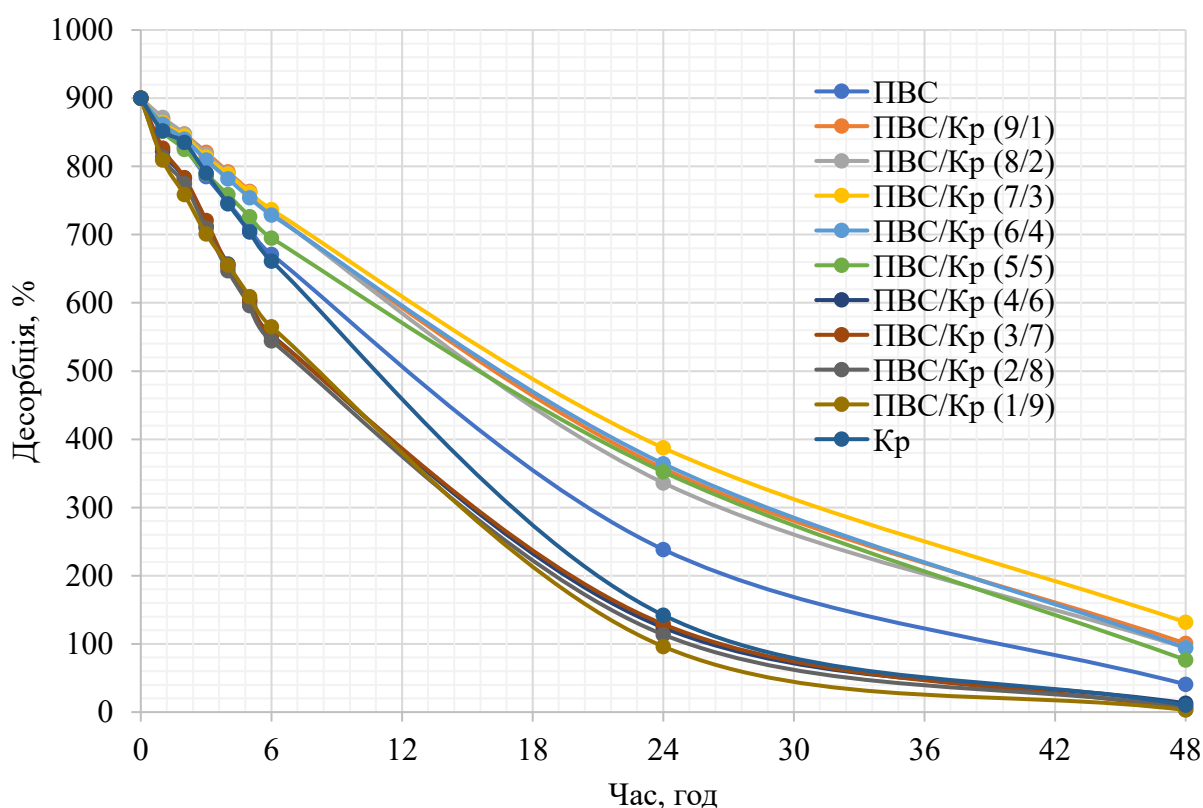


Рис. 5.4. Десорбція зразків гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*

Для всіх досліджуваних зразків характерним є монотонне зниження вмісту вологи в часі, проте швидкість та глибина десорбції суттєво відрізняються залежно від структури полімерних систем, що дозволяє чітко розділити їх на два кінетичні блоки. Першу групу формують зразки з високим вмістом крохмалю, а саме суміші ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, у співвідношеннях 1/9, 2/8, 3/7, 4/6, а також чистий Кр, модифікований екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*. Для цієї групи характерна надзвичайно висока інтенсивність вологовіддачі вже на початковому етапі експерименту. Протягом перших 6 годин висушування значення вмісту вологи у цих матеріалах стрімко падають на 336-356% від вихідних. При подальшому експонуванні тенденція до прискореного зневоднення зберігається на 24-й годині залишковий вміст вологи у зразках цієї групи різко знижується до 95–142%, а до завершення другої доби через 48 годин, вони досягають майже повного висушування, утримуючи лише від 4% до 13% вологи. Найбільшу швидкість десорбції демонструє композиція ПВС/Кр, модифікована екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, 1/9, яка на 24-й годині досягає позначки 95%, а на 48-й годині — абсолютного мінімуму експерименту у 4%.

Така кінетична поведінка зумовлена тим, що надлишок крохмалю та присутність фітоекстракту формують пухку просторову структуру з переважанням капілярно-зв'язаної та вільної води, яка не здатна ефективно утримуватися слабкою полімерною сіткою і легко випаровується.

Другу групу становлять зразки з переважанням ПВС або близькі до еквімасового співвідношення компонентів, зокрема ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, 9/1, 8/2, 7/3, 6/4, 5/5, а також індивідуальний ПВС, модифікований екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*. Ці системи виявляють значно вищий опір процесу десорбції. На 6-й годині висушування вони зберігають високі показники вологи на рівні 694–740%, що в середньому на 150–180 % вище порівняно з першою групою матеріалів. На 24-й годині експозиції вміст вологи у зразках цієї групи

фіксується у межах 335–388 %, тоді як чистий ПВС утримує 238%. Навіть після 48 годин термостатування ці композиції не зневоднюються повністю, зберігаючи від 76% для ПВС/Кр 5/5 до 131% для ПВС/Кр 7/3 вологи, в то час як чистий ПВС, модифікований екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, залишає 40%. Найвищу вологоутримувальну здатність виявляє зразок ПВС/Кр, модифікований екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, 7/3, який на 24-й годині фіксує 388%, а на 48-й годині — 131% вологи. Подібний ефект тривалого утримування рідини пояснюється формуванням щільної просторової сітки та утворенням міцної системи водневих зв'язків між гідроксильними групами ПВС, макромолекулами крохмалю та гідрофільними компонентами екстракту кропиви дводомної *Urtica dioica*, що переводить більшу частину вологи у зв'язаний стан та суттєво уповільнює її дифузію до поверхні випаровування. Таким чином, отримані дані доводять можливість спрямованого регулювання експлуатаційних параметрів гідрогелів, а саме системи з надлишком крохмалю схильні до швидкої вологовіддачі, тоді як композиції з високим вмістом ПВС, особливо ПВС/Кр 7/3, забезпечують пролонговане збереження еластичності та вологи у структурі.

#### **5.4 Визначення змочуваності гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica***

Для оцінки гідрофільності гідрогелів та плівок ПВС/Кр на основі екстракту кропиви в роботі було проведено дослідження кута змочуваності. На рис. 5.5. наведена гістограма залежності кута змочуваності плівок ПВС/Кр на основі екстракту кропиви по відношенню до дистильованої води та фізіологічного розчину NaCl. Для всіх зразків крім 100% ПВС на основі екстракту кропиви кут змочуваності більший для фізіологічного розчину NaCl ніж для дистильованої води.

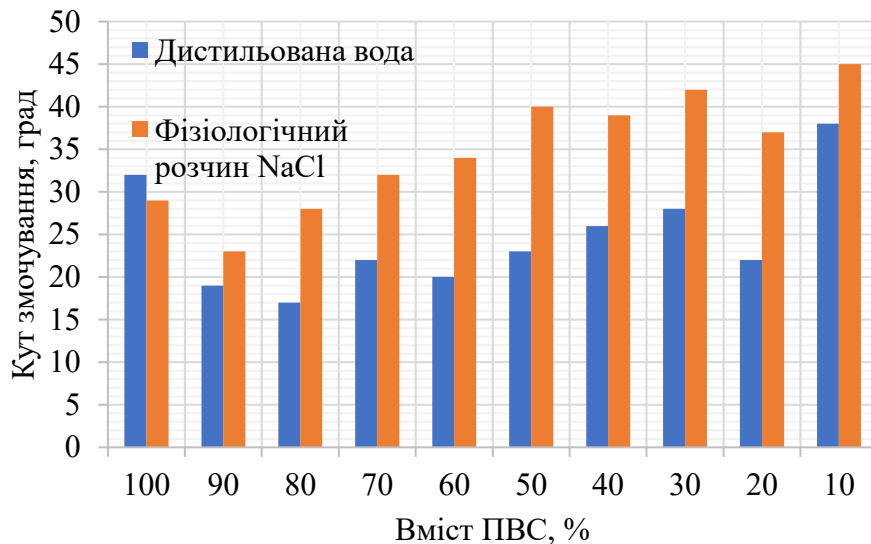


Рис.5.5 Гістограма залежності кута змочуваності гідрогелів від вмісту ПВС у гідрогелі на основі ПВС/Кр, модифікованому екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*.

Найбільше значення кута змочуваності характерне для зразків із вмістом крохмалю 90% становить 45° для фізіологічного розчину і 38° для дистильованої води. Тобто ці зразки мають найменшу гідрофільність. Найменший кут змочуваності характерний для зразка ПВС/Кр на основі екстракту кропиви 9/1 і становить 23° для фізіологічного розчину і 19° для дистильованої води. Загалом зразки 9/1, 8/2, 7/3, 6/4, 5/5 та 2/8 мають кут змочуваності дистильованою водою в межах 20°. Водночас ці ж зразки по відношенню до фізіологічного розчину мають кут змочуваності від 32-42°. Всі гідрогелі ПВС/Кр, модифіковані екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, мають кут змочуваності менше 45°, тобто є цілком гідрофільними.

Отже, зі зменшенням концентрації ПВС кут змочуваності знижується майже утричі, фізіологічний розчин NaCl забезпечує більш інтенсивне змочування порівняно з дистильованою водою, а екстракт кропиви дводомної *Urtica dioica* підсилює гідрофільні властивості гідрогелів, що визначає їхню перспективність у медичних технологіях.

## Висновки до розділу 5

Гідрогелі на основі композицій ПВС/Кр, модифіковані екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, демонструють чітку залежність своїх фізико-хімічних властивостей від співвідношення полімерних компонентів. При збільшенні вмісту крохмалю щільність матеріалу зростає від 1,12 до 1,42 г/см<sup>3</sup>, причому найбільш ефективним для ущільнення структури є інтервал 20–60%, тоді як надмірне введення Кр не дає додаткового зміцнення. Екстракт кропиви виступає природним модифікатором, що стабілізує полімерну матрицю та підвищує її щільність.

Сорбційні властивості гідрогелів мають дихотомічний характер. Матеріали з високим вмістом ПВС від 60 до 100% забезпечують інтенсивне набрякання та високу водопоглинальну здатність у межах 935–1170%, що робить їх перспективними для створення суперабсорбентів. Натомість системи з переважанням крохмалю від 60 до 100% схильні до структурного колапсу та синерезису, що знижує сорбцію до 811–497%, але водночас відкриває можливості використання їх як біодеградабельних матриць або систем пролонгованого вивільнення біологічно активних речовин. При сорбції фізіологічного розчину NaCl виявлено двофазний характер процесу: швидке початкове поглинання з подальшим виходом на плато або спадом. Найвищі екстремуми спостерігаються для композицій із надлишком Кр, тоді як еквімасові системи демонструють мінімальні значення через щільне пакування макромолекул.

Десорбційна здатність також залежить від складу, а саме зразки з високим вмістом Кр швидко втрачають вологу, досягаючи майже повного висушування за 48 годин, тоді як композиції з переважанням ПВС утримують значну кількість зв'язаної води у межах 76–131%, забезпечуючи пролонговане збереження еластичності та вологи.

Дослідження змочуваності показало, що всі гідрогелі ПВС/Кр, модифіковані екстрактом кропиви, є гідрофільними. Найменшу гідрофільність мають зразки з високим вмістом до 90% Кр, тоді як системи з переважанням

ПВС характеризуються мінімальними кутами змочуваності у межах 19–23°, що підтверджує їхню здатність ефективно взаємодіяти з водними середовищами.

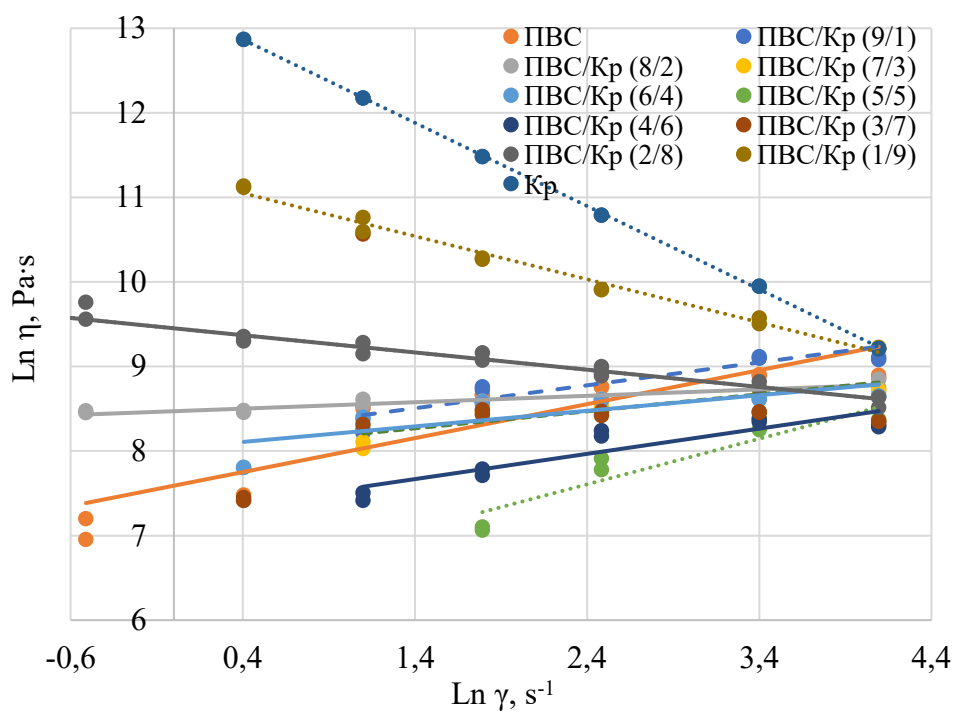
Таким чином, варіювання співвідношення ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica*, дозволяє цілеспрямовано регулювати щільність, сорбційні та десорбційні властивості, а також гідрофільність гідрогелів. Це відкриває широкі перспективи їхнього застосування як суперабсорбентів, біодеградабельних матриць та матеріалів із контрольованим вивільненням біологічно активних речовин у біомедичних технологіях.

## РОЗДІЛ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕКСТРАКТУ КОРИ ДУБА НА ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ГІДРОГЕЛІВ ПВС/КР ТА ПВС/КМК

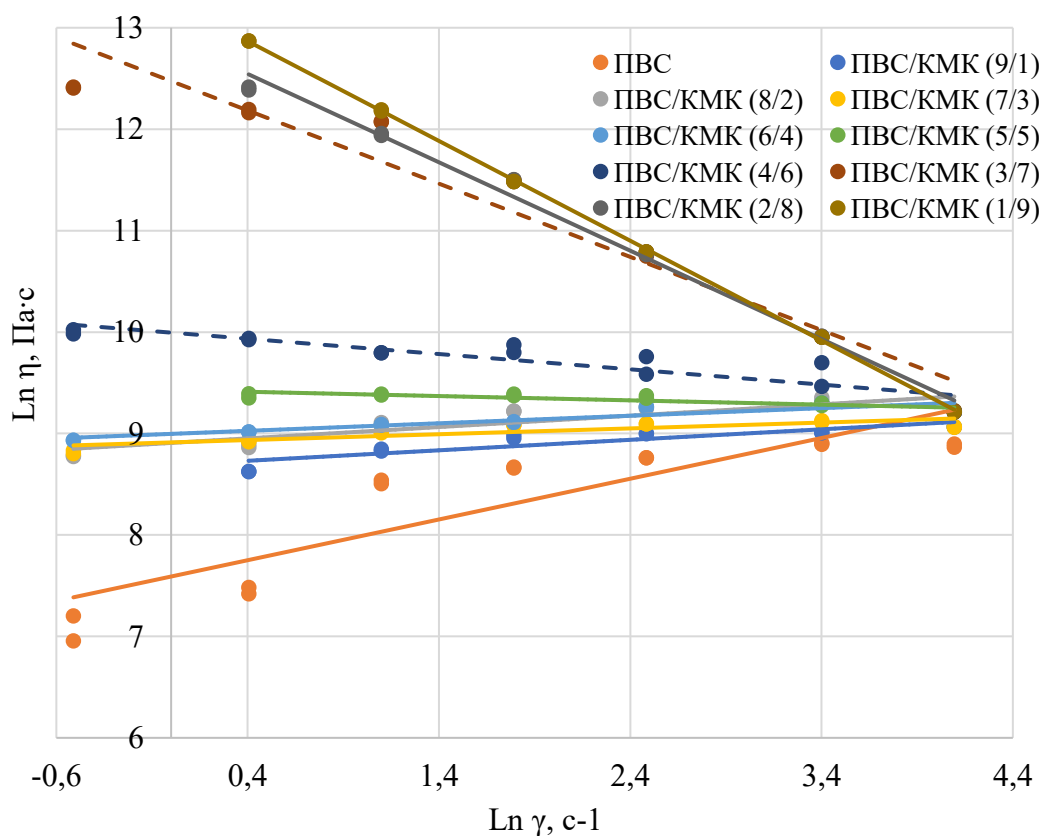
### 6.1 Реологічні властивості композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*

Реологічні властивості полімерних систем, що описують їх поведінку під дією зовнішніх сил, є вкрай важливими для технологічних процесів. Залежність між прикладеним напруженням та швидкістю деформації дозволяє отримати детальну інформацію про структуру полімеру, його в'язкість, еластичність та інші характеристики, що впливають на його поведінку під час обробки. В'язкість є ключовим параметром, який необхідно враховувати при розробці технологічних процесів переробки полімерних композицій на основі полісахаридів, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* ПВС/КР та ПВС/КМК. В'язкість визначається, як співвідношення між напруженням зсуву  $\tau$  та градієнтом швидкості зсуву  $\dot{\gamma}$  за формулою:  $\eta = \tau/\dot{\gamma}$ . На рис.6.1. наведено залежність в'язкості розчину від швидкості зсуву полімерних композицій на основі полісахаридів, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* ПВС/КР та ПВС/КМК.

Індекс течії  $n$  використовують для оцінки структурних змін, що виникають у розчині під впливом зсувних напружень та розраховують за формулою  $n = d \lg \tau / d \lg \dot{\gamma}$ . Для ньютонівських рідин показник  $n$  дорівнює одиниці, проте зі збільшенням складності структури розчину та відхиленням від ньютонівської поведінки, значення  $n$  зменшується. Коефіцієнти нахилу ліній тренду для композицій на основі полісахаридів, модифікованих водним екстрактом дуба мають додатні значення крім Кр, ПВС/Кр 2/8 і 1/9 (рис.6.1 а) та ПВС/КМК 2/8 і 1/9 (рис. 6.1 б).



a)



б)

Рис. 6.1. Залежність в'язкості від швидкості зсуву розчинів полімерних композицій ПВС/Кр (а) та ПВС/КМК (б), модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*.

У межах досліджуваного діапазону швидкостей зсуву в'язкість розчинів композицій на основі полісахаридів, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* ПВС, ПВС/Кр та ПВС/КМК відповідає ступеневому закону та описується рівнянням Оствальда–де Вілла:  $\eta = K \gamma^{n-1}$ , де  $K$  – коефіцієнт консистенції, що залежить як від природи матеріалу, так і від виду вимірювальної апаратури, а  $n$  – індекс течії. В результаті обробки експериментальних даних методом лінійної регресії були отримані значення констант  $K$  та  $n$  рівняння Оствальда–де Вілла, які наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1.

Розрахункові значення констант  $K$  та  $n$  рівняння Оствальда–де Вілл для композицій полімерних композицій ПВС/Кр (а) та ПВС/КМК (б), модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*.

Композиція ПВС	Рівняння лінії тренду	R <sup>2</sup>	n	K
ПВС	$y = 0,4016x + 7,5903$	0,781	0,5984	7,5903
ПВС/Кр (9/1)	$y = 0,2708x + 8,1269$	0,8201	0,7292	8,1269
ПВС/Кр (8/2)	$y = 0,0758x + 8,471$	0,8864	0,9242	8,471
ПВС/Кр (7/3)	$y = 0,2013x + 7,9866$	0,8202	0,7987	7,9866
ПВС/Кр (6/4)	$y = 0,4016x + 7,5903$	0,7810	0,5984	7,5903
ПВС/Кр (5/5)	$y = 0,5392x + 6,3119$	0,8536	0,4608	6,3119
ПВС/Кр (4/6)	$y = 0,2983x + 7,2504$	0,8322	0,7017	7,2504
ПВС/Кр (3/7)	$y = 0,4016x + 7,5903$	0,7810	0,5984	7,5903
ПВС/Кр (2/8)	$y = -0,2041x + 9,4516$	0,9408	1,2041	9,4516
ПВС/Кр (1/9)	$y = -0,5097x + 11,255$	0,9890	1,5097	11,255
Кр	$y = -0,9847x + 13,261$	0,9997	1,9847	13,261
ПВС/КМК (9/1)	$y = 0,1034x + 8,6897$	0,7878	0,8966	8,6897
ПВС/ КМК (8/2)	$y = 0,1118x + 8,9072$	0,7722	0,8882	8,9072
ПВС/ КМК (7/3)	$y = 0,0574x + 8,9123$	0,7531	0,9426	8,9123
ПВС/ КМК (6/4)	$y = 0,0746x + 8,9964$	0,8276	0,9254	8,9964
ПВС/ КМК (5/5)	$y = -0,0424x + 9,4284$	0,7589	1,0424	9,4284

Продовження Табл.6.1.

ПВС/ КМК (4/6)	$y = -0,1507x + 9,9945$	0,8173	1,1507	9,9945
ПВС/ КМК (3/7)	$y = -0,722x + 12,474$	0,9392	1,7222	12,474
ПВС/ КМК (2/8)	$y = -0,8714x + 12,894$	0,9917	1,8714	12,894
ПВС/ КМК (1/9)	$y = -0,9836x + 13,261$	0,9997	1,9836	13,261

Для розчинів композицій на основі полісахаридів крохмалю, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* у співвідношенні ПВС/Кр від 9/1 до 3/7 індекс течії  $n < 1$ , що вказує на псевдопластичність композицій. При додаванні в композиції більшої кількості Кр показник  $n$  зростає, що, ймовірно, пов'язане зі зниженням структурованості системи. Для розчинів ПВС/Кр 2/8, 1/9, 0/10 спостерігається  $n > 1$  при збільшенні коефіцієнту  $K$ . Такі системи є дилатантними, що пояснюється тим, що частинки композицій утворюють тимчасові структури, які руйнуються під дією зсуву.

Отримані розрахункові значення констант рівняння Оствальда–де Вілла для композицій ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, свідчать про чітку залежність реологічних характеристик від співвідношення полімерних компонентів. При переважанні ПВС у композиціях ПВС/КМК зі співвідношенням компонентів 9/1 – 6/4 показник течії  $n$  знаходиться нижче одиниці, що відповідає псевдопластичній поведінці системи, яка характеризується зниженням в'язкості при зростанні швидкості зсуву та є сприятливою для технологічних процесів формування плівок і гідрогелів. У точці рівного співвідношення ПВС/КМК 5/5 значення  $n$  наближається до одиниці, що відображає перехідний стан між псевдопластичною та дилатантною поведінкою. Подальше збільшення частки КМК призводить до зростання  $n$  понад одиницю, до 1,98 при співвідношенні 1/9, що свідчить про формування дилатантних систем із підвищеною структурною стійкістю та здатністю до опору деформації. Константа  $K$  також демонструє поступове зростання від 8,7 до 13,3, що відображає підвищення ефективної в'язкості та посилення міжмолекулярних взаємодій у присутності

КМК. Таким чином, композиції ПВС/КМК з екстрактом кори дуба характеризуються керованим переходом від псевдопластичної до дилатантної реологічної поведінки залежно від співвідношення полімерів, що відкриває можливості для цілеспрямованого регулювання технологічних та експлуатаційних властивостей матеріалів стоматологічного й фармацевтичного призначення.

В роботі композиції ПВС/Кр зі співвідношенням 9/1–3/7 та ПВСС/КМК зі співвідношенням 9/1 – 6/4 проявляють псевдопластичну поведінку, що узгоджується з даними для ПВС-композитів [144]. Разом з цим для композицій з співвідношенням ПВС/Кр 2/8, 1/9 та ПВС/КМК 4/6-1/9 характерний  $n > 1$  при збільшенні коефіцієнту  $K$ , тобто системи є дилатантними рідинами. Така поведінка відрізняється від результатів інших авторів [145], які повідомляли про збереження псевдопластичності навіть при високій частці крохмалю. Це може бути пов'язано з особливостями екстракту кори дуба *Quercus cortex* та методикою приготування композицій і пояснюється тим, що частинки композицій утворюють тимчасові структури, які руйнуються під дією зсуву.

У випадку композицій ПВС/КМК з екстрактом кори дуба *Quercus cortex* додатковий фактор біоактивних сполук може посилювати міжмолекулярні взаємодії, що пояснює зростання константи  $K$  при збільшенні частки КМК. Це відкриває перспективи для створення матеріалів із регульованими реологічними властивостями, які можуть бути адаптовані для стоматологічних та фармацевтичних застосувань, де важливим є баланс між технологічною оброблюваністю та механічною стійкістю.

Таким чином, отримані результати не лише підтверджують загальні закономірності, описані у сучасних дослідженнях, але й демонструють можливість цілеспрямованого регулювання властивостей композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК шляхом варіювання співвідношення полімерів та введення біоактивних екстрактів.

## 6.2 Вологовміст гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*

В роботі було досліджено початковий вологовміст гідрогелів на основі полісахаридів крохмалю, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, в залежності від вмісту Кр та КМК (рис. 6.2).

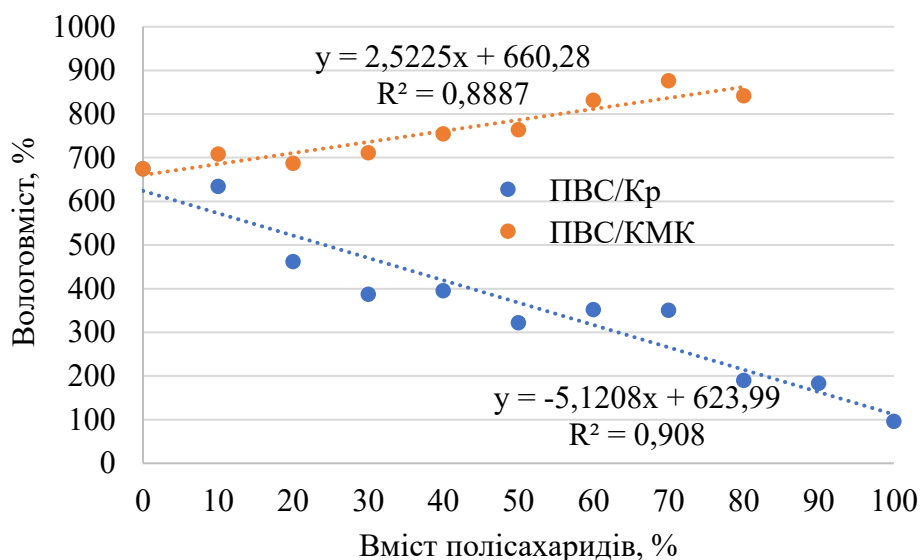


Рис.6.2. Вологовміст гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр (а) та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* в залежності від вмісту полісахаридів.

Залежність початкового вмісту води від кількості Кр та КМК прямопропорційна. Встановлено рівняння, які описують залежність вологовмісту від кількості Кр та КМК у гідрогелі ПВС/Кр  $y = -5,1208x + 623,99$  та ПВС/КМК  $y = 2,5225x + 660,28$ . Розрахунковий початковий вологовміст використовували для встановлення ваги сухого гідрогелю для розрахунку сорбційної здатності гідрогелів. Для систем ПВС/Кр характерне зниження вологовмісту зразків гідрогелів із збільшенням вмісту крохмалю, що можна пояснити колапсом гідрогелевих систем, при якому спостерігається витіснення води. А для систем ПВС/КМК модифікованих водним екстрактом дуба зі збільшенням вмісту КМК у композиції з ПВС призводить до збільшення вологовмісту в гідрогелях.

### 6.3 Визначення густини плівкових матеріалів та гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих екстрактом кори дуба *Quercus cortex*

При дослідженні густина плівок та гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* (рис. 6.3) встановили, щогустина плівок становить 1,1 - 1,35 г/см<sup>3</sup>, що є значно вищою за щільність відповідних гідрогелів: 1,01 - 1,04 г/см<sup>3</sup> для обох систем ПВС/Кр та ПВС/КМК. Ймовірно такий ефект пов'язаний з тим, що гідрогелі містять велику кількість води, яка збільшує відстань між зшитими макромолекулами та значно знижує їхню загальну щільність.

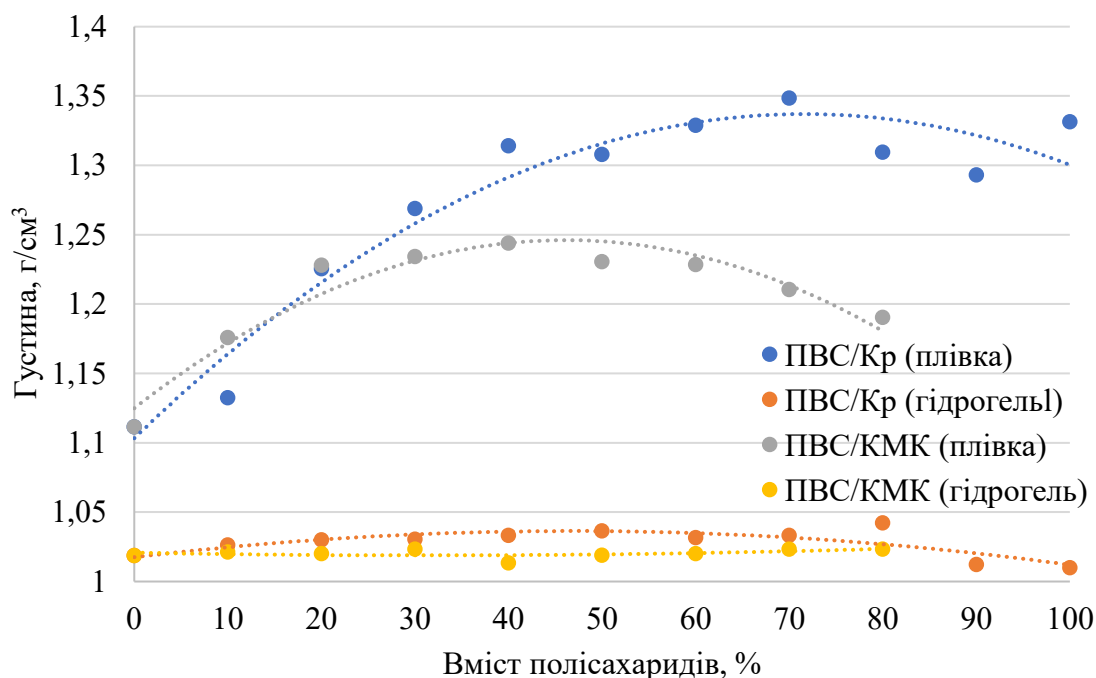


Рис. 6.3. Залежність щільності плівкових матеріалів та гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* в залежності від вмісту полісахаридів.

Для плівок ПВС/Кр щільність зростає зі збільшенням вмісту Кр, досягаючи максимуму приблизно при 70% вмісту Кр 1,35 г/см<sup>3</sup>, після чого дещо знижується. Це вказує на те, що до 70% Кр формування композитної плівки призводить до більш щільної структури, можливо, завдяки ефективнішій взаємодії компонентів ПВС та Кр. Для плівок ПВС/КМК щільність також зростає зі збільшенням вмісту КМК, досягаючи максимуму

приблизно при 40-50% вмісту КМК 1,24-1,25 г/см<sup>3</sup>, після чого знижується більш виражено. Максимальна щільність для цієї системи нижча, ніж для ПВС/Кр.

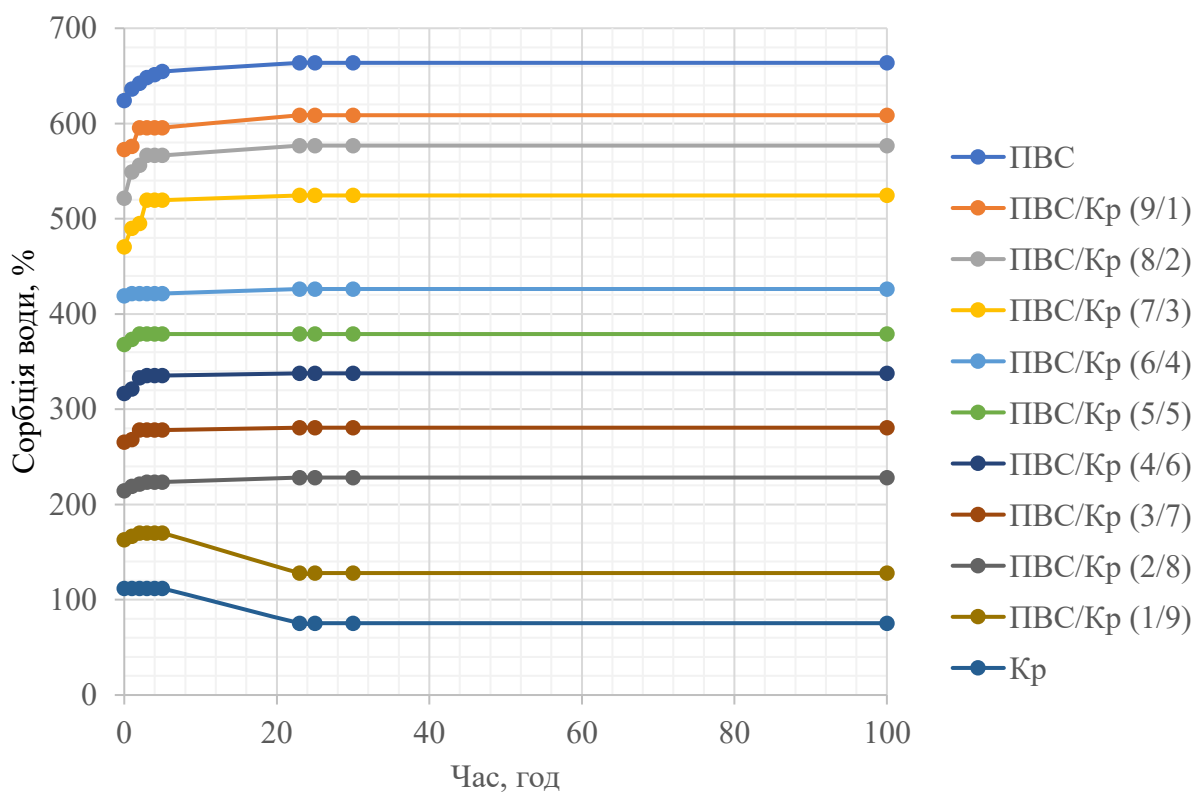
Щільність обох типів гідрогелів ПВС/Кр та ПВС/КМК змінюється дуже незначно від 1,02 до 1,04 г/см<sup>3</sup> у діапазоні вмісту полісахаридів від 0% до 80-90%. Для гідрогелів ПВС/Кр простежується слабкий максимум щільності при 40-50%. Для гідрогелів ПВС/КМК також спостерігається слабкий максимум при 20-30%. При 100% вмісті полісахариду (Кр або КМК), щільність знижується до мінімальних значень 1,01-1,02 г/см, що може бути пов'язано зі зміною внутрішньої пористості або здатності зв'язувати воду без ПВС.

Зниження густини гідрогелів при високому Кр узгоджується з результатами [146], які описують формування пористої структури при збільшенні частки крохмалю.

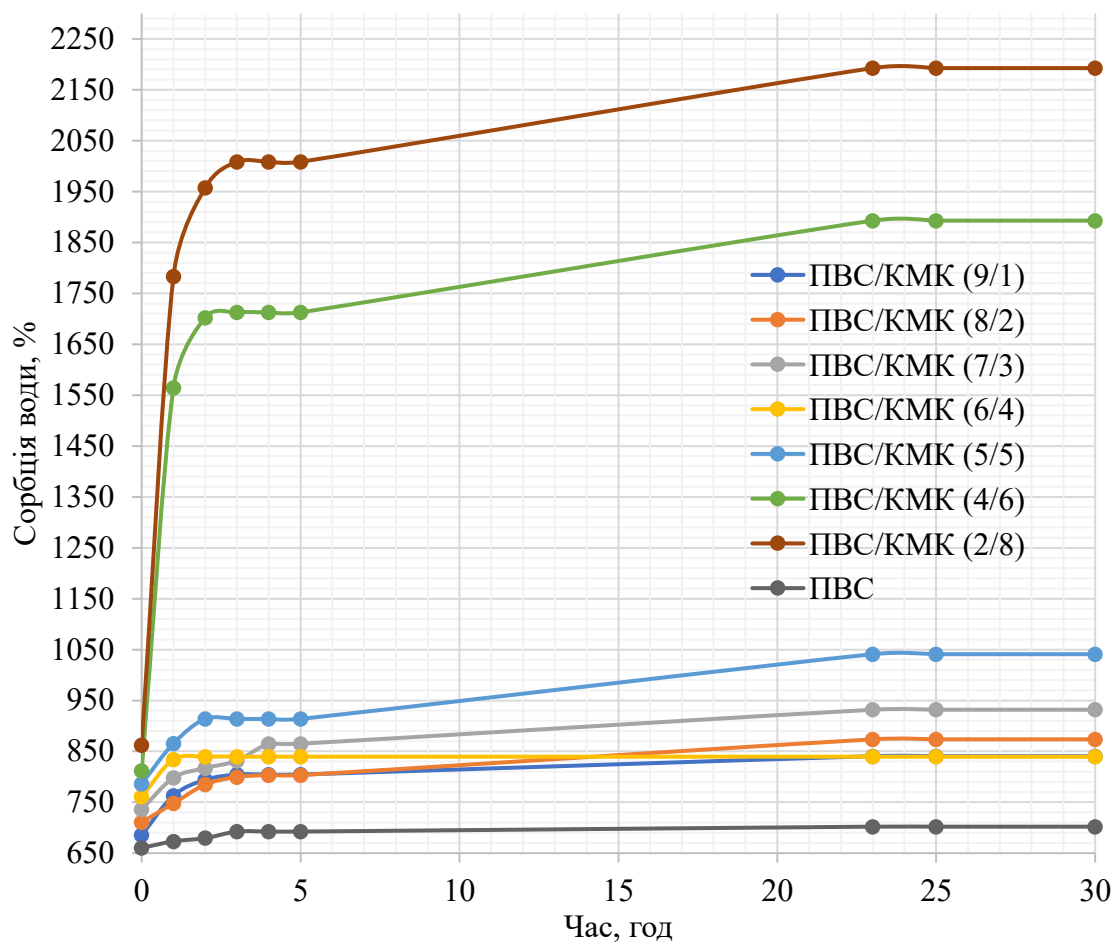
Отже, густина плівок на основі полісахаридів, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* 1,1 - 1,35 г/см<sup>3</sup> значно вища за щільність відповідних гідрогелів 1,01 - 1,04 г/см<sup>3</sup>. Це є прямим наслідком вмісту великої кількості води у гідрогелях. При цьому композиції на основі полісахаридів, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* ПВС/Кр формують плівки з вищою на 7,4 % максимальною щільністю порівняно з плівками ПВС/КМК. А зміна вмісту полісахариду суттєво змінює щільність плівки. Разом з цим, тип та вміст полісахариду майже не впливає на щільність гідрогелів, яка залишається низькою та стабільною для обох систем. Таким чином, у формі плівки на основі полісахаридів, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* хімічний склад і співвідношення компонентів ПВС/Кр чи ПВС/КМК суттєво впливає на кінцеву щільність завдяки різній упаковці макромолекул. А гідрогелі мають більш пористу структуру порівняно з плівками, що пояснює їх меншу чутливість до зміни вмісту полісахаридів.

#### 6.4 Визначення сорбційної здатності плівкових матеріалів та гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих екстрактом кори дуба *Quercus cortex*

В роботі проводили дослідження на сорбційну здатність гідрогелів на основі полісахаридів модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* по відношенню до дистильованої води (рис. 6.4) та фізіологічного розчину NaCl (рис. 6.5.)



a)



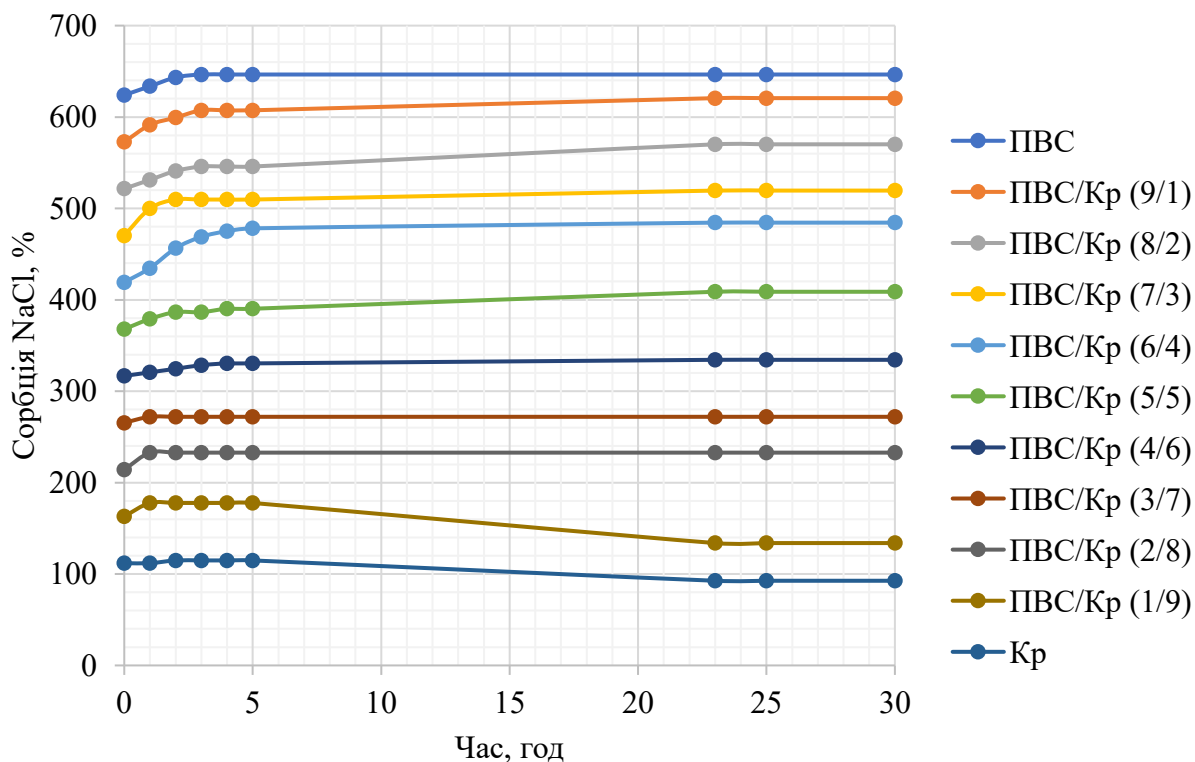
б)

Рис. 6.4. Сорбція дистильованої води для зразків гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр (а) та ПВС/КМК (б), модифікованих екстрактом кори дуба *Quercus cortex*.

Для обох систем ПВС/Кр та ПВС/КМК сорбція води відбувається дуже швидко протягом перших 5 годин, після чого зразки досягають стану близького до рівноваги. Це вказує на швидке набухання макромолекулярної сітки. Гідрогелі на основі композицій ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* (рис. 6.4 б) демонструють значно вищу сорбційну здатність 700-2200 % порівняно з композиціями ПВС/Кр, модифікованими водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* (рис. 6.4 а), де сорбція становить лише 80-670 %. Це пояснюється наявністю гідрофільних карбоксильних груп -COOH у структурі КМК, які значно збільшують здатність гідрогелю зв'язувати молекули води через сильніші водневі зв'язки та іонні взаємодії, ніж у випадку звичайного Кр.

Для систем ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, збільшення вмісту КМК різко збільшує сорбцію. Максимальна сорбція становить близько 2200 % та досягається при співвідношенні компонентів 2/8. Це підтверджує, що саме КМК є ключовим компонентом, який забезпечує високу гідрофільність у цій системі. Чистий ПВС та зразки з високим вмістом ПВС мають найнижчу сорбцію 700-1050 %. Для систем ПВС/Кр, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, зміна співвідношення ПВС/Кр призводить до менш виражених, але важливих змін сорбційної здатності.

Таким чином гідрогелі ПВС/КМК, модифіковані водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* є надзвичайно ефективними сорбентами води завдяки наявності карбоксильних груп у КМК. Збільшення вмісту КМК до 80 % забезпечує оптимальне набухання 2200 %. Гідрогелі ПВС/Кр модифіковані водним екстрактом дуба є помірними сорбентами води, де сорбційна здатність в основному визначається вмістом ПВС.



a)

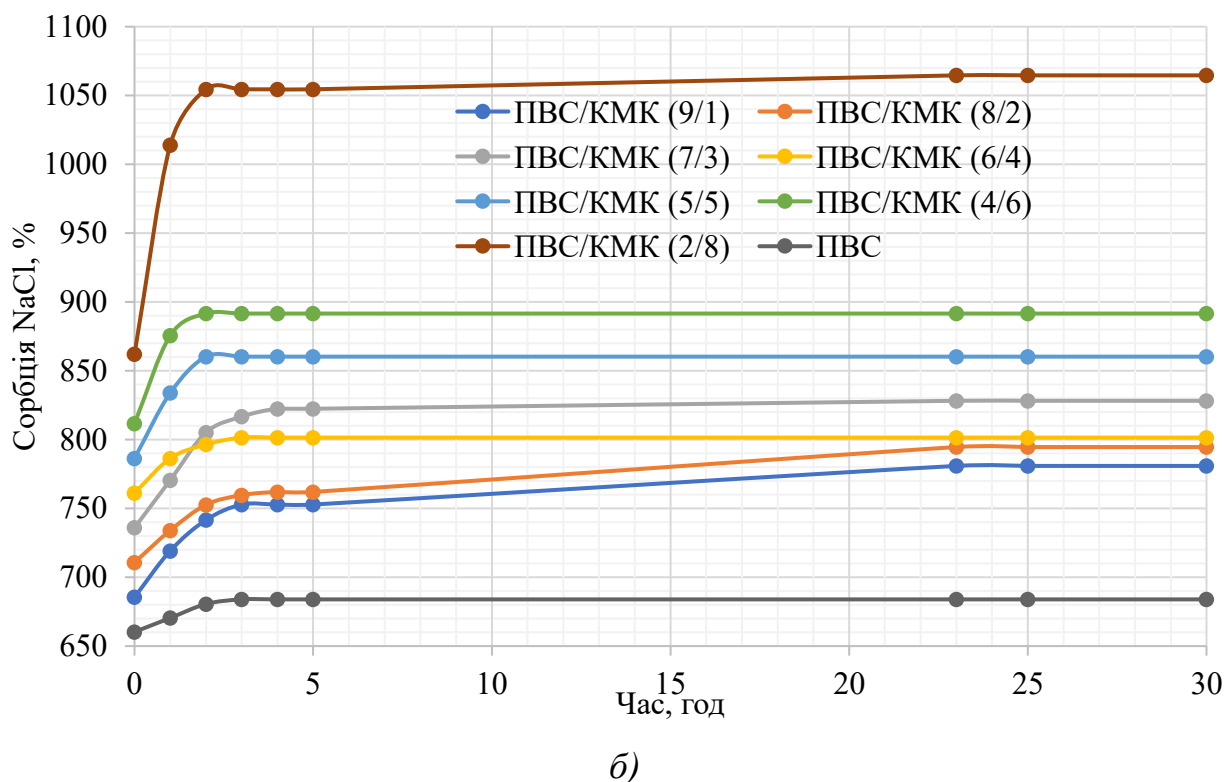


Рис. 6.5. Сорбція фізіологічного розчину NaCl для зразків гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр (a) та ПВС/КМК (б), модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*.

Для обох систем гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр (a) та ПВС/КМК (б), модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, сорбція фізіологічного розчину NaCl відбувається швидко і досягає рівноваги протягом перших 5 годин, що типово для гідрогелів, де швидке заповнення сітки рідиною визначається дифузією. Система ПВС/КМК (рис. 6.5 b) демонструє значно вищу сорбційну здатність 680-1060% порівняно з ПВС/Кр (рис. 6.5 a), де сорбція становить 90-650 %. У присутності електроліту фізіологічного розчину NaCl, карбоксильні групи КМК створюють вищий осмотичний тиск всередині сітки гідрогелю, що сприяє значно більшому поглинанню води та іонів  $\text{Na}^+$  та  $\text{Cl}^-$  порівняно з нейтральним Кр.

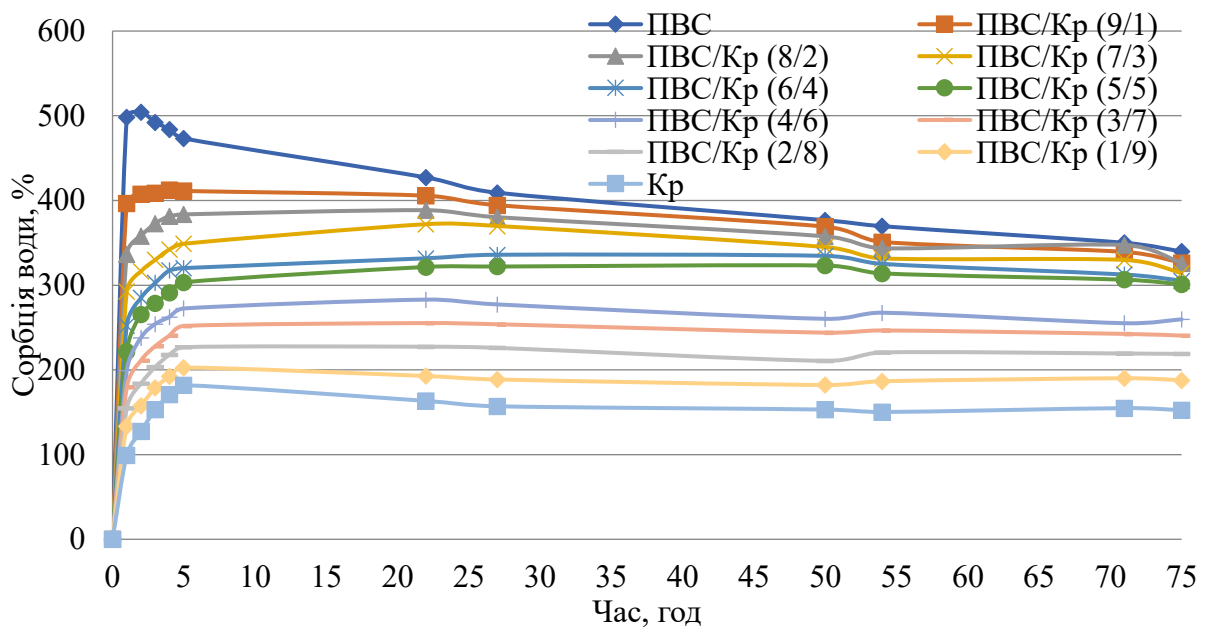
Для систем ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, сорбційна здатність фізіологічного розчину NaCl зростає зі збільшенням частки КМК. Максимальна сорбція 1060 % досягається при найвищому вмісті КМК 80%, підтверджуючи, що КМК є основним фактором

набухання в фізіологічному розчині NaCl. Зразки з високим вмістом ПВС 90% та 80% показують найнижчу сорбцію в цій групі 750-780 %. Для систем ПВС/Кр, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, сорбційна здатність фізіологічного розчину NaCl знижується зі збільшенням частки Кр. Найвища сорбція 650 % спостерігається для чистого ПВС, збагаченого біоактивним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, а найнижча сорбція 90-110 % спостерігається при високому вмісті Кр 90% та 100%. Це вказує на те, що у системах ПВС/Кр, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, ПВС є більш гідрофільним у фізіологічному розчині NaCl, ніж Кр, а включення Кр у сітку ПВС знижує загальну ефективність набухання.

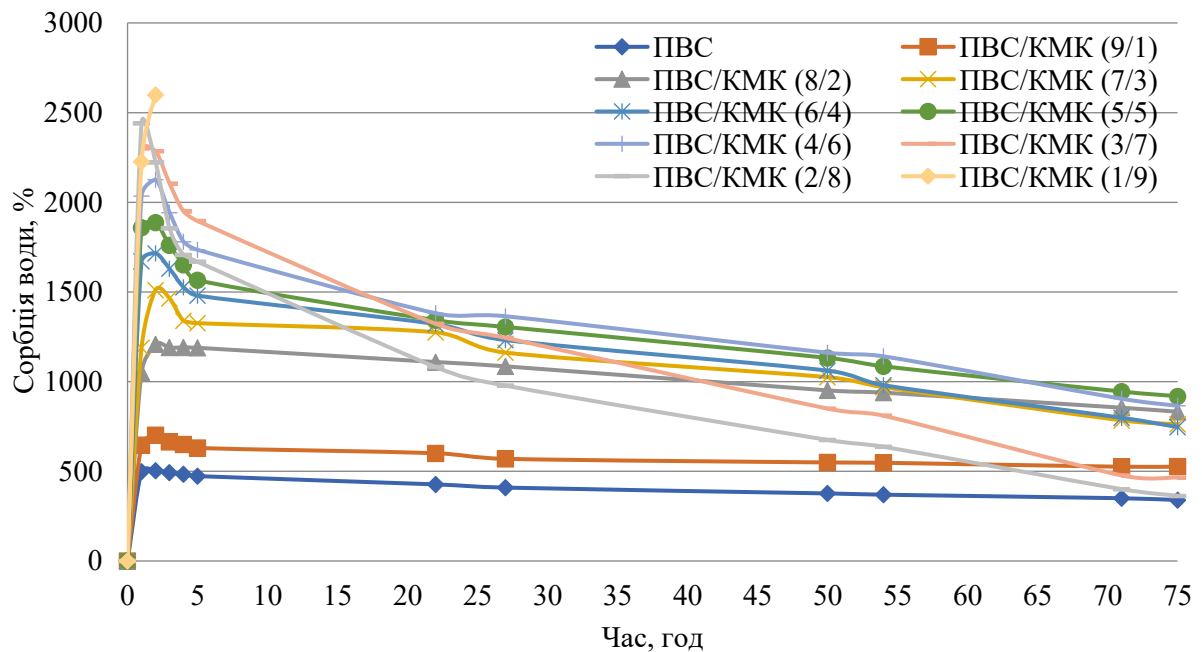
Таким чином, для гідрогелів ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, сорбція нижча в фізіологічному розчині NaCl 1060 % ніж 2200 % у дистильованій воді. Це є типовим ефектом екранування іонів  $\text{Na}^+$ , який пригнічує електростатичне відштовхування карбоксильних груп КМК, зменшуючи осмотичний тиск і, як наслідок, ступінь набрякання. Для систем ПВС/Кр, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, сорбція в фізіологічному розчині NaCl залишається порівняно низькою, що очікувано для неіоногенних гідрогелів.

Отже гідрогелі ПВС/КМК, модифіковані водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, зберігають високі сорбуючі властивості навіть у фізіологічному розчині NaCl, де сорбційна здатність контролюється вмістом КМК. Гідрогелі ПВС/Кр, модифіковані водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, мають помірну сорбційну здатність, яка в основному визначається часткою ПВС.

В роботі проводили дослідження на сорбційну здатність плівок основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, по відношенню до дистильованої води (рис. 6.6) та фізіологічного розчину NaCl (рис. 6.7).



a)



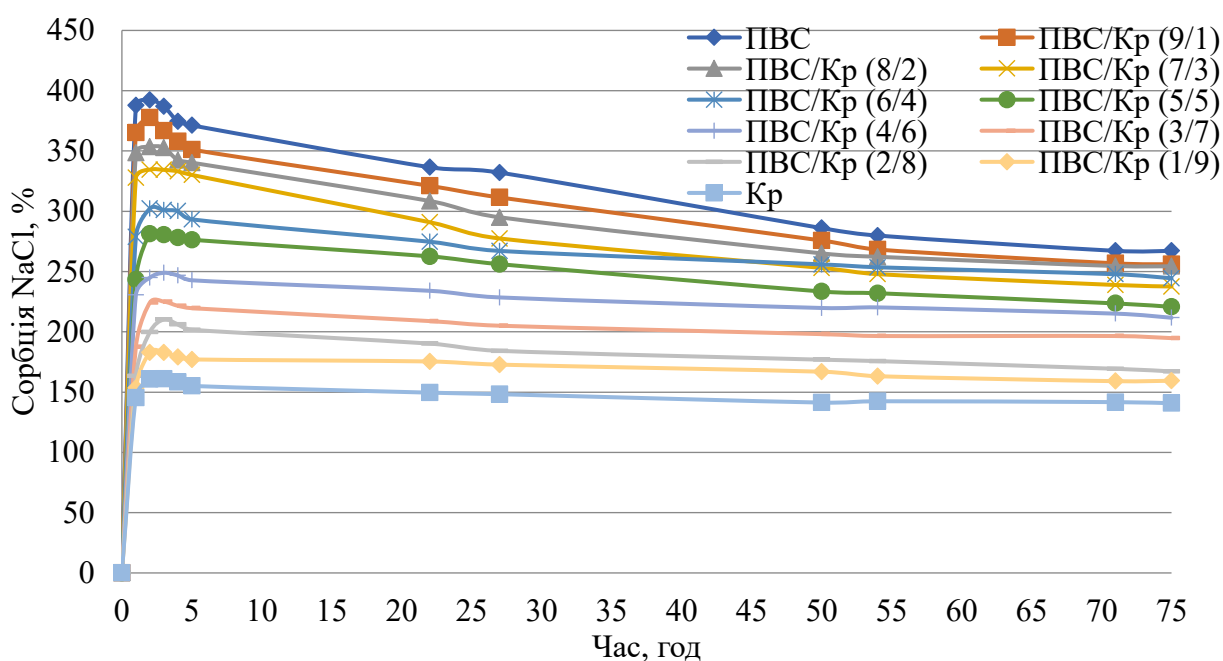
б)

Рис. 6.6. Сорбція дистильованої води для зразків плівкових матеріалів на основі композицій ПВХ/Кр (а) та ПВХ/КМК (б), модифікованих екстрактом кори дуба *Quercus cortex*.

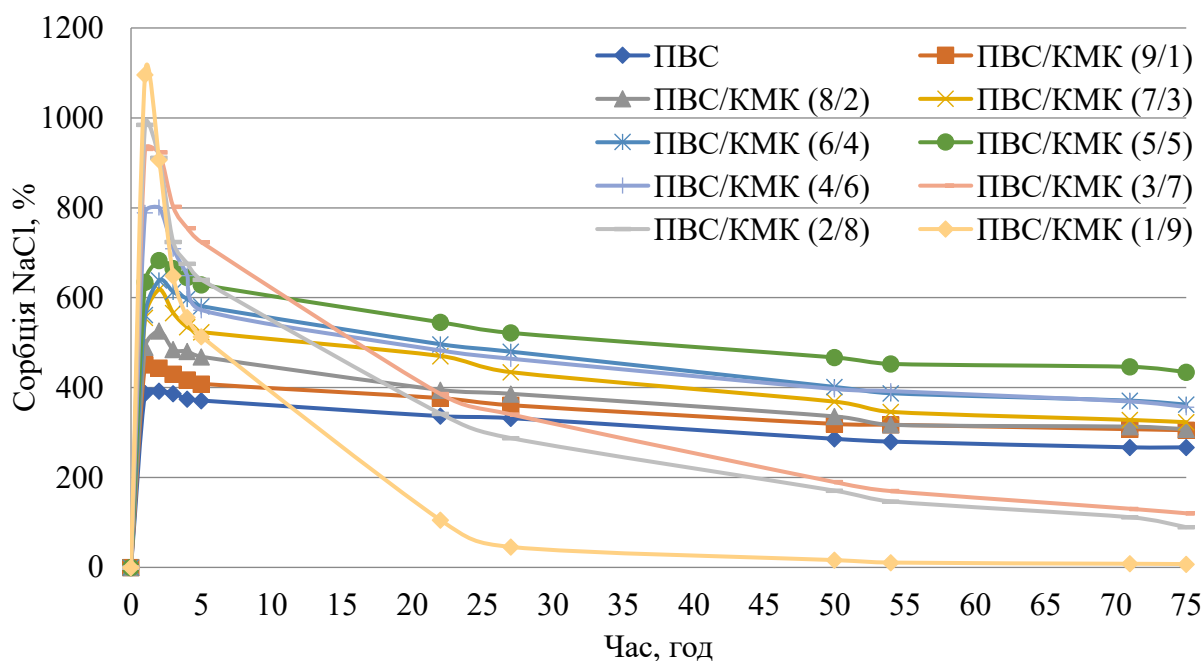
Аналіз експериментальних даних показує чітку залежність від складу системи. Чистий ПВХ характеризується найнижчими показниками сорбції — близько 120–150 %, що свідчить про його щільну структуру та обмежену гідрофільність. Додавання крохмалю у композиції ПВХ/Кр поступово

підвищує здатність до поглинання води: при співвідношенні 9/1 сорбція сягає приблизно 200 %, при 5/5 — близько 350 %, а при 2/8 перевищує 500 %. Максимальні значення спостерігаються для зразка з переважним вмістом крохмалю (1/9), де сорбція перевищує 600 %, що підтверджує ключову роль полісахаридного компонента у формуванні пористої структури.

У системах ПВС/КМК показники ще більш виражені: при співвідношенні 9/1 сорбція становить близько 400 %, при 5/5 — понад 1000 %, а при 2/8 та 1/9 досягає 2500–3000 %. Така різниця пояснюється наявністю карбоксильних груп у КМК, які активно утворюють водневі зв'язки та забезпечують утримання значних об'ємів води. Динаміка процесу демонструє швидке зростання сорбції у перші години експозиції з подальшим виходом на рівноважний стан, що відповідає насиченню внутрішньої структури матеріалів.



a)



б)

Рис. 6.7. Сорбція фізіологічного розчину NaCl для зразків плівкових матеріалів на основі композицій ПВС/Кр (а) та ПВС/КМК (б), модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*.

Аналіз результатів сорбційних досліджень плівкових матеріалів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, у фізіологічному розчині NaCl (рис. 6.7) показує суттєві відмінності у поведінці систем залежно від складу та природи полісахаридного компонента. Для чистого ПВС рівень сорбції не перевищує 90–100 %, що свідчить про його низьку здатність утримувати іонний розчин. У композиціях ПВС/Кр спостерігається поступове зростання показників: при співвідношенні 9/1 сорбція сягає близько 150 %, при 5/5 — близько 250 %, а при 2/8 — понад 300 %. Максимальні значення спостерігаються для зразка з переважним вмістом крохмалю (1/9), де сорбція наближається до 350–400 %, що підтверджує роль гідрофільних груп крохмалю у взаємодії з сольовим середовищем.

У системах ПВС/КМК показники значно вищі: при співвідношенні 9/1 сорбція становить близько 400 %, при 5/5 — понад 800 %, а при 2/8 та 1/9 сягає 1200–1500 %. Це пояснюється наявністю карбоксильних груп у КМК, які

здатні утворювати стабільні водневі та іонні взаємодії з молекулами води та іонами NaCl, що забезпечує утримання значних об'ємів розчину. Динаміка процесу демонструє різке зростання сорбції у перші години експозиції з подальшим поступовим зниженням, що може бути пов'язано з частковим виходом іонів у зовнішнє середовище та встановленням рівноважного стану.

Гідрогелі ПВС/Кр показали високу здатність до поглинання води до 1050%, тоді як плівки мали в половину нижчі значення до 500%. Подібні результати отримані [147] підтверджують, що сорбційна здатність бінарних сумішей ПВС/Кр визначається співвідношенням компонентів. Така поведінка пояснюється тим, що ПВС у порівнянні з Кр більшу кількість гідроксильних груп, здатних утворювати водневі зв'язки. За даними авторів [148] швидкість досягнення рівноваги для гідрогелів ПВС/Кр— 10–12 годин, тоді, як у нашій роботі вона становила 5 годин. Це може бути пояснено більш пористою структурою наших гідрогелів.

Аналіз систем ПВС/КМК показує, що їхня сорбційна здатність значно перевищує показники для композицій ПВС/Кр, що узгоджується з даними літератури. У нашій роботі гідрогелі ПВС/КМК досягали рівня набрякання понад 2500–3000 %, тоді як плівки мали нижчі значення — до 1200–1500 %. Така різниця пояснюється наявністю карбоксильних груп у КМК, які здатні утворювати численні водневі та іонні взаємодії, що забезпечує утримання значних об'ємів води. Подібні результати наведені у дослідженні [149], де показано, що ступінь набрякання гібридних гідрогелів ПВС/КМК може варіювати від 100 % до понад 5000 % залежно від співвідношення компонентів та умов синтезу.

Таким чином, кількісний аналіз підтверджує, що сорбційна здатність матеріалів у фізіологічному розчині прямо залежить від частки полісахаридного компонента, причому КМК забезпечує значно вищі показники порівняно з крохмалем. ПВС/Кр системи є найбільш стабільними в умовах фізіологічного розчину, що робить їх більш перспективними для застосування, де необхідна структурна цілісність (наприклад, перев'язувальні

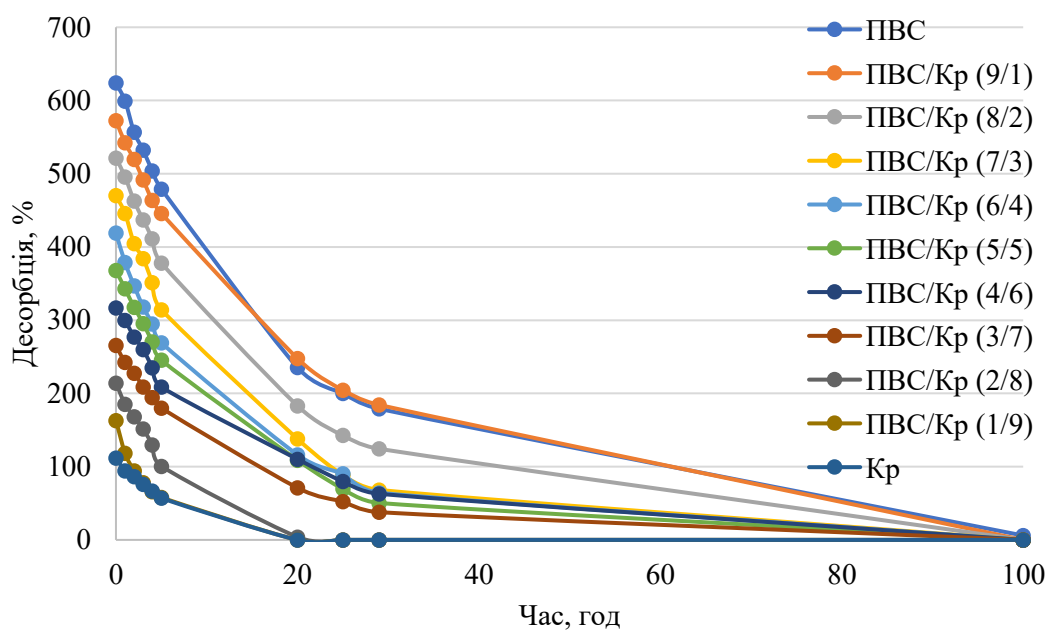
матеріали, що контрольовано вивільняють активні речовини). ПВС/КМК системи є високочутливими до середовища (дуже висока сорбція у воді, розчинення у сольовому розчині), що може бути використано для систем, де потрібне швидке розкладання або контрольоване руйнування в залежності від концентрації солей

### **6.5 Визначення десорбційної здатності гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих екстрактом кори дуба *Quercus cortex***

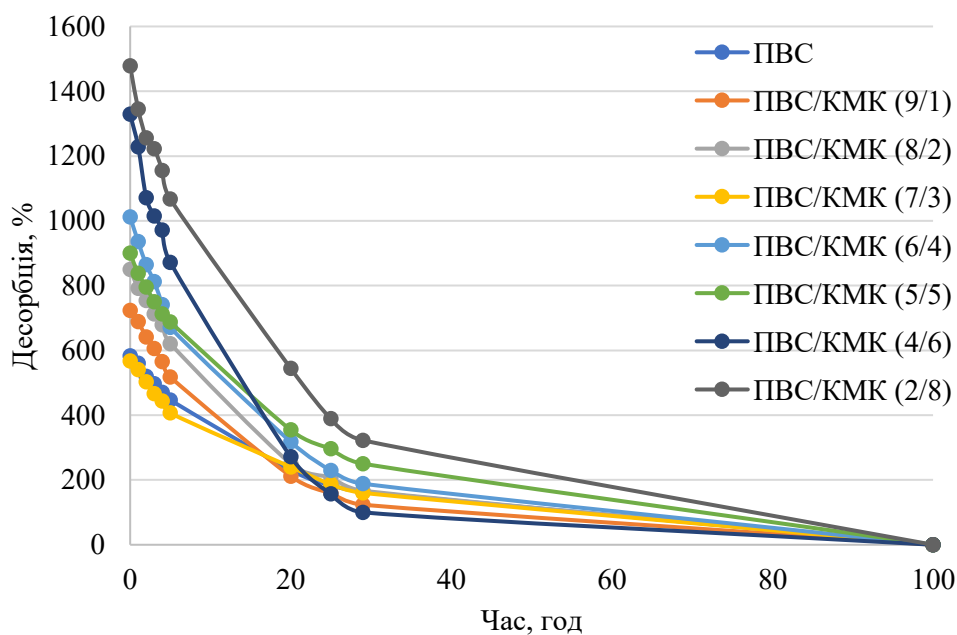
Кінетику дегідратації гідрогелевих матриць на основі композитів ПВС/Кр та ПВС/КМК, що містять водно-рослинний витяг *Quercus cortex*, оцінювали в процесі їхнього контрольованого висушування. Графічне відображення динаміки зміни вмісту вологи в полімерних структурах залежно від тривалості експерименту представлено на рисунку 6.8.

Для всіх тестованих композицій характерна максимальна інтенсивність вологовіддачі в інтервалі перших 20–30 годин. Цей етап зумовлений активним випаровуванням вільної, а також слабоасоційованої фракцій води із міжсіткового простору. У подальшому спостерігається виражене виположування кінетичних кривих, що вказує на суттєве гальмування процесів десорбції.

Гідрогелі ПВС/КМК, модифіковані водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* (рис. 6.8 *b*) мають значно вищі початкові значення десорбції 1500 %, ніж гідрогелі ПВС/Кр (рис.6.8 *a*) до 620 %. Це пряме відображення вищої сорбційної здатності гідрогелів ПВС/КМК через вміст КМК, що призводить до більшого вмісту води, яку вони можуть втратити. Хоча гідрогелі ПВС/КМК втрачають більше води, гідрогелі ПВС/Кр показують відносно швидше падіння кривої до нуля порівняно з деякими високосорбуючими гідрогелями ПВС/КМК у співвідношенні 2/8, які зберігають значний відсоток води до 20-30 годин.



a)



б)

Рис. 6.8. Десорбція зразків гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр (а) та ПВС/КМК (б), модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*

Серед гідрогелевих композитів ПВС/КМК, що містять рослинний витяг *Quercus cortex*, мінімальна швидкість десорбції притаманна зразкам із максимальним масовим вмістом КМК (80%). Дана композиція відзначається найбільш пролонгованим утриманням вологи, що зумовлено ефективним її

зв'язуванням іоногенними фрагментами КМК та формуванням більш щільної міжмолекулярної сітки. Натомість збільшення частки ПВС у цих матрицях інтенсифікує процеси десорбції.

Для систем на основі ПВС/Кр характерний інший характер кінетики: найвища швидкість дегідратації спостерігалася для чистого крохмалю, а також модифікованих екстрактом зразків із високою концентрацією Кр (до 90%). У цих системах повна втрата вологи фіксувалася вже орієнтовно за 20 годин експерименту. Така динаміка вказує на переважання слабкозв'язаної фракції води в структурі Кр, яка легко піддається випаровуванню. Водночас у межах цієї групи зразки зі співвідношенням ПВС/Кр 9/1 виявили здатність не лише до максимального вологовбирання, а й до найдовшого її утримання. Це підтверджує, що саме полівініловий спирт, збагачений компонентами дубового екстракту, виступає базовим структурним елементом, який забезпечує міцне утримування води в системі ПВС/Кр.

Таким чином гідрогелі ПВС/КМК 2/8, модифіковані водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, є найкращими зразками з точки зору максимального поглинання та найдовшого утримання вологи. Гідрогелі ПВС/Кр, модифіковані водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, демонструють меншу здатність до утримання вологи загалом, і їхня поведінка десорбції в основному визначається вмістом ПВС. Отже гідрогелі ПВС/КМК, модифіковані водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, особливо з високим вмістом КМК, є ефективнішими не лише для поглинання, а й для утримання великої кількості води протягом тривалого часу, що є важливим для застосувань у фармації, біомедицині та стоматології.

#### **6.6 Визначення фізико-механічних властивостей плівкових матеріалів та гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex***

На рис. 6.9 наведено залежність руйнівної напруги при розтягуванні для плівок та гідрогелів на основі ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, від вмісту полісахаридів.

Залежність на рис. 6.9 демонструє значну різницю у механічній міцності між плівками та гідрогелями, а також залежність цієї міцності від типу та вмісту полісахариду.

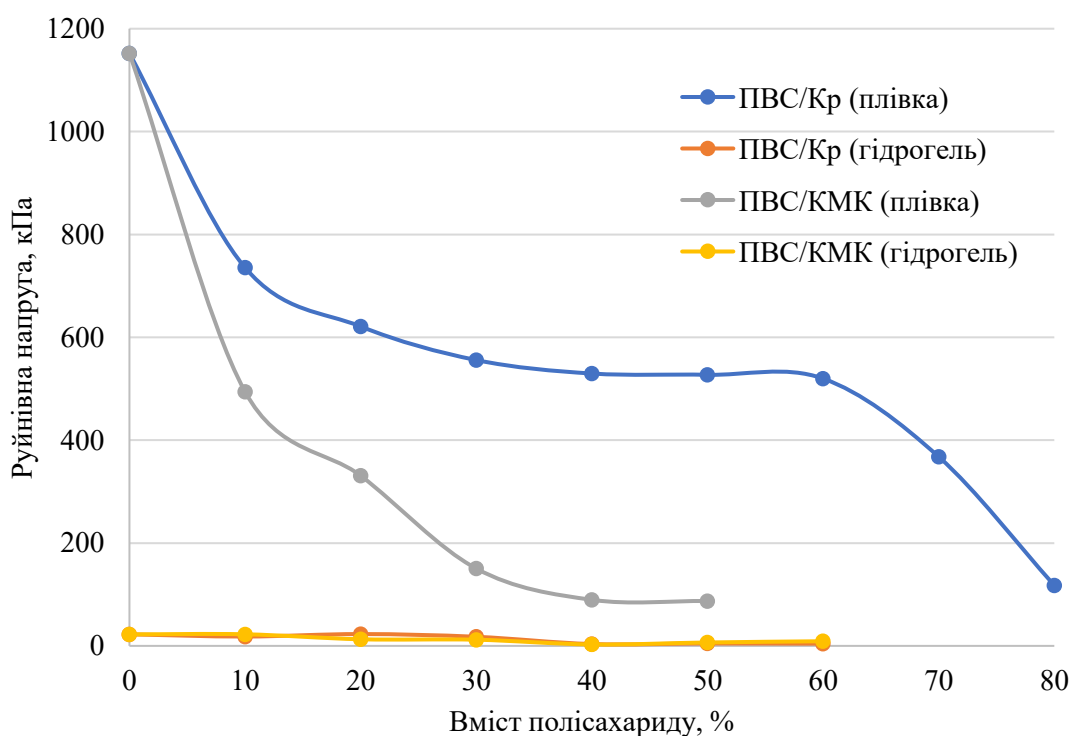


Рис. 6.9. Залежність руйнівної напружки при розтягуванні від вмісту полісахаридів для плівкових матеріалів та гідрогелів на основі ПВХ/Кр та ПВХ/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*

Руйнівна напружка плівок на основі полісахаридів, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, становить 100 – 1170 кПа, що є на порядки вищою за руйнівну напружку відповідних гідрогелів, яка становить 0 - 20 кПа, оскільки гідрогелі містять велику кількість води, що робить їх м'якими та еластичними, тоді як сухі плівки мають жорстку макромолекулярну сітку. Для гідрогелів на основі композицій ПВХ/Кр та ПВХ/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* руйнівна напружка несуттєво змінюється при зміні співвідношення полісахаридів.

Плівки на основі композицій ПВХ/Кр та ПВХ/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, демонструють значно вищу

руйнівну напругу ніж гідрогелі, так для плівок ПВС/Кр руйнівна напруга становить 370 - 1170 кПа, а для плівок ПВС/КМК 80 - 1170 кПа у всьому дослідженому діапазоні вмісту полісахаридів. Це свідчить про те, що крохмаль Кр краще інтегрується у сітку ПВС або формує міцнішу композиційну структуру з ПВС, ніж КМК.

Отже, збільшення вмісту полісахариду для композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, у плівках призводить до значного зниження руйнівної напруги для обох систем. Так для плівок ПВС/Кр, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, руйнівна напруга різко знижується при додаванні до 100% ПВС від 1170 кПа до 530 кПа при 40 % вмісті Кр, залишається стабільною до 60 %, а потім продовжує падати до 130 кПа при 80 % вмісту Кр. Для плівок ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, руйнівна напруга також різко падає при додаванні в систему КМК 40-50 % до 80 кПа.

Отже, введення у композиції на основі ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, значно знижують міцність плівок, причому КМК має більш деструктивний вплив на механічну міцність, ніж Кр.

Таким чином, враховуючи показники міцності, всі гідрогелі на основі ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифіковані водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* можуть рекомендуватися, як м'які та еластичні біомедичні гідрогелі.

На рис. 6.10 наведено залежність відносного видовження при розриві від вмісту полісахаридів для плівкових матеріалів та гідрогелів, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*.

Для всіх зразків спостерігається чіткий максимум еластичності при низьких концентраціях полісахаридів, після чого видовження різко падає. Для всіх чотирьох зразків максимальне видовження досягається при 10-20% вмісту полісахариду і становить 135-185 %. Можливо це пов'язане з тим, що додавання невеликої кількості полісахариду, ймовірно, покращує сумісність

або вносить гнучкіші елементи в полімерну сітку ПВС, забезпечуючи оптимальну гнучкість.

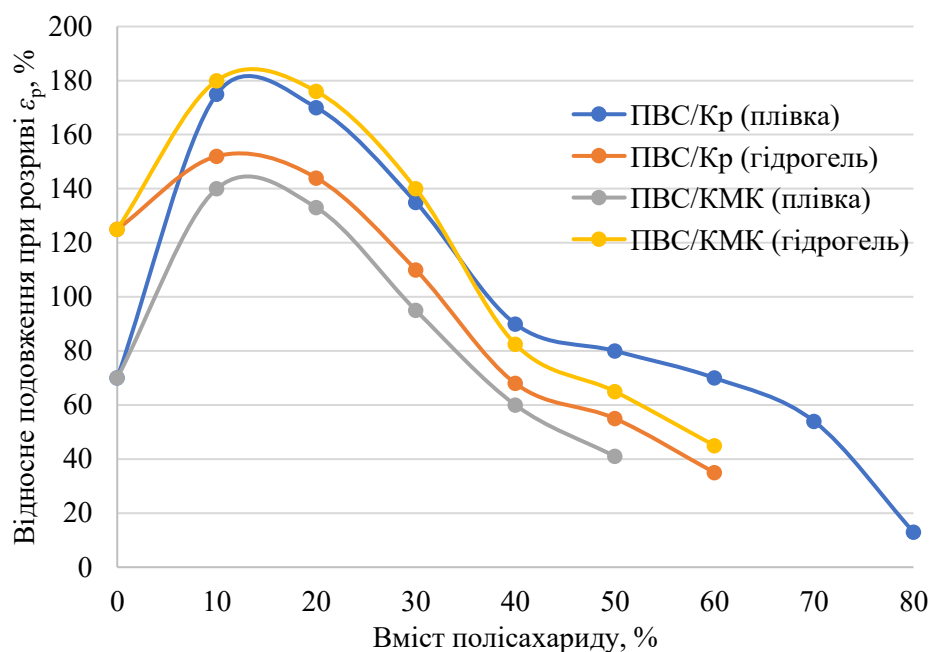


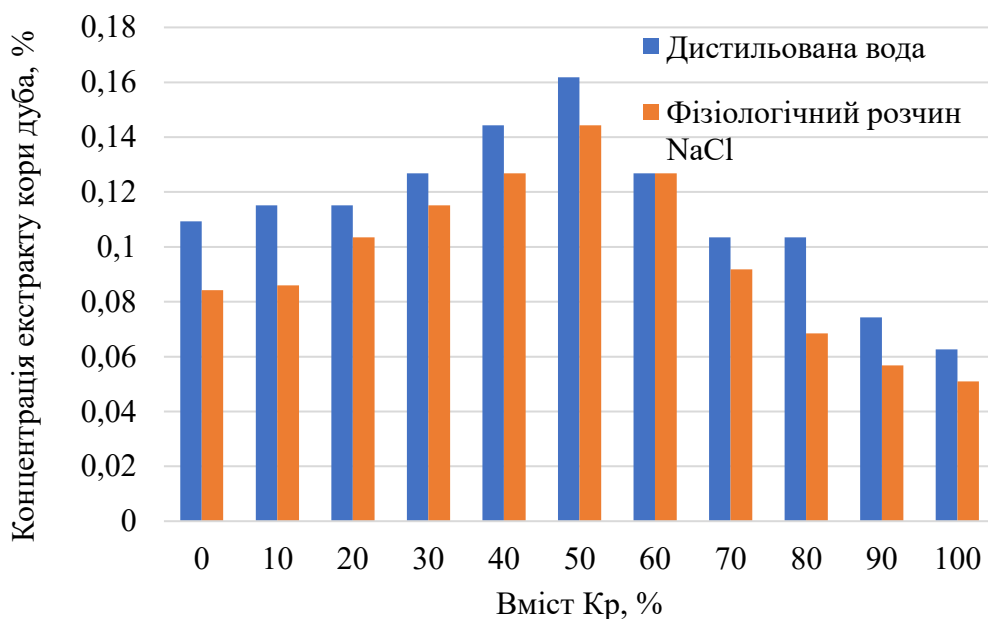
Рис. 6.10. Залежність відносного видовження при розриві від вмісту полісахаридів для плівкових матеріалів та гідрогелів на основі ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*

При вмісті полісахариду від 60 до 80 % еластичність падає до мінімальних значень 10-45 %, вказуючи на те, що при високій кількості полісахаридів Кр та КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, вони поведуть себе як жорсткі та крихкі наповнювачі, що перешкоджає рівномірній деформації сітки ПВС.

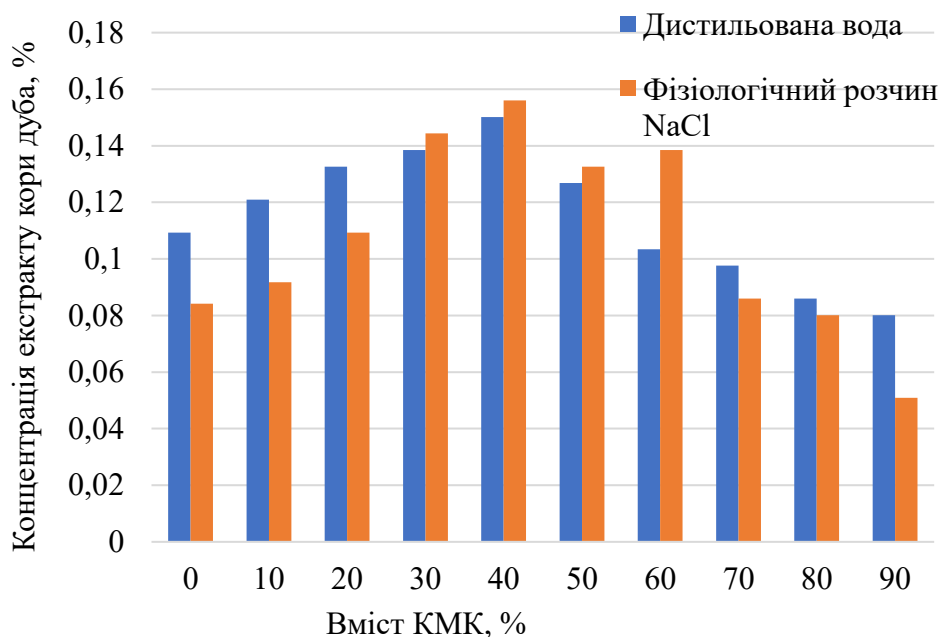
Отже, найкраща еластичність для всіх композитів, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, досягається при низькому вмісті полісахариду 10-20 %. При цьому, гідрогелі ПВС/КМК є найеластичнішими серед усіх дослідних форм, що робить їх найбільш придатними для застосувань у формі м'яких біомедичних засобів.

### 6.7 Дослідження вивільнення екстракту кори дуба *Quercus cortex* з плівок та гідрогелів на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих екстрактом кори дуба *Quercus cortex*

Шляхом застосування оптичної спектроскопії оцінено кінетику дифузії фітоекстракту з кори дуба (*Quercus cortex*) у водне середовище (дистильовану воду) та ізотонічний розчин NaCl. Об'єктом дослідження виступали полімерні гідрогелеві матриці на основі композитів ПВС/Кр (рис. 6.11, а) та ПВС/КМК (рис. 6.11, б), які були модифіковані відповідним рослинним витягом.



a)



б)

Рис. 6.11. Залежність вивільнення екстракту кори дуба *Quercus cortex* через 24 години від вмісту полісахаридів для гідрогелів на основі ПВС/Кр (а) та ПВС/КМК (б), модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*

Гідрогелі на основі композицій ПВС/Кр, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* (рис. 6.11 а) демонструють вищий пік вивільнення екстракту кори дуба *Quercus cortex* у воді до 0,16 % при вмісті Кр 50 % порівняно з гідрогелями на основі композицій ПВС/КМК (рис. 6.11 б) - до 0,15 % при вмісті КМК 40 %. Гідрогелі ПВС/Кр демонструють краще вивільнення екстракту кори дуба *Quercus cortex*, особливо при високих концентраціях полісахариду від 70 % і вище, а гідрогелі ПВС/КМК мають більш різке падіння вивільнення.

У більшості випадків вивільнення екстракту кори дуба *Quercus cortex* у дистильованій воді є вищим, ніж у фізіологічному розчині NaCl. Для гідрогелів ПВС/КМК спостерігається кілька точок, де вивільнення у фізіологічному розчині NaCl перевищує вивільнення у воді при 40 % та 60 % КМК. Це може бути пов'язано з іонними взаємодіями між карбоксильними групами КМК, іонами Na<sup>+</sup> та компонентами екстракту кори дуба *Quercus*

*cortex*, які можуть сприяти вимиванню екстракту з полімерної матриці у цих конкретних співвідношеннях.

Оптимальне вивільнення для обох систем спостерігається при середніх концентраціях полісахаридів 30-60 % полісахариду. При високому вмісті полісахариду 80-100 % спостерігається різке падіння вивільнення екстракту кори дуба *Quercus cortex* для обох систем. Це, ймовірно, пов'язано з меншим набуханням, особливо гідрогелів ПВС/Кр та/або сильнішим зв'язуванням екстракту кори дуба *Quercus cortex* з полімерною матрицею, що запобігає його ефективному вимиванню.

Отже, обидві системи гідрогелів демонструють кероване вивільнення екстракту кори дуба *Quercus cortex*. Найвища концентрація екстракту кори дуба *Quercus cortex* через 24 години досягаються при середньому вмісті полісахаридів 40-50 %, причому система ПВС/Кр є дещо ефективнішою для вивільнення екстракту кори дуба *Quercus cortex* ніж ПВС/КМК. Вивільнення пригнічується у фізіологічному розчині NaCl для більшості складів.

## **6.8 Опортуністичні бактерії *Staphylococcus*, *Pseudomonas*, *Escherichia* у стоматології**

Первинна етіологія карієсу та пародонтиту пов'язана з представниками роду *Streptococcus* та анаеробними пародонтопатогенами, однак опортуністичні мікроорганізми, такі як *Staphylococcus*, *Pseudomonas* та *Escherichia*, відіграють значну та часто небезпечну роль у стоматології. Їх небезпека, як правило, проявляється у формі вторинних інфекцій, а саме в утворенні біоплівки на абіотичних поверхнях та ускладнень після хірургічних втручань.

*S. aureus* це група бактерій, які є частиною нормальної мікрофлори шкіри та слизових оболонок людини. Більшість з них є умовно-патогенними, тобто не викликають проблем, поки імунна система працює належним чином. Однак, за певних умов, стафілококи можуть стати причиною серйозних інфекцій. *S. aureus* є частим збудником який може розповсюджуватися у госпітальному та амбулаторному середовищі і створювати серйозну проблему для лікування

стоматологічних інфекцій, оскільки є причиною формування абсцесів у щелепно-лицевій хірургії. *P. aeruginosa* це група бактерій, які широко поширені в навколишньому середовищі, особливо у воді та ґрунті. У ротовій порожнині вони зазвичай не є домінуючими, але можуть стати проблемою для людей зі зниженим імунітетом, хронічними захворюваннями або після тривалого прийому антибіотиків. *P. aeruginosa* демонструє високу здатність до адгезії та формування біоплівки на вологих поверхнях стоматологічного обладнання (наприклад, у водопровідних лініях стоматологічних установок), що може призводити до контамінації. Хоча *E. coli* є переважно представником факультативної мікрофлори кишківника, його присутність у ротовій порожнині зазвичай свідчить про вторинну контамінацію або порушення гігієни. Як опортуніст, *E. coli* може бути присутня у полімікробних інфекціях одонтогенного походження, абсцесів та інфікування післяопераційних ран, особливо у пацієнтів зі значними супутніми захворюваннями. Також представники *E. coli* часто несуть генерезистентності, що ускладнює вибір емпіричної антибіотикотерапії.

Слід зазначити, що усі представники обраних тест-культур *Staphylococcus*, *Pseudomonas* та *Escherichia* проявляють високою здатністю до адгезії та формування біоплівки, що є ключовим механізмом, який забезпечує їхню виживаність та високу резистентність до антибіотиків та імунної відповіді в умовах стоматологічних інфекцій, особливо на поверхні біоматеріалів та в глибоких ранових процесах.

## **6.9 Визначення чутливості тест-культур до екстракту кори дубу з використанням резазурину**

У роботі проаналізовано антибактеріальний потенціал водного витягу з кори дуба (КД) щодо таких тест-штамів, як *S. aureus* ATCC 25923, *E. coli* ATCC 25922 та *P. aeruginosa* PA01. Наведені на рис. 6.12 результати демонструють характер дії цього екстракту на життєздатність та метаболізм зазначених еталонних мікроорганізмів.

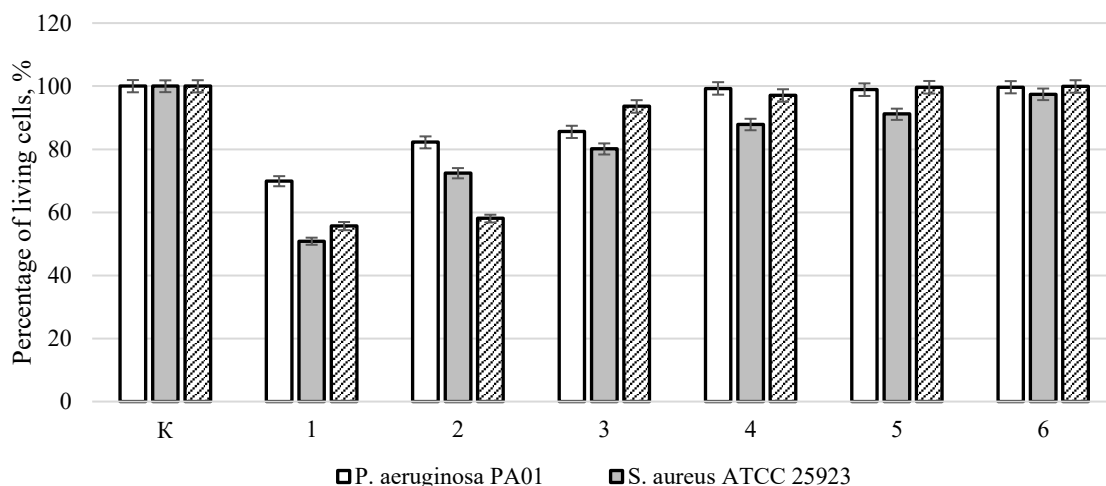


Рис. 6.12. Зміна метаболізму тест-штамів (*S. aureus* ATCC 25923, *E. coli* ATCC 25922, *P. aeruginosa* PA01) під дією витягу з кори дуба. Позначення на діаграмі: К — контрольний зразок (інкубація мікроорганізмів у чистому поживній бульйоні NB); 1 — культивування на основі стовідсоткового водного екстракту КД; 2–6 — варіації дослідних зразків із різним об'ємним вмістом екстракту у середовищі NB, а саме: 2 — половина об'єму (50%), 3 — одна п'ята (20%), 4 — десята частина (10%), 5 — 5% та 6 — 1% відповідно.

Графічні дані підтверджують антибактеріальний ефект водного витягу з кори дуба (КД) щодо вибраних тест-штамів, причому ступінь пригнічення прямо залежить від дози препарату в інкубаційному середовищі.

Найменшу чутливість до діючої речовини в усьому діапазоні концентрацій виявила культура *P. aeruginosa* PA01. Така резистентність, ймовірно, зумовлена її високим стресовим потенціалом та схильністю до формування захисних біоплівки. Проте навіть для цього мікроорганізму зафіксовано падіння метаболізму: чистий екстракт знижує його активність приблизно на 30%, тоді як додавання 50% та 20% КД до поживного субстрату послаблює життєздатність клітин на 18% і 14% відповідно.

Для грамнегативних паличок *E. coli* ATCC 25922 критичними виявилися максимальні дози (50% та 100% вмісту екстракту), за яких виживаність популяції знижувалася до 42–44%. Своєю чергою, нижчі концентрації КД практично не чинили помітного деструктивного впливу на даний штам.

Найвищий рівень супресії метаболічних процесів продемонстрував грампозитивний штам *S. aureus* ATCC 25923, який зреагував на всі протестовані розведення. Зокрема, присутність лише 5% водного екстракту призвела до зменшення кількості життєздатних клітин майже на 8%, а культивування на нерозведеному витягу знизило метаболічний показник золотистого стафілокока до 48%.

Отримані результати підкреслюють здатність водного екстракту КД ефективно лімітувати розвиток *S. aureus* ATCC 25923 у концентраційних межах від 5% до 50%. Цей факт має вагоме прикладне значення для клінічної стоматології, оскільки цей збудник часто виступає тригером гострих запалень та ускладнень після хірургічних маніпуляцій у ротовій порожнині.

#### **6.10 Визначення впливу екстракту кори дубу на антиадгезивні властивості тест-культур**

Здатність мікроорганізмів до адгезії виступає базовим чинником їхньої вірулентності, визначаючи початковий етап патогенезу більшості інфекційних патологій ротової порожнини. У специфічних умовах орального біотопу саме цей механізм забезпечує закріплення мікрофлори як на біотичних субстратах (емалі, дентині, цементі зубів, а також яснах та слизовій оболонці), так і на штучних конструкціях (ортопедичних протезах, імплантатах). Подальша фіксація бактерій ініціює архітектоніку біоплівки, де клітини виявляються захищеними потужним екзополісахаридним матриксом, що суттєво ускладнює санацію та провокує хронізацію запалення. З огляду на це, актуальним завданням було з'ясувати характер модифікуючого впливу водного екстракту КД на адгезивний потенціал вибраних тест-штамів.

Згідно з експериментальними даними, наведеними на рис. 6.13, внесення 50% водного екстракту КД пригнічує фіксаційні властивості всіх досліджуваних мікроорганізмів.

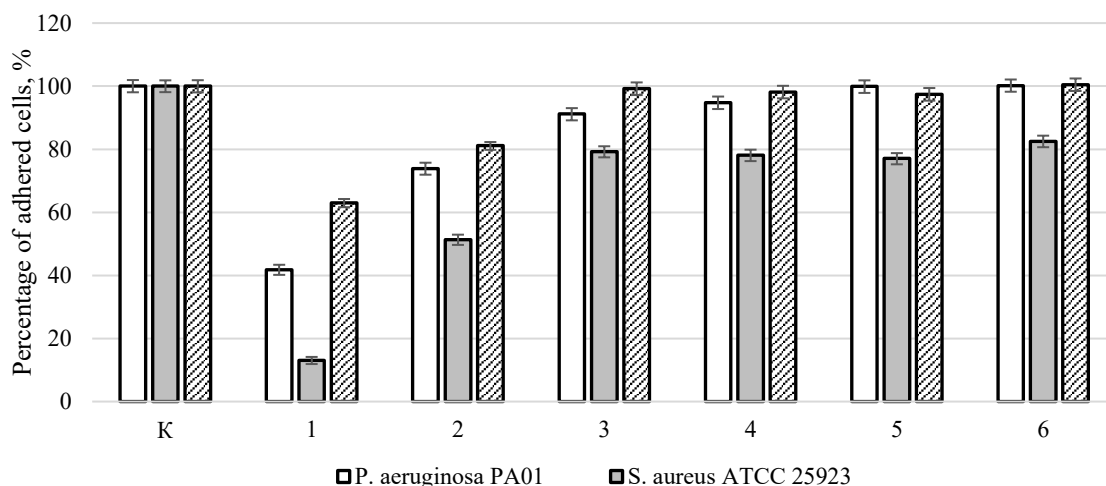


Рис. 6.13. Модифікація адгезивного потенціалу тест-штамів під впливом водного витягу з кори дуба. Експериментальні умови: К — контроль (культивування мікроорганізмів у базовому середовищі NB); 1 — інкубація на основі чистого водного екстракту КД; зразки 2–6 — варіації поживного бульйону NB із додаванням різних об'ємних часток екстракту: 2 — 50%, 3 — 20%, 4 — 10%, 5 — 5% та 6 — 1%. Тест-системи: *S. aureus* ATCC 25923, *E. coli* ATCC 25922, *P. aeruginosa* PA01.

Найбільш виражений ефект зафіксовано у грамнегативних представників — *P. aeruginosa* PA01 та *E. coli* ATCC 25922, чий рівень адгезії знизився до 74% та 81% відповідно. Натомість вищі розведення (нижчі концентрації) рослинного витягу практично не чинили інгібуючого впливу на здатність зазначених грамнегативних паличок закріплюватися на поверхні. Водночас додавання водного екстракту КД продемонструвало стабільно високу ефективність щодо блокування адгезивних властивостей грампозитивного штаму *S. aureus* ATCC 25923.

Аналіз даних рисунка 6.13 свідчить, що присутність у середовищі культивування *S. aureus* ATCC 25923 водного витягу кори дуба в межах від 1% до 20% призводить до втрати фіксуєної здатності популяції приблизно на одну п'яту (20%). Збільшення частки екстракту до 50% забезпечує дворазове зниження кількості прикріплених до поверхні бактеріальних клітин. Найбільш виражене пригнічення зафіксовано за умов використання нерозведеного рослинного засобу, де здатність до поверхневої інтеграції зберегли лише 13% клітин стафілокока.

Умовно-патогенні представники родів *Staphylococcus*, *Escherichia* та *Pseudomonas* належать до ключових етіологічних чинників виникнення оральних інфекцій, зокрема у формі післяопераційних запалень та колонізації штучних матеріалів через утворення стійких біоплівки. Проведені експерименти підтвердили наявність вираженого дозозалежного антибактеріального потенціалу водного екстракту КД щодо тест-штамів *S. aureus* ATCC 25923, *E. coli* ATCC 25922 та *P. aeruginosa* PA01.

Максимальну сприйнятливість до діючої речовини продемонстрував грампозитивний штам *S. aureus* ATCC 25923, у якого навіть за помірного вмісту витягу (5–50%) метаболізм пригнічувався до рівня 48–50%. Грамнегативна паличка *E. coli* ATCC 25922 виявила помірну чутливість, реагуючи на присутність фітопрепарату лише у високих концентраціях (від 50% до 100%), тоді як мікроорганізм *P. aeruginosa* PA01 виявився найбільш резистентним, зберігши понад 70% життєздатного пулу клітин.

Паралельно встановлено здатність екстракту кори дуба модифікувати процеси первинної міжклітинної взаємодії та прикріплення бактерій. Цей ефект був найпомітнішим на прикладі золотистого стафілокока: за умов 50%-го розведення кількість адгезованих клітин зменшилася наполовину, а в чистому екстракті цей показник упав до 13%. Для культур *P. aeruginosa* PA01 та *E. coli* ATCC 25922 антиадгезивна дія виявилася менш інтенсивною, проте фіксаційний потенціал цих грамнегативних тест-штамів також зазнав певного зниження.

Узагальнені висновки доводять наявність у водного екстракту КД збалансованих протимікробних та антиадгезивних характеристик, які найяскравіше виявляються стосовно грампозитивного патогену *S. aureus* ATCC 25923. Отримані дані відкривають реальні перспективи для впровадження дубового екстракту як природного антисептика при створенні біосумісних стоматологічних матеріалів, спрямованих на превенцію інфекційних ускладнень.

## Висновки до розділу 6

Дослідження впливу екстракту кори дуба *Quercus cortex* на властивості полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів на основі ПВС/Кр і ПВС/КМК показали комплексну зміну їхніх реологічних, фізико-хімічних та сорбційних характеристик.

Для систем ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, зі співвідношенням 9/1–3/7 індекс течії становить  $n=0,46-0,92$ , що відповідає псевдопластичній поведінці. При збільшенні частки крохмалю до 80–100 % значення  $n$  зростає до 1,20–1,98, а коефіцієнт консистенції  $K$  досягає 9,45–13,26, що свідчить про дилатантну поведінку. Для систем ПВС/КМК, модифікованих екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, при співвідношенні 9/1–6/4  $n=0,89-0,94$ .

Початковий вологовміст для гідрогелів на основі ПВС/Кр, модифікованих екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, знижується зі збільшенням частки крохмалю. А для ПВС/КМК – зі збільшенням КМК вологовміст зростає.

Плівки на основі композицій ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, мають густину 1,10–1,35 г/см<sup>3</sup>, тоді як гідрогелі – лише 1,01–1,04 г/см<sup>3</sup>. Максимальна густина плівок ПВС/Кр становить 1,35 г/см<sup>3</sup> при 70 % крохмалю, що на 7,4 % вище за максимальну густину плівок ПВС/КМК (1,24–1,25 г/см<sup>3</sup>). Для гідрогелів зміни густини мінімальні – від 1,02 до 1,04 г/см<sup>3</sup>.

У дистильованій воді гідрогелі ПВС/КМК, збагачені екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, досягають сорбції 2200 % при співвідношенні 2/8, тоді як ПВС/Кр – лише 80–670 %. У фізіологічному розчині NaCl сорбція ПВС/КМК знижується до 680–1060 %, але все одно перевищує ПВС/Кр (90–650 %). Найвища сорбція у фізіологічному розчині спостерігається для ПВС/КМК при 80 % КМК – 1060 %, тоді як для ПВС/Кр максимальне значення становить 650 %.

Екстракт кори дуба *Quercus cortex* є ефективним модифікатором полімерних систем, забезпечуючи регульовані реологічні властивості, зміну вологовмісту, густини та сорбційної здатності. Це відкриває перспективи створення матеріалів стоматологічного та фармацевтичного призначення з оптимальним балансом між технологічною оброблюваністю, механічною стійкістю та функціональністю.

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішено важливе науково-практичне завдання, яке полягає у розширенні асортименту вітчизняних полімерних плівкових матеріалів та гідрогелів стоматологічного призначення на основі біосумісних та біорозкладних полімерних композицій, модифікованих глиною монтморилонітового типу та фітоекстрактами кропиви дводомної *Urtica dioica* та кори дуба *Quercus cortex*.

1. На основі аналізу сучасного стану розвитку терапевтичної стоматології підтверджено недостатню ефективність традиційних гелів і мазей для лікування запальних процесів пародонта в умовах зростаючої антибіотикорезистентності. Обґрунтовано перспективність розроблення вітчизняних біодеградабельних полімерних плівок та гідрогелів стоматологічного призначення комбінованої дії на основі фітоекстрактів.

2. Науково обґрунтовано склад полімерних композицій ПВС/КМК у співвідношенні 5/5 та 6/4 для створення гідрогелів з високою міцністю  $\approx 0,37$  МПа та відносним видовження в межах 457% для перспектив використання в стоматологічній практиці.

3. Досліджено модифікуючий вплив глини монтморилонітового типу на структурні та фізико-механічні властивості отриманих композицій ПВС/КМК у співвідношенні 5/5, який полягає у виникненні ефекту колапсу гідрогелів. При цьому встановлено, що додавання 1–5 об. ч. глини монтморилонітового типу знижує сорбцію на 700%, уповільнює випаровування вологи та пролонгує час висихання кріогідрогелів. Для використання в стоматологічній практиці рекомендовано модифікацію ПВС/КМК 1-2 об'ємними частинами глини монтморилонітового типу.

4. Розроблені рекомендації для створення гідрогелів модифікованих водним екстрактом кропиви дводомної *Urtica dioica* на основі ПВС/Кр у співвідношенні 6/4 та 7/3 з ступенем сорбції 935–1170%.

5. Встановлено, що у композиціях ПВС/Кр та ПВС/КМК, модифікованих водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex*, відбувається перехід від псевдопластичного до дилатантного типу течії зі зменшенням частки

Кр від 7 об'ємних частин та КМК від 4 об'ємних частин. При цьому доведено, що модифікація полімерних пліткових матеріалів та гідрогелів водним екстрактом кори дуба *Quercus cortex* забезпечує міцність плівок ПВС у межах 1170 кПа, а гідрогелів — до 20 кПа з еластичністю 135-185 % при 10-20 % вмісту полісахаридів.

6. Встановлено, що пліткові матеріали у співвідношенні ПВС/Кр та ПВС/КМК 6/4 та 5/5, модифіковані екстрактом кори дуба *Quercus cortex* поєднують високу сорбційну здатність і міцність із максимальним вивільненням фітоекстракту 0,15–0,16 %.

7. В результаті дослідження чутливості тест-культур до водного екстракту кори дуба *Quercus cortex*, підтверджено пролонговану антимікробну дію, біосумісність та здатність розроблених матеріалів пригнічувати метаболізм і адгезію *Staphylococcus aureus*, що відкриває широкі перспективи їх застосування у стоматологічній практиці та біомедичних технологіях.

8. Проведена апробація полімерних плівок та гідрогелів на основі ПВС/Кр та ПВС/КМК у клінічній практиці стоматологічної клініки AND, яка підтвердила перспективність використанням плівки ПВС/КМК на основі водного екстракту кори дуба *Quercus cortex* у співвідношенні 2/8, гідрогеля наповненого глиною монтморилонітового типу ПВС/КМК:глина 8/2 та гідрогеля ПВС/Кр на основі екстракту кори дуба *Quercus cortex* у співвідношенні 5/5.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Maslii Y., Herbina N., Dene L., Ivanauskas L., Matulis G., Bernatoniene J. Mucoadhesive polymeric film with plant-based compounds for dental applications: formulation, characterization and evaluation. *Pharmaceutical Development and Technology*. 2025; 30(4): 505–520. <https://doi.org/10.1080/10837450.2025.2498368>
2. Bolukbasi N., Ozdemir T., Oksuz L., Gurler N. Bacteremia following dental implant surgery: Preliminary results. *Med. Oral Patol. Oral Cir. Bucal*. 2012; 17: e69–e75
3. Carrillo-Serradell L, Liu-Tindall J, Planells-Romeo V, Aragón-Serrano L, Isamat M, Gabaldón T, Lozano F, Velasco-de Andrés M. The Human Mycobiome: Composition, Immune Interactions, and Impact on Disease. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025; 26(15):7281. <https://doi.org/10.3390/ijms26157281>
4. Tahsin K.N.; Rizkalla A.; Charpentier P. Antimicrobial Materials Used in Coating Dental Implant Surfaces: State of the Art and Future Prospectives. *Materials*. 2026; 19: 403. <https://doi.org/10.3390/ma19020403>
5. Jiao Y., Niu L.N., Ma S., Huang J., Liu Y., Wang J., Chen J.H., Tay F.R. Quaternary ammonium-based biomedical materials: State-of-the-art, toxicological aspects and antimicrobial resistance. *Progress in Polymer Science*. 2017; 71: 53-90. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.03.001>
6. Beyth N., Farah S., Domb A.J., Weiss E.I. Antibacterial dental plastics. *Polymers for Advanced Technologies*. 2014; 25(11): 1237-1243. <https://doi.org/10.1002/pat.3332>
7. Schwendick F, Frencken J.E, jørndal L, Maltz M, Manton D.J, Ricketts D, Van Landuyt K, Banerjee A, Innes N.P, Managing carious lesions: consensus recommendations on carious tissue removal. *Advances in Dental Research*. 2016; 28(2): 58-67. <https://doi.org/10.1177/0022034516639271>
8. Zhang K, Melo M.A, Cheng L, Weir M.D, Bai Y, Xu H.H, Effect of quaternary ammonium and silver nanoparticle-containing adhesives on dentin bond strength

- and dental plaque microcosm biofilms. *Dental Materials*. 2012; 28(8): 842-52.  
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2012.04.027>
9. Cheraghiyan M. Nanotechnology in dentistry: Potential applications and future perspectives. *Journal of Oral and Dental Health Nexus*, 2025, 2.1: 1-13
10. Yuchen Liu, Nannan Wang, Danchen Qin, Xiaohui Chen, Hongye Yang, Fang Hua. The application of quantum dots in dental and oral medicine: A scoping review. *Journal of Dentistry*. 2025; 153: 105536.  
<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105536>
11. Kumar A, Rathore G, Verma A, Singh R.P. Mucoadhesive amphiphilic polymers for buccal drug delivery: overcoming solubility and permeation barriers. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*. 2026; 1–34.  
<https://doi.org/10.1080/09205063.2026.2683919>
12. Ivanova S, Tomova Z, Vlahova A, Stoeva IL, Vasileva E, Uzunova Y, Urumova M, Tomov D, Chonin A. Contemporary Use of Polymers in Dentistry: A Narrative Review. *Polymers (Basel)*. 2026; 18(1):138. doi:10.3390/polym18010138
13. Tüküç TB, Alarçin E, Bal Öztürk A. Recent progress in the development of localized drug delivery systems for oral mucosal disorders using mucoadhesive patches. *J. Res. Pharm*. 2025;29(3):1350-1366. [doi:10.12991/jrespharm.1712426](https://doi.org/10.12991/jrespharm.1712426)
14. Morales J.O., McConville J.T., Manufacture and characterization of mucoadhesive buccal films. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. 2011; 77(2): 187-199.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2010.11.023>
15. Boateng J.S, Matthews K.H, Stevens H.N, Eccleston G.M, Wound healing dressings and drug delivery systems: a review. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2008; 97(8): 2892-2923. <https://doi.org/10.1002/jps.21210>
16. Mura S, Nicolas J, Couvreur P, Stimuli-responsive nanocarriers for drug delivery. *Nature Materials*. 2013; 12(11): 991-1003.  
<https://doi.org/10.1038/nmat3776>

17. Shubham Rana et al, Buccal Drug Delivery System: A Comprehensive Review. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Medicine (IJPSM)*. 2024; 9(6): 104-118. <https://doi.org/10.47760/ijpsm.2024.v09i06.010>
18. Salehi S, Shahrabi S. S, Shokrollahi M, & Seyedjafari E. A comparison between solvent casting and electrospinning methods for the fabrication of neem extract-containing buccal films. *Journal of Industrial Textiles*, 2022; 51(1\_suppl): 1655S–1674S. <https://doi.org/10.1177/15280837211027785>
19. Bhalani DV, Nutan B, Kumar A, Singh Chandel AK. Bioavailability Enhancement Techniques for Poorly Aqueous Soluble Drugs and Therapeutics. *Biomedicines*. 2022 Aug 23;10(9):2055. doi: 10.3390/biomedicines10092055
20. Sowmya KP, Surenthar M, Lekha Sree V. Effective treatment of oral microbial infections and biofilm using flavonoid rutin – An *in vitro* study. *J Oral Biol Craniofac Res*. 2025 May-Jun;15(3):541-547. <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2025.03.007>
21. Zhang T, Yuan M, Hao X, Gao H, Teng M, Hu F, Liang Y, Deng J, Li F. Innovative biomaterials in promoting intraoral wound healing: Mechanisms, applications, and challenges. *Mater Today Bio*. 2025 Oct 28;35:102470. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2025.102470>
22. Siepmann, J.; Peppas, N. A. Modeling of drug release from delivery systems based on hydrophilic polymers. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2012; 64: 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.09.028>
23. Chaffee B.W, Rodrigues P.H, Kramer P.F, Vitolo M.R, Feldens C.A, Oral health-related quality-of-life scores differ by socioeconomic status and caries experience. *Community Dent. Oral Epidemiol*. 2017; 45: 216–224
24. Fiorillo L, Oral Health: The First Step to Well-Being. *Medicina* 2019; 55: 676
25. Jin L, Lamster I, Greenspan J, Pitts N, Scully C, Warnakulasuriya S, Global burden of oral diseases: Emerging concepts, management and interplay with systemic health. *Oral Dis*. 2016; 22: 609–619
26. Ye S, Wei B, Zeng L. Advances on Hydrogels for Oral Science Research. *Gels*. 2022 May 15;8(5):302. <https://doi.org/10.3390/gels8050302>

27. Niemczyk-Soczynska B, Zaszczynska A, Zabielski K, Sajkiewicz P, Hydrogel Electrospun and Composite Materials for Bone/Cartilage and Neural Tissue Engineering. *Materials*. 2021; 14: 6899.]
28. Uppuluri V, Sathanantham S.T, Bhimavarapu S, Elumalai L, Polymeric Hydrogel Scaffolds: Skin Tissue Engineering and Regeneration. *Adv. Pharm. Bull.* 2022; 12: 437–448
29. Shi J, Yu L, Ding J, PEG-based thermosensitive and biodegradable hydrogels. *Acta Biomater*. 2021; 128: 42–59
30. Cai Z, Gan Y, Bao C, Wu W, Wang X, Zhang Z, Zhou Q, Lin Q, Yang Y, Zhu L, Photosensitive Hydrogel Creates Favorable Biologic Niches to Promote Spinal Cord Injury Repair. *Adv. Healthc. Mater*. 2019; 8: e1900013
31. Wu, B.; Lewis, R.W.; Li, G.; Gao, Y.; Fan, B.; Klemm, B.; Huang, J.; Wang, J.; Stuart M.A.C., Eelkema R, Chemical signal regulated injectable coacervate hydrogels. *Chem. Sci*. 2023; 14: 1512–1523
32. Sun Z, Lyu F, Wu S, Lu Z, Cheng H, Ultrafast construction of partially hydrogen-bonded metal-hyaluronan networks with multiple biotissue-related features. *Carbohydr. Polym*. 2022; 295: 119852
33. Conley B.M, Yang L, Bhujel B, Luo J, Luo J, Han I, Lee K.B, Development of a Nanohybrid Peptide Hydrogel for Enhanced Intervertebral Disc Repair and Regeneration. *ACS Nano*. 2023; 17: 3750–3764
34. Guan T, Li J, Chen C, Liu Y, Self-Assembling Peptide-Based Hydrogels for Wound Tissue Repair. *Adv. Sci*. 2022; 9: e2104165
35. Li Z, Li G, Xu J, Li C, Han S, Zhang X, Wu P, Lin Y, Wang C, Zhang J, et al. Hydrogel Transformed from Nanoparticles for Prevention of Tissue Injury and Treatment of Inflammatory Diseases. *Adv. Mater*. 2022; 16: 34
36. Peppas N.A., Hilt J.Z, Khademhosseini A. *et al*. Hydrogels in biology and medicine: from molecular principles to bionanotechnology. *Adv. Mater*. .2006; 18: 1345-1360. <https://doi.org/10.1002/adma.200501612>
37. Burdick J.A., Murphy W.L. Moving from static to dynamic complexity in hydrogel design. *Nat. Commun*. 2012; 3 1269. <https://doi.org/10.1038/ncomms2271>

38. Stan D. Tanase C. Avram M. *et al.* Wound healing applications of creams and “smart” hydrogels. *Exp. Dermatol.* 2021; 30: 1218-1232. <https://doi.org/10.1111/exd.14396>
39. Cao H. Duan L. Zhang Y. *et al.* Current hydrogel advances in physicochemical and biological response-driven biomedical application diversity. *Signal Transduct. Target. Ther.* 2021 6: 426. <https://doi.org/10.1038/s41392-021-00830-x>
40. Burdick J.A. Murphy W.L. Moving from static to dynamic complexity in hydrogel design. *Nat. Commun.* 2012; 3: 1269. <https://doi.org/10.1038/ncomms2271>
41. Xiang J. Shen L. Hong Y. *et al.* Status and future scope of hydrogels in wound healing: Synthesis, materials and evaluation. *Eur. Polym. J.* 2020; 130: Article 109609, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109609>
42. Liang Y. He J. Guo B. Functional hydrogels as wound dressing to enhance wound healing. *ACS nano.* 2021; 15 (8): 12687-12722. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c04206>
43. Henderson T. M. A. Ladewig K. Haylock D. N. McLean K. M. O'Connor A. J. Cryogels for biomedical applications // *J. Mater. Chem. B.* 2013; 1( 20): 2682–2695.
44. Hassan C.M., Peppas N.A. Cellular PVA hydrogels produced by freeze/thawing *J. Appl. Polym. Sci.* 2000; 76(14): 2075–2079.
45. Mikhailovsky S.V., Savina I.N., Dainiak M., Ivanov A., Galaev E. Yu.I. Biomaterials/cryogels enabling technologies. *Amsterdam: Elsevier.* 2011; 11(22).
46. Shiekh P.A. Andrabi S.M. Singh A. Majumder S. Kumar A. Designing cryogels through cryostructuring of polymeric matrices for biomedical applications // *Eur. Polym. J.* 2021;(144).110234.
47. Lozinsky V., Damshkaln L., Kurochkin I., Study of cryostructuring of polymer systems. Physicochemical properties and morphology of poly(vinyl alcohol) cryogels formed by multiple freezing–thawing *Colloid J.* 2008; 70(2). 189–198.
48. Razavi M., Qiao Y., Thakor A. S. Three-dimensional cryogels for biomedical applications // *J. Biomed. Mater. Res. A.* 2019;107(12).2736–2755.

49. Savina I.N., Shevchenko R.V., Allan I.U., Illsley M., Mikhalovsky S.V. Cryogels in regenerative medicine Supermacroporous Cryogels: Biomedical and Biotechnological Applications. *Boca Raton: CRC Press*. 2016; 177–196.
50. Hixon K.R., Lu T., Sell S. A. A comprehensive review of cryogels and their roles in tissue engineering applications *Acta Biomater*. 2017; 62. 29–41.
51. Erdem A., Ngwabebhoh F.A., Yildiz U., Novel macroporous cryogels with enhanced adsorption capability for the removal of Cu(II) ions from aqueous phase: modelling, kinetics and recovery studies *J. Environ. Chem. Eng*. 2017; 5(1). 1269–1280.
52. Lozinsky V.I. A brief history of polymeric cryogels *Polymeric Cryogels: Macroporous Gels with Remarkable Properties* Ed. 2014; 263: 1–48.
53. Pazos V., Tardif J. C., Mongrain R. Gel-based mechanical phantom of stenotic coronary artery *ASME 2007 Summer Bioengineering Conference* (June 20–24, 2007, Keystone, Colorado, USA). 2007; 133–134.
54. Peppas N. A., Scott J. E. Controlled release from poly(vinyl alcohol) gels prepared by freezing–thawing processes *J. Control. Release*. 1992; 18(2): 95–100.
55. Peppas N.A., Stauffer S.R. Reinforced uncrosslinked poly(vinyl alcohol) gels produced by cyclic freezing–thawing processes: a short review *J. Control. Release*. 1991; 16(3): 305–310
56. Ricciardi R., Auriemma F., De Rosa C. Structure and properties of poly(vinyl alcohol) hydrogels obtained by freeze/thaw techniques *Macromol. Symp*. 2005; 222(1): 49–64.
57. Gun'ko V.M., Turov V.V., Zarko V.I., Pakhlov E.M., Matkovsky A. K., Oranska O.I., Skubiszewska-Zięba J. Cryogelation of individual and complex nanooxides under different conditions *Colloids Surf. A*. 2014. 456: 261–272.
58. Gun'ko V.M., Turov V.V., Zarko V. I., Pakhlov E.M., Prykhod'ko G.P., Remez O.S., Leboda R., Skubiszewska-Zięba J., Blitz J.P. High-pressure cryogelation of nanosilica and surface properties of cryosilicas *Colloids Surf. A*. 2013; 436: 618–632.

59. Ricciardi R., Auriemma F., Gaillet C., De Rosa C., Lauprêtre F., Investigation of the crystallinity of freeze/thaw poly(vinyl alcohol) hydrogels by different techniques *Macromolecules*. 2004; 37(25): 9510–9516.
60. Pazos V., Mongrain R., Tardif J. Polyvinyl alcohol cryogel: optimizing the parameters of cryogenic treatment using hyperelastic models *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2009; 2,(5): 542–549
61. Lozinsky V.I. Cryostructuring of polymeric systems. 55. Retrospective view on more than 40 years of studies performed in the A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds with respect to cryostructuring processes in polymeric systems *Gels*. 2020;6(3): 29.
62. Wan W.K., Bannerman A. D., Yang L., Mak H. Poly(vinyl alcohol) cryogels for biomedical applications Polymeric Cryogels: Macroporous Gels with Remarkable Properties. *Adv. Polym. Sci.* 2014;263: 283–321.
63. Gun'ko V.M., Savina I.N., Mikhalovsky S.V. Cryogels: morphological, structural and adsorption characterization *Adv. Colloid Interface Sci.* 2013;187–188. 1–46.
64. Eugen Dikhtiaruk. Cryogels filled with nanostructured materials: achievements and prospects. *Surface*. 2025; 17(32): 305-346  
<https://doi.org/10.15407/Surface.2025.17.305>
65. Ceylan S., Göktürk D., Bölgen N. Effect of crosslinking methods on the structure and biocompatibility of polyvinyl alcohol/gelatin cryogels *Biomed. Mater. Eng.* 2016; 27(4): 327–340
66. Savina I.N., Zoughaib M., Yergeshov A.A. Design and assessment of biodegradable macroporous cryogels as advanced tissue engineering and drug carrying materials *Gels*. 2021;7(3): 79
67. Ricciardi R., Auriemma F., De Rosa C., Lauprêtre F. X-ray diffraction analysis of poly(vinyl alcohol) hydrogels obtained by freezing and thawing techniques. *Macromolecules*. 2004; 37(5): 1921.

68. Thomas J., Gomes K., Lowman A., Marcolongo M. The effect of dehydration history on PVA/PVP hydrogels for nucleus pulposus replacement. *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.* 2004; 69(2): 135.
69. Lozinsky V.I., Zubov A.L., Savina I. N., Plieva F. M. Study of cryostructuration of polymer systems. XI Poly(vinyl alcohol) cryogels: apparent yield of the freeze-thaw-342 induced gelation of concentrated aqueous solutions of the polymer. *J. Appl. Polym. Sci.* 2000; 77(8): 1822
70. Peppas N.A., Hilt J.Z., Khademhosseini A., Langer R. Hydrogels in biology and medicine: from molecular principles to bionanotechnology. *Ad Mater.* 2006;18(11): 1345.
71. Hassan C.M., Peppas N.A. Cellular PVA hydrogels produced by freeze/thawing. *J. Appl. Polym. Sci.* 2000;76(14): 2075.
72. Lozinsky V.I., Galaev I.Yu., Plieva F.M., Savina I.N., Jungvid H., Mattiasson B. Polymeric cryogels as promising materials of biotechnological interest. *Trends Biotechnol.* 2003; 21(10): 445
73. Savina I.N., Zoughaib M., Yergeshov A.A. Design and assessment of biodegradable macroporous cryogels as advanced tissue engineering and drug carrying materials. *Gels.* 2021; 7(3): 79
74. Bhattarai N., Gunn J., Zhang M. Chitosan-based hydrogels for controlled, localized drug delivery. *Ad Drug Deli Re* 2010; 62(1): 83
75. Perumal S., Atchudan R., Yoon D.H., Joo J., Cheong I.W. Spherical chitosan/gelatin hydrogel particles for removal of multiple heavy metal ions from wastewater. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2019; 58(23): 9900.
76. Jin L., Bai R. Mechanisms of lead adsorption on chitosan/PVA hydrogel beads. *Langmuir.* 2002; 18(25): 9765
77. Tezar Ramdhan, Su Hung Ching, Sangeeta Prakash, Bhesh Bhandari, Physical and mechanical properties of alginate based composite gels, *Trends in Food Science Technology.* 2020; 106: 150-159, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.002>

78. Akilbekova D., Shaimerdenova M., Adilov S., Berillo D. Biocompatible scaffolds based on natural polymers for regenerative medicine *Int. J. Biol. Macromol.* 2018; *114*: 324–333
79. Berillo D., Cundy A. 3D-macroporous chitosan-based scaffolds with in situ formed Pd and Pt nanoparticles for nitrophenol reduction *Carbohydr. Polym.* 2018. *192*: 166–175
80. Hassan C. M., Peppas N. A. Structure and applications of poly(vinyl alcohol) hydrogels produced by conventional crosslinking or by freezing/thawing methods // *Biopolymers: PVA Hydrogels, Anionic Polymerisation Nanocomposites*. Berlin: Springer, 2000; 37–65,
81. Savina I.N., Lozinskii V.I. Study of cryostructuring of polymer systems. Composite poly(vinyl alcohol) cryogels filled with dispersed particles containing ionogenic groups *Colloid J.* 2004; *66*,(3): 343–350
82. Zheng Y., Clogston J.D., Patri A.K., Dobrovolskaia M.A., McNeil S.E. Composites with macroporous poly(vinyl alcohol) cryogels and activated carbon beads // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2012; *4*,(5): 2727–2733
83. Hixon K. R., Lu T., Sell S.A. A comprehensive review of cryogels and their roles in tissue engineering applications. *Acta Biomater.* 2017; *62*: 29,
84. Chhatri A., Bajpai J., Bajpai A.K. Designing polysaccharide-based antibacterial biomaterials for wound healing applications. *Biomater.* 2011; *1*(2): 189
85. Uyar G., Kaygusuz H., Erim F.B. Methylene blue removal by alginate–clay quasi-cryogel beads. *React. Funct. Polym.* 2016; *107*: 61
86. Sanjukta Sen, Ranabir Sahu, Tarun Kumar Dua, Paramita Paul, Gouranga Nandi. Advancements of multifunctional hydrogels in treating periodontal diseases: A concise review. *Next Materials*. 2025; *8*: 100825
87. Lee Y., Gou Y., Pan X., et al. Advances of multifunctional hydrogels for periodontal disease *Smart Mater. Med.* 2023; *4*: 460-467, <https://doi.org/10.1016/j.smam.2023.02.001>

88. Li X., Cho B., Martin R., *et al.* Nanofiber-hydrogel composite-mediated angiogenesis for soft tissue reconstruction *Sci. Transl. Med.* 2019; 11, Article eaau6210, <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aau6210>
89. Tavakoli J., Mirzaei S., Tang Y. Cost-effective double-layer hydrogel composites for wound dressing applications. *Polymers.* 2018; 10: 305. <https://doi.org/10.3390/polym10030305>
90. Qu J., Zhao X., Liang Y., *et al.* Antibacterial adhesive injectable hydrogels with rapid self-healing, extensibility and compressibility as wound dressing for joints skin wound healing. *Biomaterials.* 2018; 183: 185-199. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2018.08.044>
91. M. Zhang, S. Chen, L. Zhong, *et al.* Zn<sup>2+</sup>-loaded TOBC nanofiber-reinforced biomimetic calcium alginate hydrogel for antibacterial wound dressing. *Int. J. Biol. Macromol.* 2020; 143: 235-242 <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.046>
92. Tonsomboon K., Butcher A.L., Oyen M.L. Strong and tough nanofibrous hydrogel composites based on biomimetic principles. *Mater. Sci. Eng. C.* 2017; 72: 220-227, <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.11.025>
93. Pinnaratip R., Bhuiyan M.S., Meyers K., *et al.* Multifunctional biomedical adhesives. *Adv. Healthc. Mater.*, 2019; 8: Article 1801568, <https://doi.org/10.1002/adhm.201801568>
94. Sun X., Ma Z., Zhao X., *et al.* Three-dimensional bioprinting of multicell-laden scaffolds containing bone morphogenic protein-4 for promoting M2 macrophage polarization and accelerating bone defect repair in diabetes mellitus. *Bioact. Mater.* 2021; 6:757-769, <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.08.030>
95. Ji K., Liu Y., Lu W., *et al.* Periodontal tissue engineering with stem cells from the periodontal ligament of human retained deciduous teeth. *J. Periodontal Res.* 2013; 48: 105-116, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0765.2012.01509.x>
96. Asadi N., Pazoki-Toroudi H., Del Bakhshayesh A.R., *et al.* Multifunctional hydrogels for wound healing: Special focus on biomacromolecular based hydrogels. *Int. J. Biol. Macromol.* 2021; 170: 728-750, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.202>

97. Zussman M., Zilberman M.. Injectable metronidazole-eluting gelatin-alginate hydrogels for local treatment of periodontitis. *J. Biomater. Appl.* 2022; 37:166-179, <https://doi.org/10.1177/08853282221079458>
98. Li Y., Peng H., Tang W., *et al.* Accelerating periodontal regeneration through injectable hydrogel-enabled sequential delivery of nanoceria and erythropoietin. *Mater. Des.* 2023; 225: Article 111540, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111540>
99. Sun X., Ma Z., Zhao X., *et al.* Three-dimensional bioprinting of multicell-laden scaffolds containing bone morphogenic protein-4 for promoting M2 macrophage polarization and accelerating bone defect repair in diabetes mellitus. *Bioact. Mater.* 2021; 6: 757-769, <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.08.030>
100. Ji K., Liu Y., Lu W., *et al.* Periodontal tissue engineering with stem cells from the periodontal ligament of human retained deciduous teeth *J. Periodontal Res.* 2013; 48: 105-116, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0765.2012.01509.x>
101. Zielińska A., Karczewski J., Eder P., *et al.* Scaffolds for drug delivery and tissue engineering: The role of genetics *J. Ophthalmol. Clin. Res.* 2023; 359: 207-223, <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2023.05.042>
102. Liu G., Zhou Y., Xu Z., *et al.* Janus hydrogel with dual antibacterial and angiogenesis functions for enhanced diabetic wound healing. *Chin. Chem. Lett.*, 2023; 34: Article 107705, <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2022.07.048>
103. Jepsen K., Jepsen S.. Antibiotics/antimicrobials: systemic and local administration in the therapy of mild to moderately advanced periodontitis. *Periodontology* 2000. 2016; 71: 82-112, <https://doi.org/10.1111/prd.12121>
104. H.R. Rajeshwari, D. Dhamecha, S. Jagwani, *et al.* Local drug delivery systems in the management of periodontitis: a scientific review *J. Control. Release.* 2019; 307:393-409, <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.06.038>
105. Collins J.R., Arredondo A., Roa A., *et al.* Periodontal pathogens and tetracycline resistance genes in subgingival biofilm of periodontally healthy and diseased Dominican adults *Clin. Oral. Investig.* 2016; 20: 349-356, <https://doi.org/10.1007/s00784-015-1516-2>

106. Li A., Khan I.N., Khan I.U., *et al.* Gellan gum-based bilayer mucoadhesive films loaded with moxifloxacin hydrochloride and clove oil for possible treatment of periodontitis *Drug Des. Dev. Ther.* 2021; 3937-3952, <https://doi.org/10.2147/DDDT.S328722>
107. Martelli G. Giacomini, D. Antibacterial and antioxidant activities for natural and synthetic dual-active compounds. *Eur. J. Med. Chem.* 2018; 158: 91-105, <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2018.09.009>
108. Maleki S.J., Crespo J.F., Cabanillas B.. Anti-inflammatory effects of flavonoids *Food Chem* 2019; .299: Article 125124, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125124>
109. Arulseivan P., Fard M.T., Tan W.S., *et al.* Role of antioxidants and natural products in inflammation *Oxid. Med. Cell. Longev.* 2016 Article 5276130, <https://doi.org/10.1155/2016/5276130>
110. Gutiérrez-del-Río I., Fernández J., Lombó F. Plant nutraceuticals as antimicrobial agents in food preservation: terpenoids, polyphenols and thiols. *Int. J. Antimicrob. Agents.* 2018; 52.: 309-315, <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2018.04.024>
111. Mohammad C.A.. Efficacy of curcumin gel on zinc, magnesium, copper, IL-1 $\beta$ , and TNF- $\alpha$  in chronic periodontitis patients. *BioMed. Res. Int.*, 2020 Article 8850926, <https://doi.org/10.1155/2020/8850926>
112. Ramamurthy J., Jayakumar N.D.. Anti-inflammatory, anti-oxidant effect and cytotoxicity of *Ocimum sanctum* intra oral gel for combating periodontal diseases. *Bioinformation*, 2020; 16: 1026, <https://doi.org/10.6026/973206300161026>
113. Chanaj-Kaczmarek J., Osmalek T., Szymańska E., *et al.* Development and evaluation of thermosensitive hydrogels with binary mixture of *scutellariaebaicalensis* radix extract and chitosan for periodontal diseases treatment. *Int. J. Mol. Sci.* 2021; 22: 11319, <https://doi.org/10.3390/ijms222111319>
114. A. Sharma, A. Biharee, A. Kumar, *et al.* Antimicrobial terpenoids as a potential substitute in overcoming antimicrobial resistance. *Curr. Drug Targets.* 2020; 21:1476-1494, <https://doi.org/10.2174/1389450121666200520103427>

115. Echazú M.I., Olivetti C.E., Anesini C., *et al.* Development and evaluation of thymol-chitosan hydrogels with antimicrobial-antioxidant activity for oral local delivery. *Mater. Sci. Eng. C.* 2017;81: 588-596, <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.08.059>
116. Johnson A., Kong F., Miao S., *et al.* Therapeutic effects of antibiotics loaded cellulose nanofiber and  $\kappa$ -carrageenan oligosaccharide composite hydrogels for periodontitis treatment. *Sci. Rep.*, 2020; 10: Article 18037, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74845-9>
117. Chen W.C., Juang R.S., Wei Y.H.. Applications of a lipopeptide biosurfactant, surfactin, produced by microorganisms. *Biochem. Eng. J.* 2015; 103: 158-169, <https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.07.009>
118. Wu Y.S., Ngai S.C., Goh B.H., *et al.* Anticancer activities of surfactin and potential application of nanotechnology assisted surfactin delivery. *Front. Pharmacol.* 2017; 8: 761, <https://doi.org/10.3389/fphar.2017.00761>
119. van der Pol A., van Gilst W.H., Voors A.A., *et al.* Treating oxidative stress in heart failure: past, present and future. *Eur. J. Heart Fail.* 2019; 21: 425-435, <https://doi.org/10.1002/ejhf.1320>
120. Luan J., Li R., Xu W., *et al.* Functional biomaterials for comprehensive periodontitis therapy. *Acta Pharm. Sin. B.* 2023; 13: 2310-2333, <https://doi.org/10.1016/j.apsb.2022.10.026>
121. Kapusta O., Jarosz A., Stadnik K., *et al.* Antimicrobial natural hydrogels in biomedicine: properties, applications, and challenges—a concise review. *Int. J. Mol. Sci.* 2023; 24: 2191, <https://doi.org/10.3390/ijms24032191>
122. Zhang X., Qin M., Xu M., *et al.* The fabrication of antibacterial hydrogels for wound healing. *Eur. Polym. J.* 2021; 146: Article 110268, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110268>
123. Pei X., Wang J., Cong Y., *et al.* Recent progress in polymer hydrogel bioadhesives. *J. Polym. Sci.* 2021; 59: 1312-1337, <https://doi.org/10.1002/pol.20210249>

124. de Santana R.B., de Santana C.M.. Human intrabony defect regeneration with rh FGF-2 and hyaluronic acid—a randomized controlled clinical trial. *J. Clin. Periodontol.* 2015;42: 658-665, <https://doi.org/10.1111/jcpe.12406>
125. Olszewska-Czyz I., Kralik K., Prpic J. Biomolecules in dental applications: randomized, controlled clinical trial evaluating the influence of hyaluronic acid adjunctive therapy on clinical parameters of moderate periodontitis. *Biomolecules.* 2021; 11: 1491, <https://doi.org/10.3390/biom11101491>
126. Gad H.A., Kamel A.O., Ezzat O.M., *et al.* Doxycycline hydrochloride-metronidazole solid lipid microparticles gels for treatment of periodontitis: development, in-vitro and in-vivo clinical evaluation. *Expert Opin. Drug Deliv.* 2017; 14: 1241-1251, <https://doi.org/10.1080/17425247.2017.1329297>
127. Karam M.B., El Khoury J., Chakar C., *et al.* Heparan-mimetics: potential agents of tissue regeneration for bone and periodontal therapies. *Med. Nov. Technol. Devices.* 2021; 11: Article 100066, <https://doi.org/10.1016/j.medntd.2021.100066>
128. J. de F. Gomes Neto, T. de P. de L. Lima, Brand L. M., *et al.* Recent Advances in Natural Polymers-based Hydrogels for Periodontal Regeneration. *Macromolecular Bioscience.* 2026; 26(5): e70194. <https://doi.org/10.1002/mabi.70194>
129. Gautam L., Warkar S.G., Ahmad S.I., Kant R., Jain M.A review on carboxylic acid cross-linked polyvinyl alcohol: properties and applications. *Polymer engineering science.* 2022; 62(2): 225-246.
130. Ruiz-Hitzky E., Aranda P. and Darder M. (2015). Hybrid and Biohybrid Materials Based on Layered Clays. In Tailored Organic-Inorganic Materials (eds E. Brunet, J.L. Colón and A. Clearfield). <https://doi.org/10.1002/9781118792223.ch6>
- 131.Визначення розмірних характеристик частинок глинопорошків як нанопоповнювачів полімерних композицій Ю.О. Будаш, В.І. Ступа, М.В. Лубська, К.В. Пушкаренко, І.П. Силенок Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки.2019; 138(5):122-131. <http://doi.org/10.30857/1813-6796.2019.5.14>.

132. Chrubasik JE., Roufogalis BD., Wagner H., Chrubasik SA., A comprehensive review on nettle effect and efficacy profiles, Part I: *herba urticae*. *Phytomedicine*. 2007; 14(6): 423-435. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2007.03.004>
133. Chrubasik JE, Roufogalis BD, Wagner H, Chrubasik S. A comprehensive review on the stinging nettle effect and efficacy profiles. Part II: *urticae radix*. *Phytomedicine*. 2007; 14(7-8): 568-579. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2007.03.014>
134. Mandzii T.P. Дослідження макро-та мікроелементного складу листків *Pinus sylvestris* L. та *Pinus mugo* Turra. *Медицина та клінічна хімія*. 2020; 1: 112-117 <https://doi.org/10.11603/mcch.2410-681X.2020.v.i1.10689>
135. Harrison F, Furner-Pardoe J, Connelly E. An assessment of the evidence for antibacterial activity of stinging nettle (*Urtica dioica*) extracts. *Access Microbiol*. 2022; Mar 24;4(3):000336. <https://doi.org/10.1099/acmi.0.000336>.
136. Kozłowska M, Zbikowska A, Marciniak-Lukasiak K, Kowalska M. Herbal Extracts Incorporated into Shortbread Cookies: Impact on Color and Fat Quality of the Cookies. *Biomolecules*. 2019; Dec 11;9(12):858. <https://doi.org/10.3390/biom9120858>.
137. Сенік І.В. Розробка і застосування тонких широкополосних екрануючих композиційних матеріалів Сенік І.В., Куриптя Я.А, Барсуков В.З. , Бутенко О.О., Хоменко В.Г. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2020; 21(4): 771-778. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.771-778>
138. Ляшок І.О., Плаван В.П., Іщенко О.В., Годунко, А.А., Швець, В.В. Властивості гібридних гідрогелів з додаванням модифікованого крохмалю та глини монтморилонітового типу. *Технології та інжиніринг*. 2023; 24 (3): 47–55. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.3.5>
139. Ляшок І., Крюкова О., Швець В., Кичужинець М., Галаган В. Фізичні властивості гідрогелів та плівок ПВС на основі водного екстракту кропиви дводомної. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2024; 343 6(1): 412-417. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-61>

140. Ляшок І.О., Плаван В.П., Крюкова О.А., Полушкін М.М., Швець В.В., Шаповалова Я.С.. Вплив полісахаридів на фізичні властивості ПВС плівок та гідрогелів на основі водного екстракту ромашки лікарської (*Matricaria Chamomilla*). *Технології та інженерія*. 2025; 26(5): 101–109. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.5.10>
141. ASTM D882 Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting 2018
142. Skogman M.E., Vuorela P.M., Fallarero A.A. Platform of Anti-biofilm Assays Suited to the Exploration of Natural Compound Libraries. *J Vis Exp*. 2016; 27(118):54829. <https://doi.org/10.3791/54829>
143. Ляшок І.О., Плаван В.П., Швець В.В., Смачило О.В., Крюкова О.А. Біосумісні гідрогелі на основі композицій полівінілової спирт/крабоксиметилкрохмаль: властивості та перспективи використання. *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2026; (2): ( прийнято до друку)
144. Khan M.R., Rumon M.M. Islam M.H., Synthesis, Rheology, Morphology, and Mechanical Properties of Biodegradable PVC-Based Composite Films: A Review on Recent Progress. *Processes*. 2024; 12(12): 2880. <https://doi.org/10.3390/pr12122880>
145. Pantelic B., Ponjavic M., Jankovic V., Aleksic I., Krevanovic S., Murray J., Fournet, M.B. (). Upcycling biodegradable PVC/Крарч film to a bacterial biopigment and biopolymer. *Polymers*. 2021; 13(21): 3692. <https://doi.org/10.3390/polym13213692>
146. Tripathi R., Bajpai Ja., Bajpai A.K. Water sorption behaviour of PVC-Крарч binary polymer blends. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020; 137(44):. e49352. <https://doi.org/10.1002/app.49352>
147. Mahmood A., Patel D., Hickson B., DesRochers J., Hu X. Recent Progress in Biopolymer-Based Hydrogel Materials for Biomedical Applications. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(3): 1415. <https://doi.org/10.3390/ijms23031415>

148. Capanema N.S.V., Mansur A.A.P., Mansur H.S. (2023). Bioengineered Water-Responsive Carboxymethyl Cellulose/Poly(vinyl alcohol) Hydrogel Hybrids for Wound Dressing and Skin Tissue Engineering Applications. *Gels* 2023;,9: 166. <https://doi.org/10.3390/gels9020166>

## ДОДАТКИ

### ДОДАТОК А. Акт впровадження полімерних плівок та гідрогелів на основі ПВС/крохмаль та ПВС/КМК у клінічну практику стоматологічної клініки AND

#### Акт впровадження полімерних плівок та гідрогелів на основі ПВС/крохмаль та ПВС/КМК у клінічну практику стоматологічної клініки AND

Сучасна стоматологія дедалі більше орієнтується на використання інноваційних полімерних матеріалів, здатних забезпечити локалізовану терапію, прискорене загоєння та профілактику ускладнень. Одним із перспективних напрямів є впровадження полімерних плівок та гідрогелів, які поєднують у собі високу біосумісність, контрольоване вивільнення лікарських речовин та виражені протизапальні властивості.

У клінічній практиці стоматологічної клініки AND такі матеріали застосовуються для лікування пацієнтів із генералізованим пародонтитом, пародонтозом та катаральним гінгівітом. Використання плівок на основі полімерів ПВС/КМК з екстрактом кори дуба *Quercus cortex* та гідрогелів, модифікованих монтморилонітовою глиною, дозволяє досягти комплексного терапевтичного протизапального, антимікробного та в'язучого ефекту.

У дослідженні брали участь добровольці, які надали інформаційну згоду на проведення комплексного лікування із застосуванням полімерних плівок та гідрогелів.

**Пацієнт 1** Діагноз: генералізований пародонтит II ступеня. Пацієнт пройшов процедуру кюретажу пародонтальних кишень, після чого було використано плівку ПВС/КМК на основі водного екстракту кори дуба *Quercus cortex* у співвідношенні 2/8. Це забезпечило зменшення запального процесу та стабілізацію стану пародонту, що підтверджено комп'ютерною томографією після лікування. Термін лікування склав 2 тижні (рис. 1-2).

**Пацієнт 2** Діагноз: загострення хронічного катарального гінгівіту. Пацієнт пройшов кюретаж уражених ділянок, після чого застосовано гідрогель ПВС/КМК, наповнений монтморилонітовою глиною (2/8), експозиція 10–15 хвилин. Для пролонгованої протизапальної та антимікробної дії рекомендовано використання гідрогелю ПВС/Кр на основі екстракту кори дуба *Quercus cortex* у співвідношенні 5/5 протягом 1 години. Курс лікування тривав 5–7 днів, після чого зафіксовано значне зменшення запалення та відновлення структури ясен (рис. 3-4).

Проведене лікування пацієнтів у стоматологічній клініці AND із застосуванням полімерних плівок та гідрогелів підтвердило їхню високу клінічну ефективність. Використання плівок ПВС/КМК на основі екстракту кори дуба *Quercus cortex* та гідрогелів ПВС/КМК, модифікованих монтморилонітовою глиною, забезпечило виражений протизапальний, антимікробний та в'язучий ефект, сприяло зменшенню інтенсивності запального процесу, нормалізації кольору та структури ясен, а також покращенню рентгенологічних показників у пацієнтів із генералізованим пародонтитом. Пацієнти відзначали підвищення комфорту під час лікування завдяки м'якій текстурі матеріалів та відсутності подразнення слизової оболонки.

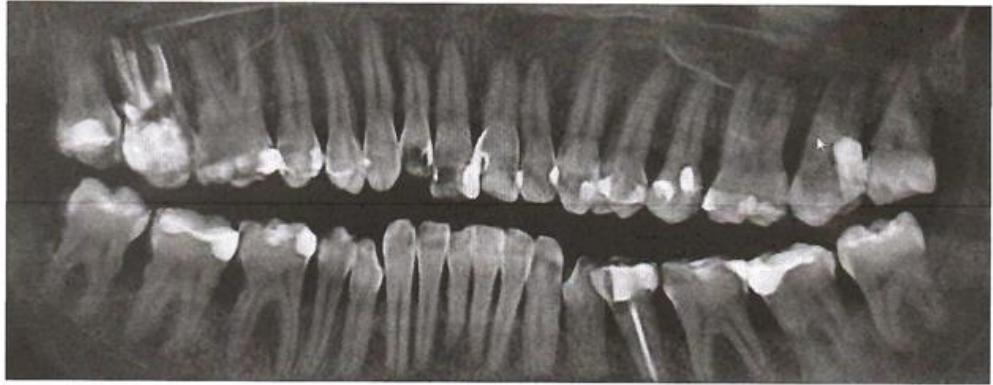


Рис. 1. Діагностичний знімок комп'ютерної томографії на обладнанні Dentsply Sirona ORTHOPHOS XG 3D READY пацієнта 1 з діагнозом генералізований пародонтит II ступеню до лікування.



Рис. 2 Діагностичний знімок комп'ютерної томографії на обладнанні Dentsply Sirona ORTHOPHOS XG 3D READY пацієнта 1 після проведеного комплексного лікування (кюретаж з наступним використанням плівки ПВС/КМК на основі водного екстракту кори дуба *Quercus cortex* у співвідношенні 2/8). Термін лікування 2 тижні.



Рис.3 Фотографія запального процесу ясен (загострення хронічного катарального гінгівіту) пацієнта 2 до лікування.

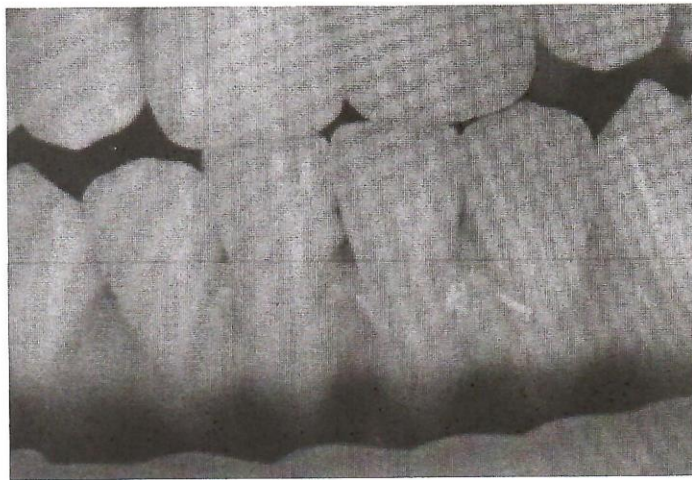


Рис.4 Фотографія ясен пацієнта 2 після комплексного лікування(кюретаж, гідрогель наповнений глиною монтморилонітового типу ПВС/КМК:глина (2/8) 10-15 хвилин після чого рекомендовано застосувати гідрогель ПВС/Кр на основі екстракту кори дуба *Quercus cortex* у співвідношенні 5/5 для забезпечення протизапальної, антимікробної та в'язучої дії до 1 години) тривалість лікування 5-7 днів.

#### **Висновок.**

Рекомендується впроваджувати полімерні плівки та гідрогелі у стандартні протоколи лікування пародонтальних та гінгівальних патологій, розширювати клінічні дослідження для підтвердження ефективності на більшій вибірці пацієнтів, оптимізувати склад матеріалів для посилення їх антимікробної та регенеративної дії, а також розробити єдині стандарти застосування цих систем у стоматологічній практиці. Таким чином, використання полімерних матеріалів може стати важливим етапом у підвищенні якості лікування та скороченні термінів реабілітації пацієнтів.

Кандидат медичних наук, член Міжнародної колегії стоматологів ICD, член Української академії естетичної стоматології UAED, асистент кафедри терапевтичної та дитячої стоматології НУОЗ України імені П. Л. Шупика, член вченої ради Навчально-наукового інституту професійної досконалості НУОЗ України імені П.Л.Шупика, лікар-стоматолог вищої кваліфікаційної категорії, практика- СНКЦ «Stamil», член Координаційної ради ГО «Асоціація стоматологів України», медичний експерт національних телеканалів

Світлана Василівна Хлебас

директор ТОВ «стоматологічна клініка АНД»



О.І. Данильчук

## ДОДАТОК Б - Список опублікованих праць здобувача

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Ляшок, І.О., Плаван, В.П., Іщенко, О.В., Годунко, А.А., Швець, В.В. Властивості гібридних гідрогелів з додаванням модифікованого крохмалю та глини монтморилонітового типу. *Технології та інжиніринг*. 2023; 24 (3): 47–55. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.3.5>

2. Ляшок, І., Крюкова, О., Швець, В., Кичужинець, М., Галаган, В. Фізичні властивості гідрогелів та плівок пвс на основі водного екстракту кропиви дводомної. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024; 343(6(1)): 412-417. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-61>

3. Ляшок, І.О., Плаван, В.П., Крюкова, О.А., Полушкін, М.М., Швець, В.В., Шаповалова, Я.С. Вплив полісахаридів на фізичні властивості ПВС плівок та гідрогелів на основі водного екстракту ромашки лікарської (*Matricaria Chamomilla*). *Технології та інжиніринг*. 2025; 26(5): 101–109. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.5.10>

4. Швець, В., Ляшок, І. Вплив фітоекстрактів на реологію та густину полімерних матриць полівінілового спирту/карбоксиметилкрохмалю в технології стоматологічних плівок. *Технології та інжиніринг*. 2026; 27 (3): 8–16. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2026.3.1>

5. Ляшок І.О., Плаван В.П., Швець В.В., Смачило О.В., Крюкова О.А. Біосумісні гідрогелі на основі композицій полівініловий спирт/карбоксиметилкрохмаль: властивості та перспективи використання. *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2026; 2(25):60-69.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Current trends in the production of polymer film materials for dental purposes V. Shvets, V. Plavan, O. Ishchenko, I. Liashok, M. Koliada Advanced polymer materials and technologies: recent trends and current priorities: multi-

authored monograph / edited by V. Levytskyi, V. Plavan, V. Skorokhoda, V. Khomenko. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2022. – P. 25-31

2. I.O. Liashok, M.S. Kychuzhynets, O.A. Kryukova, O.O. Butenko, V.V. Shvets. Prospects of the use of polymer materials based on natural extracts of nettle // Modern polymer materials and technologies: collective monograph / edited by K. Sukhyi, V. Levytskyi, V. Plavan, V. Skorokhoda. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2024. – p.165-170.

3. Anastasija Godunko, Irina Liashok, Viktoriia Plavan, Olena Ishchenko, Viacheslav Shvets Hydrogels with the addition of modified Kparch and clay of the montmorillonite type. - AbKpract book 67th h International Conference for Kpudents of Physics and Natural Sciences «Open Readings 2024» (23-26 April, 2024, Vilnius), p. 204.

4. Viktoriia Kolomiets, Irina Liashok, Viktoriia Plavan, Olena Kryukova, Viacheslav Shvets. Phytohydrogels with the addition of Kparch and modified Kparch. AbKpract book 68th h International Conference for Kpudents of Physics and Natural Sciences «Open Readings 2025» (13-16 May, 2025, Vilnius), P. 204.

5. Швець В.В., Ляшок І.О., Бутенко О.О., Крюкова О.А., Андрусенко В.В., Лупина Д.О., Корінець В.В. Властивості фітоплівків та фітогідрогелів на основі ПВС та полісахаридів. Інноваційні матеріали та технології: біотехнологія, прикладна хімія, екологія: моногр. Т.2 / за заг. ред. Мокроусової О. Р., Плаван В. П., Київ: КНУТД, 2025. С. 113-121.