

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Лебедева Катерина Олександрівна

УДК 662.749.3

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**БІОЛОГІЧНО АКТИВНІ ПОЛІМЕРНІ ГІДРОГЕЛЕВІ МАТЕРІАЛИ,**  
**МОДИФІКОВАНІ ПОХІДНИМИ ВУГЛІЛЯ**

Спеціальність: 161 – Хімічні технології та інженерія

Галузь знань: 16 – Хімічна інженерія та біоінженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

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



К.О. ЛЕБЕДЄВА

Наукові керівники:

Черкашина Ганна Миколаївна,

кандидат технічних наук, доцент

Клочко Наталія Петрівна,

кандидат технічних наук, старший

науковий співробітник

Харків – 2026

## АНОТАЦІЯ

*Лебедєва К.О.* Біологічно-активні полімерні гідрогелеві матеріали, модифіковані похідними вугілля. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, 2026.

Дисертація спрямована на розвиток наукових основ і методів ефективного використання гумінових солей бурого вугілля для модифікації біополімерних гідрогелів з метою одержання високоефективних біологічно активних полімерних матеріалів.

*Об'єкт дослідження* – процеси одержання біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів, модифікованих похідними вугілля.

*Предмет дослідження* – механізми, технологічні схеми та режимні параметри процесів одержання біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів, модифікованих похідними вугілля у вигляді лужних солей гумінових кислот.

*Метою* дисертаційної роботи є створення основ одержання біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів, модифікованих похідними вугілля.

У *вступі* обґрунтована актуальність задач дослідження, показано зв'язок роботи з науковими темами, сформульована мета та основні задачі, наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, відзначена апробація результатів роботи.

В *першому розділі* вивчено сучасний стан та перспективи одержання біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів, модифікованих похідними вугілля. Розглянута типологія, властивості та використання біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів, наведені напрями одержання природних гідрогелевих полімерних матеріалів з високою біологічною активністю

та зроблено огляд напрямів модифікації природних біополімерних гідрогелів гуміновими кислотами для посилення їх біологічної активності.

В *другому розділі* охарактеризовано необхідний і достатній набір інструментальних, переважно, стандартизованих методів дослідження. В експериментальній частині роботи використані сучасні стандартизовані методи визначення властивостей бурого вугілля та лужних солей гумінових кислот. Дослідження будови, структури, якісних і кількісних характеристик лужних солей гумінових кислот бурого вугілля та біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів здійснено методами технічного, елементного, хімічного, спектрального, ТЕМ мікроскопічного, скануючого електронного мікроскопічного, рентгенівського флуоресцентного мікроаналізу із енергодисперсійною рентгенівською спектроскопією, УФ- та люмінесцентної спектрофотометрії, кондуктометрії та іншими. Дослідження технологічних, реологічних, експлуатаційних та гемостатичних властивостей біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів, модифікованих лужними солями гумінових кислот бурого вугілля вели, як стандартизованими методиками, такі згідно власно розробленого устаткування, діючих ДСТУ, міжнародних стандартів ISO та інших.

У *третьому розділі* описано обґрунтування вибору та дослідження сировинних матеріалів для одержання біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів, модифікованих похідними бурого вугілля. Наведено дослідження раціонального складу біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів для подальшої модифікації похідними бурого вугілля та оптимальних концентрацій основних компонентів біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів при модифікації похідними бурого вугілля.

У *четвертому розділі* наведено дослідження фізико-хімічних особливостей модифікації похідними бурого вугілля біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів. Представлено структурні та морфологічні особливості та фізико-хімічні взаємодії при модифікації лужними солями гумінових кислот біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів.

У п'ятому розділі представлено дослідження експлуатаційних властивостей та розробка напрямів застосування біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів, модифікованих похідними бурого вугілля. Приводяться результати дослідження експлуатаційних властивостей біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів, модифікованих похідними бурого вугілля та опис модифікованих натрієвими солями гумінових кислот бурого вугілля біологічно активних полімерних гідрогелів для одержання трансдермальних гемостатичних матеріалів.

У висновках наведено основні результати наукової роботи щодо вирішення поставлених наукових задач дослідження.

*За результатами дослідження отримано такі наукові результати:*

– встановлено, що саме біологічно активні полімерні гідрогелеві матеріали желатину з 6,4 % мас. альгілату натрію є термочутливими і мають перехід гель-золь, що проявляється в різкому зниженні їх кінематичної в'язкості при фізіологічній температурі 37°C. Саме ці оптимізовані біологічно активні полімерні гідрогелеві матеріали є оптимальними з точки зору їх подальшої модифікації лужними солями гумінових кислот бурого вугілля;

– встановлено, що модифікація біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів желатину з 6,4 % мас. альгілату натрію натрієвою та кальцієвою солями гумінових кислот різних концентрацій, дозволяє контролювати реологічні властивості біополімерних гідрогелів у широкому діапазоні;

– вперше запропоновані схеми модифікації та структури модифікованих натрієвою і кальцієвою солями гумінових кислот біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів желатину з 6,4 % мас. альгілату натрію, відповідно. Встановлено, що для біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів желатину з 6,4 % мас. альгілату натрію, модифікація натрієвою сіллю гумінових кислот через їх взаємодію з альгілатом натрію супроводжується конформаційною зміною вторинної структури желатину. В той же час, схема модифікації кальцієвою сіллю гумінових кислот відбувається за рахунок зшивання желатину та альгілату натрію через іонні взаємодії  $\text{Ca}^{2+}$  між карбоксильними групами

альгінату натрію, желатину та включає такі складові: іони  $\text{Ca}^{2+}$  утворюють хелатні взаємодії між блоками альгінату натрію, желатин може зв'язуватися через іонні взаємодії між аміногрупами та карбоксильними групами альгінату натрію або кальцієвою сіллю гумінових кислот, які додають додаткові точки зв'язування через комплексоутворення з  $\text{Ca}^{2+}$  та водневі зв'язки;

– вперше показано, що біологічно активні полімерні гідрогелі желатину з 6,4 % мас. альгінату натрію при модифікації кальцієвою та натрієвою солями гумінових кислот мають здатність до автофлуоресценції завдяки внутрішнім флуорофорам альгінату та желатину при квантовому виходу флуоресценції до 35%.

*Практичне значення отриманих результатів:*

– створенні біологічно активні полімерні гідрогелеві матеріали желатину з 6,4 % мас. альгінату натрію, модифіковані кальцієвими солями гумінових кислот, завдяки іонному обміну між  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{Na}^+$  із альгінатом натрію, дають змогу одержати більш в'язкі та термостабільні біополімерні гідрогелі системи желатин-альгінат натрію-кальцієва сіль гумінових кислот, які мають високий потенціал для використання для 3Д-біодруку хрящових та суглобних матеріалів при лікуванні ран із помірною та сильною ексудацією;

– розроблені модифіковані натрієвими солями гумінових кислот біологічно активні полімерні гідрогелеві матеріали желатину з 6,4 % мас. альгінатом натрію за рівнем швидкості водопоглинання та здатності до набрякання при фізіологічній температурі у водному розчині 142 мМ NaCl та 2,5 мМ  $\text{CaCl}_2$ , які імітують кров та ексудат із рани, виявили придатність для використання в гемостатичних, ранозагоюючих пов'язках та матеріалах.

– було створено гемостатичні пластри медичного призначення з застосуванням гемостатичних біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів желатину з 6,4 % мас. альгінату натрію, модифікованих натрієвими солями гумінових кислот;

– розроблена технологічна схема використання лужних солей гумінових кислот бурого вугілля, як модифікаторів при одержанні біологічно активних

полімерних гідрогелевих матеріалів желатину з альгінатом натрію, модифікованих лужними солями гумінових кислот бурого вугілля;

– результати розробок гемостатичних біологічно активних полімерних гідрогелевих матеріалів, модифікованих лужними солями гумінових кислот бурого вугілля пройшли успішні напівпромислові випробовування в умовах ПАТ «Хімфармзавод «Червона Зірка» та прийняті до впровадження, що підтверджено актом впровадження;

– теоретичні та практичні результати, які отримані під час виконання досліджень, впроваджені у навчальний процес кафедр загальної фармації, технології переробки нафти, газу та твердого палива та технології пластичних мас і біологічно активних полімерів НТУ «ХП», що підтверджено актами впровадження.

**Ключові слова:** біополімери, біологічна активність, матеріали, синтез, гідрогелі, вугілля, гумінові кислоти, модифікація, гемостатичність, біосумісність, структура, властивості, гель-золь, антимікробність, антиоксидантність.

#### *Список публікацій здобувача*

##### *Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Лебедева К. О., Черкашина Г.М., Савченко Д.О., Лебедев В.В. Вивчення особливостей гелеутворення та реологічних властивостей гідрогелів на основі агар-агару. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2022. № 3. С. 42-51. DOI: 10.20998/2078-5364.2022.3.05 (Б).
2. Miroshnichenko D., Lebedeva K., Cherkashina A., Lebedev V., Tsereniuk O., Krygina N. Study of hybrid modification with humic acids of environmentally safe biodegradable hydrogel films based on hydroxypropyl methylcellulose. *C - Journal of Carbon Research*. 2022. Vol. 8. P. 71. DOI: 10.3390/c8040071 (Scopus, Нідерланди).
3. Лебедева К. О., Черкашина Г. М., Савченко Д. О., Матюхов Д. В., Лебедев В. В. Вивчення біологічно-активних полімерних гідрогелів для

регулювання водно-ліпідного балансу. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2023. № 2. С. 77-84. DOI: 10.20998/2078-5364.2023.2.07. (Б).

4. Lebedev V.V., Miroshnichenko D.V., Lebedeva K.O., Cherkashina A.M., Kariiev A.I. Brown coal humic substances hybrid modified biologically active polymeric hydrogel materials research. *Colloquium-journal*. 2023. №12(171). P. 54-57. DOI: 10.24412/2520-6990-2023-12171-54-57. (Index Copernicus, Польща).

5. Lebedeva K. O., Cherkashina A. M., Masikevych Y. G., Masikevych A. Y., Voronkin A. A., Lebedev V. V. Modeling of smart bio-medical active polymeric hydrogel transdermal materials. *Journal of Engineering Sciences*. 2024. Vol. 11(1). P. C1–C7. DOI: 10.21272/jes.2024.11(1).c1. (A, Scopus, Україна).

6. Lebedev V., Lebedeva K., Cherkashina A., Voronkin A., Kopach V., Petrushenko S., Fedonenko A., Klochko N. Biopolymer-based sustainable Internet of Things for smart homes. *Discover Civil Engineering*. 2024. Vol. 1. P. 20. DOI: 10.1007/s44290-024-00021-x. (DOAJ, Німеччина)

7. Miroshnichenko D., Lebedeva K., Lebedev V., Cherkashina A., Petrushenko S., Hrubnyk I., Yudina Y., Bogoyavlenska O., Klochko N., Lysenko L., Miroshnychenko M. Hemostatic ability of thermosensitive biologically active gelatin-alginate hydrogels modified with humic acids and impregnated with aminocaproic acid. *Journal of Research Updates in Polymer Science*. 2024. Vol. 13. P. 155–160. DOI: 10.6000/1929-5995.2024.13.16. (Scopus, Канада).

8. Lebedev V., Lebedeva K., Cherkashina A., Petrushenko S., Bogatyrenko S., Olkhovska A., Hrubnyk I., Maloshtan L., Kopach V., Klochko N. Hemostatic gelatin-alginate hydrogels modified with humic acids and impregnated with aminocaproic acid. *Journal of Research Updates in Polymer Science*. 2024. Vol. 13. P. 34–44. DOI: 10.6000/1929-5995.2024.13.05. (Scopus, Канада).

9. Miroshnichenko D., Lebedev V., Lebedeva K., Cherkashina A., Petrushenko S., Bogoyavlenska O., Olkhovska A., Hrubnyk I., Maloshtan L., Klochko N. Thermosensitive and wound-healing gelatin-alginate biopolymer hydrogels modified with humic acids. *Journal of Renewable Materials*. 2024. Vol. 12. P. 1691–1713. doi: 10.32604/jrm.2024.054769. (Scopus, США).

10. Petrushenko S.I., Fijalkowski M., Adach K., Lebedev V., Lebedeva K., Cherkashina A., Rudnieva K.I., Klochko N.P.. Autofluorescent activity of thermosensitive, hemostatic, and wound healing biopolymer hydrogels. *Gels*. 2025. Vol. 11(4). P. 301. DOI: 10.3390/gels11040301. (Scopus, Швейцарія).

11. Лебедева К. О., Матюхов Д. В., Черкашина Г. М., Терещенко І. А., Литвиненко Є.І. Сучасні тренди використання біологічно-активних гелеутворюючих полісахаридів у харчовій галузі, косметології та медицині. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. 2025. № 1 (13). С. 67-73. DOI: 10.20998/2079-0821.2025.01.10 (Б).

*Розділи монографій:*

12. Miroshnichenko D., Pyshyev S., Lebedev V., Korchak B., Shved M., Lebedeva K., Cherkashina A., Savchenko D., Klochko N., Tykhomyrova T., Lysenko L.. The rational use of lignite resources: monograph. *Advances in Environmental Research*. Vol. 97. Chapter 1. Nova. 2023. P. 1–63. (Нідерланди).

13. Lebedeva K., Cherkashina A., Tykhomyrova T., Lebedev V. Study of smart bioactive humic-polymeric hydrogel transdermal materials. *Materials Science Forum*. 2023. Vol. 1096. P. 121–8. DOI: 10.4028/p-lhxqi1. (Scopus, Швейцарія).

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

14. Черкашина Г. М. Лебедева К. О., Савченко Д. О. Біологічно-активні полімерні гідрогелеві матеріали трансдермальних систем доставки речовин. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: MicroCAD-2022: тези доповідей XXX Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків: НТУ «ХПІ», 2022. С. 484.

15. Лебедева К. О., Черкашина Г.М., Савченко Д.О., Лендич Є. С., Мазченко М. В., Матюхов Д. В. Дослідження гібридної модифікації похідними вугілля екологічно безпечних гідрогелів. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених: збірка тез XVI Міжнародної науково-практичної конференції магістрантів та аспірантів*. Харків: НТУ «ХПІ», 2022. С. 304

16. Лебедева К. О., Черкашина Г.М., Воронкін А. А., Савченко Д.О. Дослідження смарт біологічно активних полімерних гідрогелевих

трансдермальних матеріалів, модифікованих гуміновими кислотами. *Сучасні технології переробки паливних копалин: тези доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції*. Харків : НТУ «ХПІ», 2023. С. 61-63.

17. Lebedeva K.O., Cherkashina A.M., Tykhomyrova T.S., Savchenko D.O., Lebedev V.V. Design and researching of biologically active polymeric hydrogel transdermal materials modified by humic acid. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254 (1). P. 012009. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012009. (Scopus, Велика Британія).

18. Lebedeva K., Cherkashina A., Tykhomyrova T., Moiseev V., Lebedev V. Research of biologically active polymeric hydrogel transdermal materials. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 2. P. 211–220. DOI: 10.1007/978-3-031-32774-2\_21(Scopus, Германія).

19. Lebedeva K., Tykhomyrova T., Lebedev V., Cherkashina A., Moiseev V., Masikevych A. Researching of biologically active polymeric hydrogel transdermal nanomaterial's modification by humic acid. *2023 IEEE 13th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP): proceedings*. Bratislava, Slovakia, 2023, P. NSS11-1-NSS11-4. DOI: 10.1109/NAP59739.2023.10310857. (Scopus, Словачія).

20. Lebedeva K., Cherkashina A., Voronkin A., Lebedev V., Klochko N., Masikevych A. Design and researching smart biologically active polymeric hydrogel transdermal nanomaterial's. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek): proceedings*. Kharkiv, Ukraine, 2023. P. 1-5. DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312985. (Scopus, Україна).

21. Lebedeva K.O., Lebedev V.V., Klochko N.P., Cherkashina A.M., Bogoyavlenska O.V., Miroshnichenko D.V. Thermo-responsive hydrogels based on gelatin-alginate composition with humic acids intended for controlled drug delivery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1415(1). P. 012071. DOI: 10.1088/1755-1315/1415/1/012071. (Scopus, Велика Британія).

22. Lebedeva K., Klochko N., Miroshnichenko D., Cherkashina A., Bogoyavlenska O., Lebedev V. Design and research of thermo-responsive gelatin-

alginate-humic nanocomposite hydrogels for controlled drug delivery. *2024 IEEE 14th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP): proceedings*. Riga, Latvia, 2024. P. 1-6. DOI: 10.1109/NAP62956.2024.10739758. (Scopus, Латвія).

23. Lebedeva K., Cherkashina A., Kopach V., Lebedev V., Miroshnichenko D., Klochko N. Kinetics and degree of swelling of hemostatic hydrogels with a gelatin-alginate system modified with humic acids. *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek): proceedings*. Kharkiv, Ukraine, 2024. P. 1-5. DOI: 10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878043. (Scopus, Україна).

24. Лебедева К.О., Черкашина Г.М., Петрушенко С.І., Богатиренко С. І., Ольховська А.Б. Грубник І.М., Лебедев В.В., Ключко Н.П., Грушецький В. О. Дослідження гемостатичної здатності новітніх термочутливих біологічно активних желатин-альгінатних гідрогелів. *Сучасні полімерні матеріали та композити: одержання, переробка та дослідження: тези доповідей I Міжнародної науково-технічної конференції*. Харків: НТУ «ХПІ», 2025. С. 61.

## ABSTRACT

*Lebedieva K.O.* Biologically-active polymer hydrogel materials modified with coal derivatives. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 161 – Chemical technologies and engineering. – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2026.

The dissertation is aimed at developing scientific foundations and methods for the effective use of humic salts of brown coal for the modification of biopolymer hydrogels in order to obtain highly effective biologically active polymer materials.

*Object of research* – processes of obtaining biologically active polymer hydrogel materials modified with coal derivatives.

*Subject of research* – mechanisms, technological schemes and regime parameters of processes of obtaining biologically active polymer hydrogel materials modified with coal derivatives in the form of alkaline salts of humic acids.

*The purpose of the dissertation* is to create the foundations of obtaining biologically active polymer hydrogel materials modified with coal derivatives.

*The introduction* substantiates the relevance of the research tasks, shows the connection of the work with scientific topics, formulates the goal and main tasks, gives the scientific novelty and practical significance of the results obtained, determines the personal contribution of the applicant, and notes the approval of the results of the work.

*The first section* studies the current state and prospects for obtaining biologically active polymer hydrogel materials modified with coal derivatives. The typology, properties and use of biologically active polymer hydrogel materials are considered, directions for obtaining natural hydrogel polymer materials with high biological activity are given, and a review of the directions for modifying natural biopolymer hydrogels with humic acids to enhance their biological activity is made.

*The second section* describes the necessary and sufficient set of instrumental, mainly standardized research methods is characterized. In the experimental part of the work, modern standardized methods for determining the properties of brown coal and

alkaline salts of humic acids are used. The study of the structure, structure, qualitative and quantitative characteristics of alkaline salts of humic acids of brown coal and biologically active polymer hydrogel materials was carried out by the methods of technical, elemental, chemical, spectral, TEM microscopic, scanning electron microscopic, X-ray fluorescence microanalysis with energy-dispersive X-ray spectroscopy, UV and luminescent spectrophotometry, conductometry and others. The study of the technological, rheological, operational and hemostatic properties of biologically active polymer hydrogel materials modified with alkaline salts of humic acids of brown coal was carried out by standardized methods, such as according to the equipment developed by the company, the current DSTU, international ISO standards and others..

*The third section* describes the justification for the selection and study of raw materials for the production of biologically active polymer hydrogel materials modified with brown coal derivatives. A study of the rational composition of biologically active polymer hydrogel materials for further modification with brown coal derivatives and optimal concentrations of the main components of biologically active polymer hydrogel materials during modification with brown coal derivatives is presented.

*The fourth section* presents a study of the physicochemical features of modification of biologically active polymer hydrogel materials with brown coal derivatives. Structural and morphological features and physicochemical interactions during modification of biologically active polymer hydrogel materials with alkaline salts of humic acids are presented.

*The fifth section* presents a study of the operational properties and development of directions for the application of biologically active polymer hydrogel materials modified with brown coal derivatives. The results of the study of the operational properties of biologically active polymer hydrogel materials modified with brown coal derivatives are presented and a description of biologically active polymer hydrogels modified with sodium salts of humic acids of brown coal for obtaining transdermal hemostatic materials is given.

*The conclusions* present the main results of scientific work on solving the scientific problems of the study.

*According to the results of the study, the following scientific results were obtained:*

– it was established that biologically active polymeric hydrogel materials of gelatin with 6.4% wt. sodium alginate are thermosensitive and have a gel-sol transition, which is manifested in a sharp decrease in their kinematic viscosity at a physiological temperature of 37 °C. It is these optimized biologically active polymeric hydrogel materials that are optimal from the point of view of their further modification with alkaline salts of humic acids of brown coal;

– it was established that the modification of biologically active polymeric hydrogel materials of gelatin with 6.4 % wt. sodium alginate with sodium and calcium salts of humic acids of different concentrations allows controlling the rheological properties of biopolymer hydrogels in a wide range;

– for the first time, modification schemes and structures of biologically active polymeric hydrogel materials of gelatin modified with sodium and calcium salts of humic acids with 6.4 wt. % sodium alginate, respectively, were proposed. It was found that for biologically active polymeric hydrogel materials of gelatin with 6.4 wt. % sodium alginate, modification with sodium salt of humic acids due to their interaction with sodium alginate is accompanied by a conformational change in the secondary structure of gelatin. At the same time, the scheme of modification with calcium salt of humic acids occurs due to crosslinking of gelatin and sodium alginate through ionic interactions of  $\text{Ca}^{2+}$  between carboxyl groups of sodium alginate, gelatin and includes the following components:  $\text{Ca}^{2+}$  ions form chelate interactions between sodium alginate blocks, gelatin can bind through ionic interactions between amino groups and carboxyl groups of sodium alginate or calcium salt of humic acids, which add additional binding points through complexation with  $\text{Ca}^{2+}$  and hydrogen bonds;

– it was shown for the first time that biologically active polymer hydrogels of gelatin with 6.4 wt. % sodium alginate when modified with calcium and sodium salts of humic acids have the ability to autofluorescence due to internal fluorophores of alginate and gelatin with a fluorescence quantum yield of up to 35%.

*Practical significance of the results obtained:*

– the creation of biologically active polymer hydrogel materials of gelatin with 6.4% wt. sodium alginate, modified with calcium salts of humic acids, due to ion exchange between  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Na}^+$  with sodium alginate, allows obtaining more viscous and thermally stable biopolymer hydrogels of the gelatin-sodium alginate-calcium salt of humic acids system, which have high potential for use for 3D-bioprinting of cartilage and joint materials in the treatment of wounds with moderate and severe exudation;

– biologically active polymer hydrogel materials of gelatin with 6.4 % wt. sodium alginate modified with humic acids were developed. sodium alginate in terms of water absorption rate and swelling ability at physiological temperature in an aqueous solution of 142 mM NaCl and 2.5 mM  $\text{CaCl}_2$ , which simulate blood and wound exudate, have shown suitability for use in hemostatic, wound-healing dressings and materials.

– hemostatic medical plasters were created using hemostatic biologically active polymeric hydrogel materials of gelatin with 6.4 % wt. sodium alginate, modified with sodium salts of humic acids;

– a technological scheme for using alkaline salts of humic acids of brown coal as modifiers in the production of biologically active polymeric hydrogel materials of gelatin with sodium alginate, modified with alkaline salts of humic acids of brown coal;

– the results of the development of hemostatic biologically active polymer hydrogel materials modified with alkaline salts of humic acids of brown coal have successfully passed semi-industrial tests in the conditions of PJSC “Chempharmaceutical Plant “Chervona Zirka” and have been accepted for implementation, which is confirmed by the act of implementation;

– the theoretical and practical results obtained during the research have been implemented in the educational process of the departments of general pharmacy, technology of oil, gas and solid fuel processing and technology of plastics and biologically active polymers of NTU “KhPI”, which is confirmed by the acts of implementation.

**Keywords:** biopolymers, biological activity, materials, synthesis, hydrogels, coal, humic acids, modification, hemostaticity, biocompatibility, structure, properties, gel-sol, antimicrobial, antioxidant.

*List of the applicant's publications*

*Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:*

1. Lebedieva K. O., Cherkashyna H.M., Savchenko D.O., Lebediev V.V. Vyvchennia osoblyvostei helevtvorennia ta reolohichnykh vlastyvostei hidrohelei na osnovi ahara-aharu. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. 2022. № 3. S. 42-51. DOI: 10.20998/2078-5364.2022.3.05 (Б).
2. Miroshnichenko D., Lebedeva K., Cherkashina A., Lebedev V., Tsereniuk O., Krygina N. Study of hybrid modification with humic acids of environmentally safe biodegradable hydrogel films based on hydroxypropyl methylcellulose. *C - Journal of Carbon Research*. 2022. Vol. 8. P. 71. DOI: 10.3390/c8040071 (Scopus, Niderlandy).
3. Lebedieva K. O., Cherkashyna H. M., Savchenko D. O., Matiukhov D. V., Lebediev V. V. Vyvchennia biolohichno-aktyvnykh polimernykh hidroheliiv dlia rehuliuвання vodno-lipidnoho balansu. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. 2023. № 2. S. 77-84. DOI: 10.20998/2078-5364.2023.2.07 (Б).
4. Lebedev V.V., Miroshnichenko D.V., Lebedeva K.O., Cherkashina A.M., Kariiev A.I. Brown coal humic substances hybrid modified biologically active polymeric hydrogel materials research. *Colloquium-journal*. 2023. №12(171). R. 54-57. DOI: 10.24412/2520-6990-2023-12171-54-57. (Index Copernicus, Polsha).
5. Lebedeva K. O., Cherkashina A. M., Masikevych Y. G., Masikevych A. Y., Voronkin A. A., Lebedev V. V. Modeling of smart bio-medical active polymeric hydrogel transdermal materials. *Journal of Engineering Sciences*. 2024. Vol. 11(1). P. C1–C7. DOI: 10.21272/jes.2024.11(1).c1. (A, Scopus, Ukraina).
6. Lebedev V., Lebedeva K., Cherkashina A., Voronkin A., Kopach V., Petrushenko S., Fedonenko A., Klochko N. Biopolymer-based sustainable Internet of

Things for smart homes. *Discover Civil Engineering*. 2024. Vol. 1. P. 20. DOI: 10.1007/s44290-024-00021-x. (DOAJ, Nimechyna)

7. Miroshnichenko D., Lebedeva K., Lebedev V., Cherkashina A., Petrushenko S., Hrubnyk I., Yudina Y., Bogoyavlenska O., Klochko N., Lysenko L., Miroshnychenko M. Hemostatic ability of thermosensitive biologically active gelatin-alginate hydrogels modified with humic acids and impregnated with aminocaproic acid. *Journal of Research Updates in Polymer Science*. 2024. Vol. 13. P. 155–160. DOI: 10.6000/1929-5995.2024.13.16. (Scopus, Kanada).

8. Lebedev V., Lebedeva K., Cherkashina A., Petrushenko S., Bogatyrenko S., Olkhovska A., Hrubnyk I., Maloshtan L., Kopach V., Klochko N. Hemostatic gelatin-alginate hydrogels modified with humic acids and impregnated with aminocaproic acid. *Journal of Research Updates in Polymer Science*. 2024. Vol. 13. P. 34–44. DOI: 10.6000/1929-5995.2024.13.05. (Scopus, Kanada).

9. Miroshnichenko D., Lebedev V., Lebedeva K., Cherkashina A., Petrushenko S., Bogoyavlenska O., Olkhovska A., Hrubnyk I., Maloshtan L., Klochko N. Thermosensitive and wound-healing gelatin-alginate biopolymer hydrogels modified with humic acids. *Journal of Renewable Materials*. 2024. Vol. 12. P. 1691–1713. doi: 10.32604/jrm.2024.054769. (Scopus, SShA).

10. Petrushenko S.I., Fijalkowski M., Adach K., Lebedev V., Lebedeva K., Cherkashina A., Rudnieva K.I., Klochko N.P.. Autofluorescent activity of thermosensitive, hemostatic, and wound healing biopolymer hydrogels. *Gels*. 2025. Vol. 11(4). P. 301. DOI: 10.3390/gels11040301. (Scopus, Shveitsariia).

11. Lebedieva K. O., Matiukhov D. V., Cherkashyna H. M., Tereshchenko I. A., Lytvynenko Ye.I. Suchasni trendy vykorystannia biolohichno-aktyvnykh helevtvoriiuichykh polisakharydiv u kharchovii haluzi, kosmetolohii ta medytsyni. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: *Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia*. 2025. № 1 (13). S. 67-73. DOI: 10.20998/2079-0821.2025.01.10 (Б).

12. Miroshnichenko D., Pyshyev S., Lebedev V., Korchak B., Shved M., Lebedeva K., Cherkashina A., Savchenko D., Klochko N., Tykhomyrova T., Lysenko L.. The

rational use of lignite resources: monograph. *Advances in Environmental Research*. Vol. 97. Chapter 1. Nova. 2023. R. 1–63. (Niderlandy).

13. Lebedeva K., Cherkashina A., Tykhomyrova T., Lebedev V. Study of smart bioactive humic-polymeric hydrogel transdermal materials. *Materials Science Forum*. 2023. Vol. 1096. P. 121–8. DOI: 10.4028/p-lhxqi1. (Scopus, Shveitsariia).

*Published works of approbation nature:*

14. Cherkashyna H. M. Lebedieva K. O., Savchenko D. O. Biologichno-aktyvni polimerni hidrohelevi materialy transdermalnykh system dostavky rehovyn. *Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: MicroCAD-2022: tezy dopovidei KhKhKh Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2022. S. 484.

15. Lebedieva K. O., Cherkashyna H.M., Savchenko D.O., Liendych, Ye. S., Mazchenko, M. V., Matiukhov, D. V. Doslidzhennia hibrydnoi modyfikatsii pokhidnymy vuhillia ekolohichno bezpechnykh hidroheliiv. *Teoretychni ta praktychni doslidzhennia molodykh vchenykh: zbirka tez XVI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsi mahistrantiv ta aspirantiv*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2022. S. 304.

16. Lebedieva K. O., Cherkashyna H.M., Voronkin A. A., Savchenko D.O. Doslidzhennia smart biologichno aktyvnykh polimernykh hidrohelevykh transdermalnykh materialiv, modyfikovanykh huminovymy kyslotamy. *Suchasni tekhnolohii pererobky palnykh kopalyn: tezy dopovidei VI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2023. S. 61-63.

17. Lebedeva K.O., Cherkashina A.M., Tykhomyrova T.S., Savchenko D.O., Lebedev V.V. Design and researching of biologically active polymeric hydrogel transdermal materials modified by humic acid. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254 (1). R. 012009. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012009. (Scopus, Velyka Brytaniia).

18. Lebedeva K., Cherkashina A., Tykhomyrova T., Moiseev V., Lebedev V. Research of biologically active polymeric hydrogel transdermal materials. *Lecture Notes*

*in Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 2. P. 211–220. DOI: 10.1007/978-3-031-32774-2\_21(Scopus, Hermaniia).

19. Lebedeva K., Tykhomyrova T., Lebedev V., Cherkashina A., Moiseev V., Masikevych A. Researching of biologically active polymeric hydrogel transdermal nanomaterials modification by humic acid. *2023 IEEE 13th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP): proceedings*. Bratislava, Slovakia, 2023, R. NSS11-1-NSS11-4. DOI: 10.1109/NAP59739.2023.10310857. (Scopus, Slovakia).

20. Lebedeva K., Cherkashina A., Voronkin A., Lebedev V., Klochko N., Masikevych A. Design and researching smart biologically active polymeric hydrogel transdermal nanomaterials. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek): proceedings*. Kharkiv, Ukraine, 2023. R. 1-5. DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312985. (Scopus, Ukraina).

21. Lebedeva K.O., Cherkashina A.M., Tykhomyrova T.S., Savchenko D.O., Lebedev V.V. Design and researching of biologically active polymeric hydrogel transdermal materials modified by humic acid. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254 (1). R. 012009. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012009. (Scopus, Velyka Brytaniia).

22. Lebedeva K., Klochko N., Miroshnichenko D., Cherkashina A., Bogoyavlenska O., Lebedev V. Design and research of thermo-responsive gelatin-alginate-humic nanocomposite hydrogels for controlled drug delivery. *2024 IEEE 14th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP): proceedings*. Riga, Latvia, 2024. R. 1-6. DOI: 10.1109/NAP62956.2024.10739758. (Scopus, Latviia).

23. Lebedeva K., Cherkashina A., Kopach V., Lebedev V., Miroshnichenko D., Klochko N. Kinetics and degree of swelling of hemostatic hydrogels with a gelatin-alginate system modified with humic acids. *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek): proceedings*. Kharkiv, Ukraine, 2024. R. 1-5. DOI: 10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878043. (Scopus, Ukraina).

24. Lebedieva K.O., Cherkashyna H.M., Petrushenko S.I., Bohatyrenko S. I., Olkhovska A.B. Hrubnyk I.M., Lebediev V.V., Klochko N.P., Hrushetskyi V. O. Doslidzhennia hemostatychnoi zdatnosti novitnikh termochutlyvykh biolohichno aktyvnykh zhelatyn-alhinatnykh hidroheliu. *Suchasni polimerni materialy ta kompozyty: oderzhannia, pererobka ta doslidzhennia: tezy dopovidei I Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2025. S. 61.