

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-60>

УДК 541.64: 539.2:537.5

ЛЯШОК ІРИНА

Київський Національний Університет Технологій та Дизайну

<https://orcid.org/0000-0001-9171-1075>

e-mail: lyashok.io@knuutd.com.ua

СІКОРА АНДРІЙ

Київський Національний Університет Технологій та Дизайну

<https://orcid.org/0009-0004-0517-121X>

e-mail: andsikroa@meta.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ВИГОТОВЛЕНИХ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОФОРМУВАННЯ З РОЗЧИНІВ ПВС НА ОСНОВІ РОСЛИННИХ ЕКСТРАКТІВ

В роботі наведено результати досліджень властивостей нетканних волокнистих матеріалів (НВМ) на основі водних екстрактів кори дуба *Quercus cortex* та евкаліпту кулястого *Eucalyptus globulus* одержаних методом електроформування. Досліджено морфологічні особливості отриманих НВМ з використанням оптичної мікроскопії та доведено, що при напрузі електричного поля 30 кВ та відстані між електродами 16-18 см отримуються волокна з діаметрами від 1 до 3 мкм. Встановлено значення паропропускності для одержаних НВМ та відповідних плівок. Було визначено показники водопоглинання для плівок із термостабілізацією та без стабілізації.

Ключові слова: електроформування, полівініловий спирт, нетканний волокнистий матеріал, водні екстракти лікарських рослин.

LIASHOK IRINA

SIKORA ANDRII

Kyiv National University of Technologies and Design

RESEARCH ON THE PROPERTIES OF MATERIALS PREPARED BY ELECTROSPINNING FROM PVA SOLUTIONS BASED ON PLANT EXTRACTS

In this study, nonwoven fibrous materials (NFM) were obtained from aqueous extracts of oak bark (*Quercus cortex*) and blue gum eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) by electrospinning under controlled laboratory conditions. The process was carried out at a voltage of 30 kV and an electrode distance of 16–18 cm, which ensured the stable formation of polymer jets. Optical microscopy confirmed that the chosen parameters allowed the fabrication of fibers with diameters ranging from 1 to 3 μm , characteristic of nanofibrous systems with a high surface-to-volume ratio and favorable morphological properties. It was proven that the water vapor permeability of NFM based on the aqueous extract of oak bark *Quercus cortex* with a sample thickness of 0.15 mm is 1.843 mg/cm^2 , while for NFM based on the aqueous extract of blue gum eucalyptus *Eucalyptus globulus* with a sample thickness of 0.07 mm it is 1.471 mg/cm^2 . It was demonstrated that the vapor permeability of electrospun NFMs exceeded that of films prepared from similar polymer solutions by 400–500%, which is explained by the very high specific surface area, the presence of open porous channels, and the developed capillary structure that facilitates diffusion and moisture transport. Thermal stabilization of NFMs for 3 h at 80 °C increased the maximum water absorption of *Quercus cortex*-based samples by 10.7% and of *Eucalyptus globulus*-based samples by 18.6%. Moreover, stabilization of the corresponding film samples enhanced both the maximum and the equilibrium degree of water absorption, which indicates the formation of more structurally organized and stable materials. This phenomenon can be attributed to the presence of tannins and polyphenolic compounds in aqueous plant extracts, which promote intermolecular hydrogen bonding, increase the degree of supramolecular ordering, and thereby contribute to the overall stabilization of the polymer matrix.

Keywords: electrospinning, polyvinyl alcohol, nonwoven fibrous material, aqueous extracts of medicinal plants.

Стаття надійшла до редакції / Received 07.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У наш час значна увага дослідників зосереджена на розробці ефективних методів одержання матеріалів, структурні елементи яких мають ультра- та нанорозміри. Одним із доступних та ефективних способів є метод електроформування (ЕФ), який дозволяє отримувати неткані волокнисті матеріали (НВМ) з діаметром волокон менше 100 нм. Подібні НВМ — це високопористі волокнисті мати з хаотичною структурою, характерною рисою яких є значно більша питома поверхня порівняно з матеріалами, виготовленими традиційними методами.

Електроформуванням називають процес отримання волокнистих матеріалів під дією електростатичних сил на заряджений потік полімерного розчину чи розплаву. Різноманітні контакти джерела електричного поля підключають до вихідного та осаджувального електродів, що розміщені на такій відстані, котра забезпечує стабільне формування зразків та водночас унеможливорює виникнення дугового розряду (зазвичай така відстань складає від 10 до 30 см). У якості осаджувального електрода (ОЕ) зазвичай використовують пластини сітки або барабани, у якості вихідного — капіляри або пакети капілярів, сітки, а також голчасті барабани при подачі матеріалу з ванни. Під дією електричного поля молекули полімеру поблизу вихідного електрода набувають однойменного заряду та під впливом кулонівських сил витягуються у тонкий струмінь, що прямує до протилежно зарядженого електрода. Під час переміщення струменя між електродами, однойменно заряджені молекули полімеру взаємно відштовхуються, що призводить до поділу струменя на численні тонкі волокна, котрі хаотично осідають на поверхню ОЕ. У результаті процесу утворюється неткана волокниста структура з ультратонких волокон, що має розвинену питому поверхню.

Важливим технологічним обмеженням процесу електроформування є відносно низький вихід готового матеріалу, який навіть на сучасних промислових установках, оснащених системами капілярів і рухомих ОЕ не перевищує 3000 г на годину. Об'єм полімерного розчину або розплаву, що може бути одночасно залучений до процесу, обмежується пропускною здатністю капілярів. Збільшення їх кількості призводить до значного ускладнення контролю параметрів формування волокон, що впливає на стабільність та якість одержуваного матеріалу. Попри це, подібне обмеження не знижує цінності методу для виготовлення високоспеціалізованих матеріалів із заданими властивостями, де критично важливим є не обсяг виробництва, а унікальні характеристики отриманих волокон.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Багато авторів розглядають метод електроформування як перспективний підхід до отримання нових перев'язувальних матеріалів, здатних включати до свого складу біологічно активні функціональні компоненти. Як такі компоненти часто застосовують речовини, отримані з відновлюваної природної сировини. Відомо, що рослинна сировина у своєму складі містить алкалоїди, флаваноїди, глікозиди та ефірні олії [1]. Ці сполуки, на відміну від синтетичних, є екологічно стійкими, дешевшими, доступнішими, нетоксичними та мають мінімальні побічні реакції. Зокрема у своїх роботах автори використовують фітопрепарати на основі *Chromolaena odorata* (хромолена запашна) [2], *Argemone mexicana* (аргемона мексиканська) [3], *Betula spp.* (кора берези) [4], зелений прополіс (*Green propolis*, похідний з *Baccharis dracunculifolia*) [5].

У якості полімерної матриці в таких дослідженнях переважно використовується полівініловий спирт (ПВС), що зумовлено його біосумісністю, нетоксичністю та здатністю утворювати стабільні плівкові та волокнисті структури. Водночас істотним недоліком ПВС є його низька гідрофільність, покращення якої досягається за рахунок внесення у склад розчину гідрофільних добавок, наприклад хітозану [6]. Перечисленні вище властивості ПВС дозволяють розглядати його як основу для виготовлення інтерактивних або біоактивних пов'язок згідно з класифікацією Ердема Рамазана [7].

Чисельні автори, у своїх роботах, підтвердили ефективність одержання НВМ методом ЕФ. Було підтверджено морфологію волокон для зразків одержаних з розчинів ПВС (5-20% мас.) із додаванням тритерпенів із зовнішньої кори берези за допомогою скануючої електронної мікроскопії [4]. Було встановлено, що додавання екстракту аргемони мексиканської покращує термічну стабільність полімерної матриці, а нановолокна одержані з додаванням екстракту демонструють потенційну антибактеріальну та антигрибкову активність проти *Penicillium pinophilum*, *Staphylococcus aureus* та *Staphylococcus epidermidis* [3]. Методом агарового диска, було встановлено, що зразки НВМ з розчинів ПВС, котрі містять екстракт з листя хромолени запашної проявляють незначну антибактеріальну властивість проти *Staphylococcus aureus* та *Escherichia coli* [2].

Аналіз останніх досліджень підкреслює актуальність розробки нових ультратонких нетканих матеріалів методом ЕФ з метою подальшого використання у складі ранових пов'язок та у косметичці.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є встановлення показників паропроникності НВМ одержаних методом ЕФ та впливу термостабілізації на водорозчинність зразків, виготовлених з розчинів полівінілового спирту на основі водного екстракту кори дуба *Quercus cortex* та евкаліпту кулястого *Eucalyptus globulus*.

Виклад основного матеріалу

В роботі розглянуто можливість створення ультратонких нетканих матеріалів з розчинів ПВС приготованих на основі водних екстрактів лікарських рослин. Для одержаних зразків було проведено дослідження на паропроникність, визначено статистичний розподіл волокон за діаметром та проведено дослідження на водопоглинання на відповідних НВМ плівках.

У якості матричного полімеру для процесу ЕФ було використано ПВС марки 17-99, щільністю 1,3 г/см³, що має температуру плавлення 225°C та температуру розкладу 230°C. Масова концентрація ПВС в розчинах складала 10%.

У якості сировини для одержання водних екстрактів було використано фітопрепарати виробництва ПрАТ «Ліктрави»: *Quercus cortex* (дуба кора), фармакотерапевтична група: засоби для місцевого застосування у стоматології, код: АТХ А01А D11; *Eucalyptus globulus* (евкаліпт кулястий), фармакотерапевтична група: засоби, що застосовуються при захворюваннях горла, антисептики, код: R02AA20.

В роботі для одержання зразків НВМ застосовувалась лабораторна установка капілярно типу схематичне зображення якої надано на рис. 1.

У якості осаджувального електрода було використано пластину з нержавіючої сталі, що розміщувалась на ізолюваному штативі на відстані 16-18 см від капіляра діаметром 0,33 мм. Напруга джерела електричного поля складала 30кВ, а точність дозування забезпечувалась за рахунок інфузомату та складала 0,2 мл/год.

Водні екстракти лікарських рослин готувались при співвідношенні сухої сировини до дистильованої води: кора дуба (10 г на 100мл); евкаліпт кулястий (10 г на 200 мл). Для одержання водного екстракту кори дуба *Quercus cortex* та евкаліпту кулястого *Eucalyptus globulus* проводили настоювання на водяній бані 30 хвилин при температурі екстракції 95°C, а потім охолодження протягом 15 хв. при кімнатній температурі. Після чого проводили проціджування з наступною фільтрацією через складчастий фільтр для виключення частин рослин в водному екстракті. Для проведення досліджень, на основі водних екстрактів лікарських рослин, було підготовлено розчини що містили 10% мас. ПВС на водяній бані 40 хв. при постійному перемішуванні.

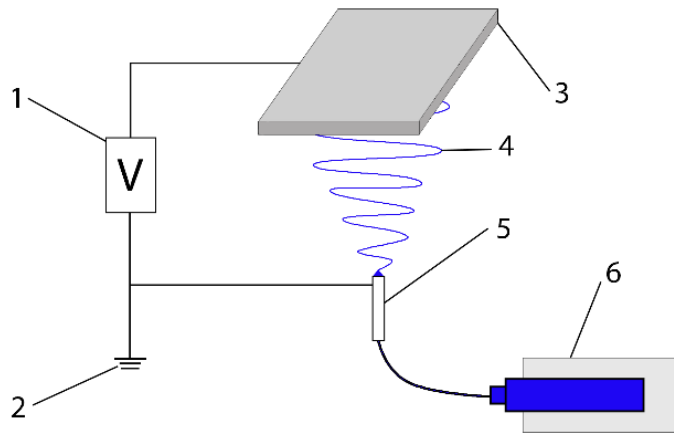


Рис. 1. Схематичне зображення лабораторної установки для електроформування: 1) – джерело постійного струму; 2) – перетворювач напруги; 3) – осаджувальний електрод; 4) – дрейфуючі волокна; 5) – капіляр; 6) – інфузомат

Для одержаних НВМ методом електроформування розчинів ПВС на основі водних екстрактів лікарських рослин було визначено значення електропровідності, які склали для розчину ПВС на основі водного екстракту кори дуба *Quercus cortex* 0,0394 См/м та 0,1216 См/м для розчину ПВС на основі водного екстракту евкаліпту кулястого *Eucalyptus globulus*.

Із одержаних розчинів ПВС методом ЕФ було сформовано зразки НВМ. Процес ЕФ проходив стабільно та був повторюваним. Однак слід зазначити, що з огляду на природну варіабельність хімічного складу фітопрепаратів, якість одержаних зразків та стабільність процесу електроформування певною мірою відрізнялися під час формування волокон із розчинів, приготовлених на основі водних екстрактів однієї й тієї самої рослинної сировини. Це пов'язано з коливаннями вмісту біологічно активних речовин, домішок і екстрактивних компонентів, які можуть впливати на реологічні характеристики розчинів, електропровідність та поведінку струменя в електричному полі.

Отримані НВМ було проаналізовано за допомогою оптичного мікроскопа «Біолам С-11». На рисунку 2 наведено мікрофотографію та статистичний розподіл діаметру волокон зразку НВМ на основі водного екстракту кори дуба *Quercus cortex*, та встановлено, що 83 % волокон мають діаметр від 1 до 2 мкм.

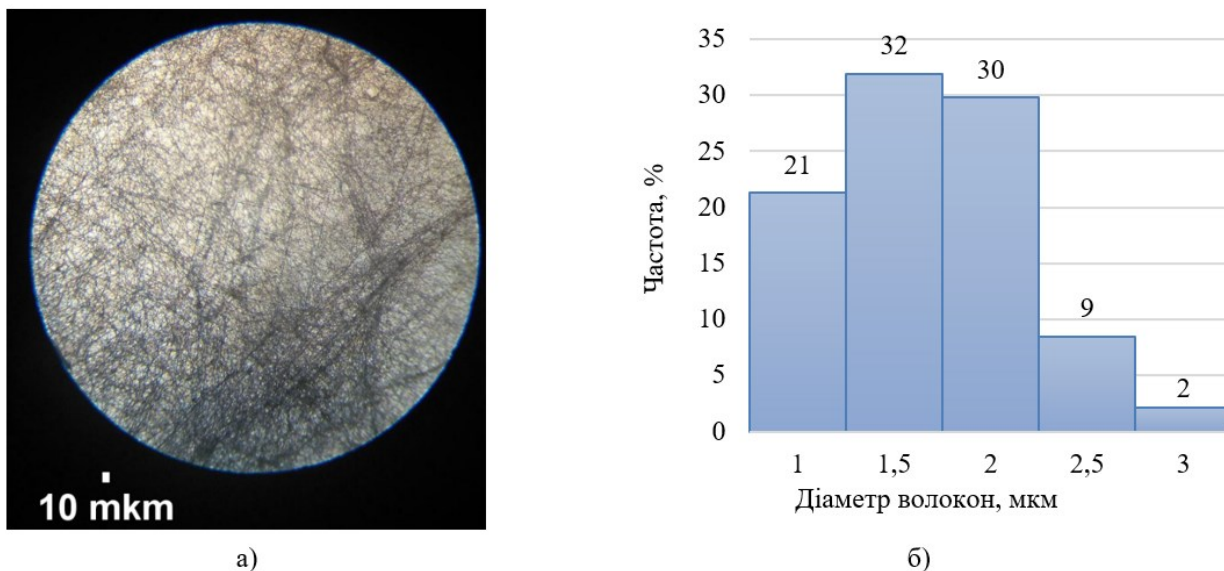
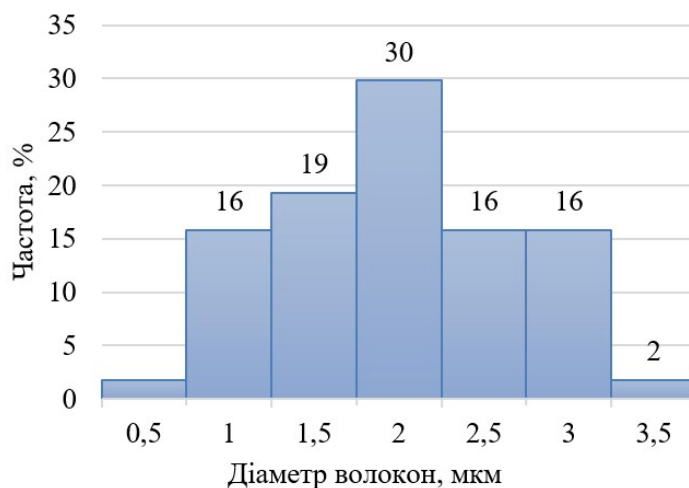
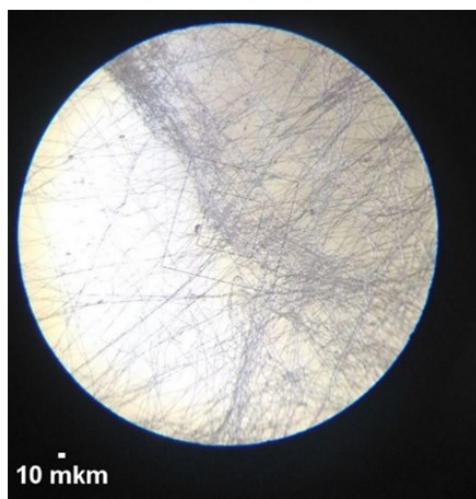


Рис 2. Мікрофотографія а) та статистичний розподіл діаметру волокон б) зразку нетканого волокнистого матеріалу на основі водного екстракту кори дуба *Quercus cortex*

На рисунку 3 наведено мікрофотографію та статистичний розподіл діаметру волокон зразку НВМ на основі водного екстракту евкаліпту кулястого *Eucalyptus globulus*, та встановлено, що 97 % волокон мають діаметр від 1 до 3 мкм.



а)

б)

Рис 3. Мікрофотографія а) та статистичний розподіл діаметру волокон б) зразку нетканого волокнистого матеріалу на основі водного екстракту евкаліпту кулястого *Eucalyptus globulus*

Отже, НВМ на основі водного екстракту евкаліпту кулястого *Eucalyptus globulus* має ширший статистичний розподіл ніж НВМ на основі водного екстракту кори дуба *Quercus cortex*.

З метою дослідження паропроникності, були підготовлені елементарні проби. Дослідження проводилось в камері, що забезпечує стабільне підтримання відносної вологості повітря $65 \pm 5\%$, температури $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$, згідно методики ASTM E96 Standard test methods for water vapor transmission of materials (Стандартні методи дослідження паропроникності матеріалів).

Згідно методики паропроникність (Π) в $\text{мг/см}^2 \cdot \text{год}$ знаходять за формулою:

$$\Pi = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 10^3}{S \cdot t} \quad (1)$$

де m_1 – маса стакана з елементарною пробой перед дослідом, г;

m_2 – маса стакана з елементарною пробой після дослід, г;

S – площа елементарної проби, см^2 ;

t – час дослід, год.

Окрім електроформування, з розчинів ПВС на основі водних екстрактів лікарських рослин виготовлено відповідні зразки плівкових матеріалів шляхом наливного формування. Одержані зразки плівок були досліджені з метою визначення їх паропроникності та водопоглинання.

Для визначення паропроникності зразків НВМ на основі водних екстрактів кори дуба *Quercus cortex* та евкаліпту кулястого *Eucalyptus globulus* використали метод ASTM E96. Результати випробувань представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Значення паропроникності зразків НВМ та відповідних плівок

Склад зразка	Товщина зразка; мм		Паропроникність ; $\text{мг/см}^2 \cdot \text{год}$		Співвідношення паропроникності НВМ/плівка; %
	НВМ	Плівка	НВМ	Плівка	
Кора дуба	0,15	0,09	1,843	0,3686	500
Евкаліпт кулястий	0,07	0,36	1,4707	0,3465	424

Згідно з даними таблиці 1, значення паропроникності для зразків нетканних волокнистих матеріалів суттєво перевищують аналогічні показники плівкових зразків. Навіть за умови, що товщина НВМ є більшою порівняно з плівками, їх паропроникність виявилася в середньому на 500 % вищою, що зумовлено високою пористістю та розвинутою поверхнею волокнистої структури.

У зв'язку з високою питомою площею поверхні відкриті зразки НВМ розчиняються у водному середовищі настільки швидко, що фіксація змін їх маси без використання високоточного обладнання є неможливою. З огляду на це випробування водопоглинання проводили виключно для плівкових зразків. Показник водопоглинання виражають як відношення маси чи об'єму поглинутої зразком води до маси сухого зразка чи його об'єму. Водопоглинання розраховують за формулою:

$$W_m = \frac{m_n - m_c}{m_c} \cdot 100\% \quad (2)$$

де m_n – маса зразка, насиченого водою, г;

m_c – маса зразка, висушеного до сталої маси.

Частина плівок була поміщена у термошафу при температурі 80°C на 3 години для термостабілізації,

інша піддавалась випробуванню без додаткових обробок. Результати водопоглинання для плівок виготовлених на основі екстракту кори дуба та евкаліпту кулястого наведено на рисунках 4.

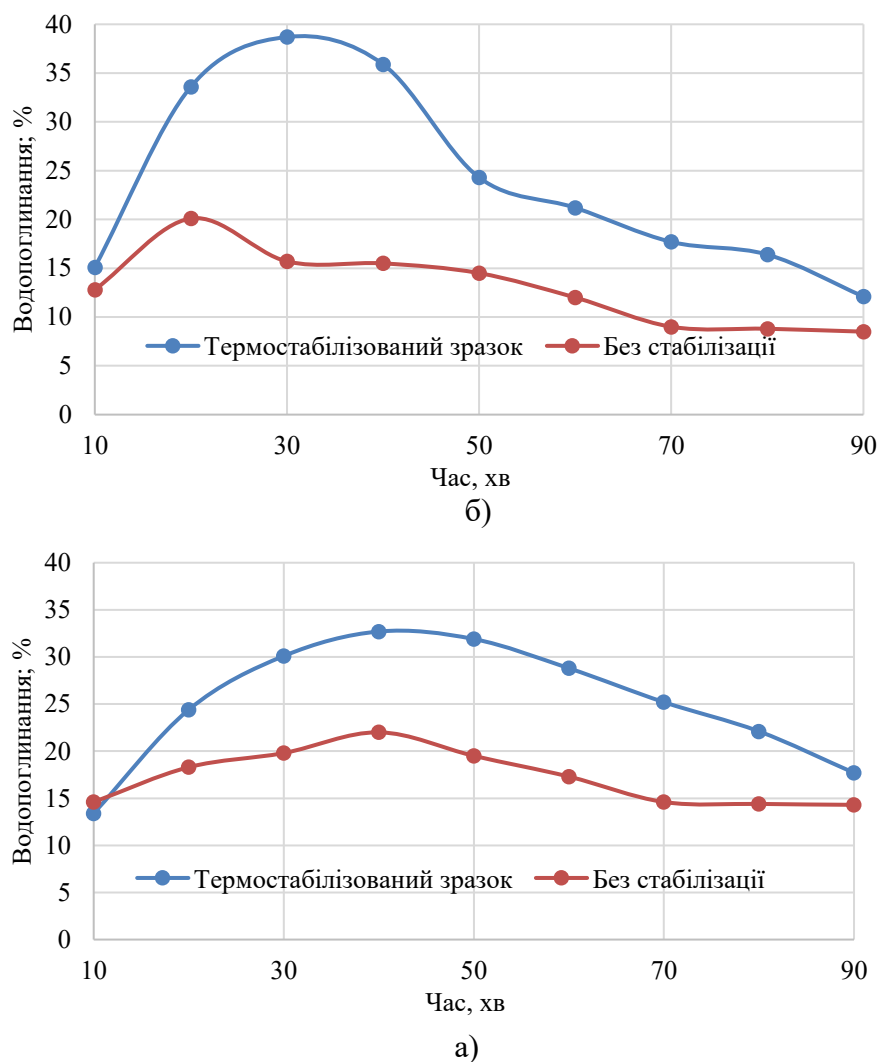


Рис. 4. Водопоглинання зразків плівок виготовлених з розчину ПВС на основі водних екстрактів: а – кори дуба *Quercus cortex*, б – евкаліпту кулястого *Eucalyptus globulus*.

Як видно з рисунку 4, для зразків на основі водного екстракту кори дуба *Quercus cortex* максимальні значення водопоглинання встановлюються через 40 хв в межах 22 % для нетермостабілізованого зразка, та в межах 32,7 % для термостабілізованого зразка. Подальше перебування зразків в дистильованій воді призводить до втрати ваги протягом наступних 50 хвилин до досягнення рівноважного значення 14,5 % для нетермостабілізованого зразка, та до 17,7 % для термостабілізованого зразка. Для зразків на основі водного екстракту евкаліпту кулястого *Eucalyptus globulus* максимальні значення водопоглинання встановлюються через 20 хв в межах 20,1 % для нетермостабілізованого зразка, та через 30 хвилин в межах 38,7 % для термостабілізованого зразка. Подальше перебування цих зразків в дистильованій воді призводить до втрати ваги протягом наступних 60 хвилин до досягнення рівноважного значення 9 % для нетермостабілізованого зразка, та до 12,1 % для термостабілізованого зразка. Отже, термостабілізація зразків плівок на основі водних екстрактів кори дуба *Quercus cortex* та евкаліпту кулястого *Eucalyptus globulus* підвищує як максимальну так рівноважний ступінь водопоглинання, що свідчить про утворення більш структурованого матеріалу, що обумовлене наявністю дубильних речовин у складі водних екстрактів лікарських рослин.

Висновки

В роботі методом електроформування було одержано зразки нетканних волокнистих матеріалів на основі водних екстрактів кори дуба *Quercus cortex* та евкаліпту кулястого *Eucalyptus globulus*. В результаті досліджень морфологічних особливостей отриманих волокон методом оптичної мікроскопії доведено, що при визначених параметрах електроформування отримуються волокна з діаметрами для НВП на основі водних екстрактів кори дуба *Quercus cortex* та евкаліпту кулястого *Eucalyptus globulus* варіюються у межах від 1 до 3 мкм. Доведено, що паропроникність для НВМ на основі водного екстракту кори дуба *Quercus cortex* при товщині зрака 0,15 мм становить 1,843 мг/см², а для НВМ на основі водного екстракту евкаліпту кулястого *Eucalyptus globulus* при товщині зразка 0,07 мм становить 1,471 мг/см². Паропроникність НВМ перевищує показники плівок, які виготовлені з аналогічних розчинів, на 400–500 %, що зумовлено високою питомою

поверхнею та розвиненою пористою структурою НВМ. Встановлено, що термостабілізація НВМ протягом 3 годин при 80 °C збільшує максимальне водопоглинання зразків на основі водних екстрактів кори дуба *Quercus cortex* на 10,7 %, а для зразків на основі водного екстракту евкаліпту кулястого *Eucalyptus globulus* – на 18,6 %.

Література

1. Goyal, M. R., & Ayeleso, A. O. (Eds.). (2018). Bioactive Compounds of Medicinal Plants: Properties and Potential for Human Health. Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/b22426>
2. Wutticharoenmongkol, P., Narin, N., & Rungnoree, K. Electrospun Poly (Vinyl Alcohol) Nanofibers Containing Siam Weed Crude Extract as Potential Wound Dressings // Rattanakosin Journal of Science and Technology. – 2025. – Vol. 7, No. 1. – P. 102–114.
3. (Madhaiyan M., Selvam S.N., Manivannan P., Sattu K., Nallasamy D., Periyasamy P. Fabrication of poly (vinyl alcohol)/Argenome mexicana extract composite nanofibers by electrospinning for antifungal and antimicrobial exploits // Chemical Physics Impact. – 2025. – Vol. 10. – Article 100860. – DOI: 10.1016/j.chphi.2025.100860
4. Mwiri F.K., Daniels R. Influence of PVA Molecular Weight and Concentration on Electrospinnability of Birch Bark Extract-Loaded Nanofibrous Scaffolds Intended for Enhanced Wound Healing // Molecules. — 2020. — Vol. 25, № 20. — Article number: 4799. — DOI: 10.3390/molecules25204799
5. Morais M.S., Bonfim D.P.F., Aguiar M.L., Oliveira W.P. Electrospun poly (vinyl alcohol) nanofibrous mat loaded with green propolis extract, chitosan and nystatin as an innovative wound dressing material // Journal of Pharmaceutical Innovation. – 2023. – Vol. 18. – P. 704–718. – DOI: 10.1007/s12247-022-09681-7
6. Nuno Alexandre, Jorge Ribeiro, Andrea Gärtner, etc. Biocompatibility and hemocompatibility of polyvinyl alcohol hydrogel used for vascular grafting—In vitro and in vivo studies/ N. Alexandre, J. Ribeiro, A. Gärtner, etc. Journal of Biomedical Materials Research. - 2014. Part A. V102. - P.4262-4275.
7. Erdem Ramazan. Advances in fabric structure for wound care/ E. Ramazan. Advanced Textiles for Wound Care. – 2019. – P.509-651.

References

1. Goyal, M. R., & Ayeleso, A. O. (Eds.). (2018). Bioactive Compounds of Medicinal Plants: Properties and Potential for Human Health. Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/b22426>
2. Wutticharoenmongkol, P., Narin, N., & Rungnoree, K. Electrospun Poly (Vinyl Alcohol) Nanofibers Containing Siam Weed Crude Extract as Potential Wound Dressings // Rattanakosin Journal of Science and Technology. – 2025. – Vol. 7, No. 1. – P. 102–114.
3. (Madhaiyan M., Selvam S.N., Manivannan P., Sattu K., Nallasamy D., Periyasamy P. Fabrication of poly (vinyl alcohol)/Argenome mexicana extract composite nanofibers by electrospinning for antifungal and antimicrobial exploits // Chemical Physics Impact. – 2025. – Vol. 10. – Article 100860. – DOI: 10.1016/j.chphi.2025.100860
4. Mwiri F.K., Daniels R. Influence of PVA Molecular Weight and Concentration on Electrospinnability of Birch Bark Extract-Loaded Nanofibrous Scaffolds Intended for Enhanced Wound Healing // Molecules. — 2020. — Vol. 25, № 20. — Article number: 4799. — DOI: 10.3390/molecules25204799
5. Morais M.S., Bonfim D.P.F., Aguiar M.L., Oliveira W.P. Electrospun poly (vinyl alcohol) nanofibrous mat loaded with green propolis extract, chitosan and nystatin as an innovative wound dressing material // Journal of Pharmaceutical Innovation. – 2023. – Vol. 18. – P. 704–718. – DOI: 10.1007/s12247-022-09681-7
6. Nuno Alexandre, Jorge Ribeiro, Andrea Gärtner, etc. Biocompatibility and hemocompatibility of polyvinyl alcohol hydrogel used for vascular grafting—In vitro and in vivo studies/ N. Alexandre, J. Ribeiro, A. Gärtner, etc. Journal of Biomedical Materials Research. - 2014. Part A. V102. - P.4262-4275.
7. Erdem Ramazan. Advances in fabric structure for wound care/ E. Ramazan. Advanced Textiles for Wound Care. – 2019. – P.509-651.