

ФАРМАЦІЯ

УДК 615.014:615.45:615.477.66

DOI <https://doi.org/10.32782/health-2025.3.11>

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ І СФЕРИ ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОГОЛКОВИХ СИСТЕМ

Боднар Любов Анатоліївна,

доктор філософії,
асистент кафедри аптечної технології ліків
Національного фармацевтичного університету
ORCID: 0000-0002-3268-0683

Ковальова Тетяна Миколаївна,

кандидат фармацевтичних наук, доцент,
доцент кафедри аптечної технології ліків
Національного фармацевтичного університету
ORCID: 0000-0002-5984-6196

Блонська Оксана Миколаївна,

доктор філософії, доцент,
завідувачка кафедри хіміко-фармацевтичних дисциплін
КЗВО «Рівненська медична академія»
ORCID: 0000-0002-1907-3408

Вишневська Лілія Іванівна,

доктор фармацевтичних наук, професор,
завідувачка кафедри аптечної технології ліків
Національного фармацевтичного університету
ORCID: 0000-0002-6887-3591

Мікроголки – це інноваційна технологія, що дає змогу здійснювати трансдермальну доставку лікарських засобів, вакцин та інших біологічно активних речовин. Вони є альтернативою традиційним ін'єкціям, пропонуючи безболісний та зручний спосіб введення лікарських речовин.

Мета роботи – надати загальну характеристику мікроголкових систем, провести аналіз матеріалів, що використовуються для їх виготовлення, а також визначити основні сфери застосування мікроголкових систем.

Матеріали та методи. Проведено збір, систематизацію, аналіз і узагальнення даних із використанням матеріалів науково-метричних баз даних (Scopus, PubMed, Web of Science, Google Scholar).

Результати дослідження. Мікроголки працюють за принципом проникнення у верхні шари шкіри, куди вони можуть доставляти лікарські засоби без подразнення нервових закінчень. Існують різні типи мікроголок: розчинні, порожнисті та мікроголки з покриттям. До переваг мікроголок відносять безболісність, зручність і швидкість використання, ефективність. Недоліками є обмежена глибина проникнення, вартість готового продукту, потреба у спеціальному обладнанні для виготовлення та фахівці, що працюють із таким обладнанням.

Для виготовлення мікроголок сьогодні використовують полімери (у тому числі біодеградуючі), метал та кераміку. Виготовлення мікроголкових систем складається з одержання пластирної основи, а також виготовлення мікроголкового каркасу. Вибір технології залежить від матеріалу, який використовується для виготовлення мікроголкового каркасу, а також типу трансдермального пластиру. Із розвитком технологій найбільш розповсюдженим методом отримання мікроголкового каркасу став 3D-друк.

Контроль якості мікроголкових систем найчастіше здійснюють за показниками, характерними для пластира, частиною якого є мікроголки.

Висновки. Наведено переваги та недоліки мікроголкових систем. Установлено, що серед сучасних матеріалів для виготовлення мікроголок частіше використовують полімери. Наведено узагальнену технологічну схему виготовлення трансдермальних пластирів із мікроголками. Установлено, що найбільш сучасним методом виготовлення мікроголкового каркасу є технологія 3D-друку. Контроль якості мікроголкових систем включає орга-

нолептичний контроль мікроголкового каркасу та проведення випробувань, характерних для трансдермальних пластирів.

Ключові слова: мікроголки, трансдермальна доставка, полімерні матеріали, 3D-друковані ліки, інноваційні препарати.

Liubov Bodnar, Tetiana Kovalova, Oksana Blonska, Liliia Vyshnevskia. General characteristics and analysis of materials and areas of application of microneedle systems

Microneedles are an innovative technology that enables transdermal delivery of drugs, vaccines, and other biologically active substances. They are an alternative to traditional injections, offering a painless and convenient way to administer drugs.

Aim. *Provide a general description of microneedle systems, analyse the materials used in their manufacture, and identify the main areas of application for microneedle systems.*

Materials and methods. *Data was collected, systematised, analysed and summarised using materials from scientific databases (Scopus, PubMed, Web of Science, Google Scholar).*

Research results. *Microneedles work by penetrating the upper layers of the skin, where they can deliver drugs without irritating nerve endings. There are different types of microneedles: soluble, hollow and coated microneedles. The advantages of microneedles include: painlessness, convenience and speed of use, and effectiveness. However, there are also disadvantages: limited penetration depth, cost, and the need for special equipment for manufacturing.*

Currently, polymers (including biodegradable ones), metal, and ceramics are used to manufacture microneedles. The manufacture of micro-needle preparations consists of obtaining a patch base and manufacturing a micro-needle frame. The choice of technology depends on the material used to manufacture the micro-needle frame, as well as the type of transdermal patch. With the development of technology, 3D printing has become the most common method of obtaining a micro-needle frame.

The quality control of preparations with microneedles is most often carried out according to indicators characteristic of the patch, part of which is microneedles.

Conclusions. *The advantages and disadvantages of microneedle systems are presented. It has been established that polymers are most commonly used among modern materials for the manufacture of microneedles. A generalized technological scheme for the manufacture of transdermal patches with microneedles is presented. It has been established that the most modern method of manufacturing a microneedle frame is 3D printing technology. Quality control of microneedle systems includes organoleptic control of the microneedle frame and testing typical for transdermal patches.*

Key words: *microneedles, transdermal delivery, polymer materials, 3D-printed medicines.*

Вступ. Трансдермальна доставка ліків відіграла ключову роль у транспортуванні ліків для отримання прямого доступу через шкіру в системний кровотік. Трансдермальна доставка ліків має низку переваг, включаючи дотримання пацієнтом режиму лікування, уповільнене вивільнення, зменшення подразнення шлунку, а також усунення пресистемного ефекту першого проходження [1–3].

Трансдермальні пластири свого часу стали відмінною альтернативою ін'єкційному способу введення через неінвазивність та безболісність застосування. Однак вони потребують удосконалення з метою покращення проникнення активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ) крізь шкірний бар'єр та прискорення їх доставки до мішеней. Для цього до складу пластирів вводили енхансери, речовини, які сприяли проникненню АФІ у більш глибокі шари шкіри або у системний кровотік. Основним недоліком таких речовин була наявність власного терапевтичного ефекту або іноді токсичності (наприклад, диметилсульфоксид). Сучасні вчені пропонують більш безпечний та не менш ефективний спосіб покращення трансдермальної доставки АФІ – використання мікроголок [4].

Мікроголки – це інноваційна технологія, що дає змогу здійснювати трансдермальну доставку лікарських засобів, вакцин та інших біологічно активних речовин. Вони є альтернативою традиційним ін'єкціям, пропонуючи безболісний та зручний спосіб введення лікарських речовин. Мікроголки можуть бути виготовлені з різних матеріалів, таких як полімери, метал або кераміка, і мають мікроскопічний розмір, що дає їм змогу проникати у верхні шари шкіри без пошкодження нервових закінчень [5].

Отже, **метою** нашого дослідження стало надання загальної характеристики мікроголкових систем, проведення аналізу матеріалів, що використовуються для їх виготовлення, а також визначення основних сфер застосування мікроголкових систем.

Матеріали та методи. Проведено дослідження з використанням загальнонаукових теоретичних методів: збір, систематизація, аналіз і узагальнення даних доступних наукових літературних джерел. Для проведення дослідження використовували матеріали науково-метричних баз даних (Scopus, PubMed, Web of Science, Google Scholar).

Результати дослідження. Мікроголки (рис. 1) працюють за принципом проникнення у верхні

шари шкіри, куди вони можуть доставляти лікарські засоби без подразнення нервових закінчень. Це дає змогу здійснювати безболісне введення ліків, що є значною перевагою порівняно з традиційними інвазивними методами [1; 2].



Рис. 1. Мікроголки на пластирній основі

Існують різні типи мікроголок, які відрізняються за матеріалом виготовлення, конструкцією та способом доставки лікарських речовин (рис. 2).

Розчинні мікроголки:

- виготовлені з біодеградувальних матеріалів, які розчиняються в шкірі після введення, вивільняючи лікарський засіб

Порожнисті мікроголки:

- мають порожнину, через яку лікарський засіб вводиться безпосередньо в шкіру

Мікроголки з покриттям:

- мають поверхневий шар, який може містити лікарський засіб, що вивільняється після контакту з шкірою

Рис. 2. Типи мікроголок

Мікроголки мають кілька переваг порівняно з традиційними інвазивними методами введення лікарських засобів:

- безболісність: процедура введення є безболісною завдяки відсутності контакту з нервовими закінченнями;
- зручність: мікроголки можуть бути використані в домашніх умовах, що знижує потребу в медичному персоналі;
- швидкість доставки та можливість регулювання ефекту шляхом створення препаратів із контрольованим вивільненням;
- ефективність: мікроголки забезпечують ефективну доставку лікарських засобів до цільових клітин;
- немає необхідності у спеціально навченому персоналі для використання.

Незважаючи на численні переваги, мікроголки мають і деякі недоліки:

- обмежена глибина проникнення: мікроголки проникають лише у верхні шари шкіри, що обмежує їх використання для деяких препаратів;
- вартість: виготовлення мікроголок може бути дорожчим порівняно з традиційними методами введення ліків;
- потреба у спеціальному обладнанні: для виготовлення мікроголок можуть знадобитися спеціальне обладнання та технології.

Матеріали для виготовлення мікроголок. Мікроголки можуть бути виготовлені з різних матеріалів. Із доступних на даний момент можна виділити полімери, метал (металеві мікроголки можуть бути використані для створення порожнистих або мікроголок із покриттям) та кераміку (керамічні мікроголки можуть бути використані для створення мікроголок із покриттям). У публікаціях останніх років найчастіше зустрічаються полімерні матеріали (рис. 3) [4–9]. Окремо слід відзначити використання біодеградувальних полімерів для виготовлення розчинних мікроголок [7].

Застосування мікроголок. Мікроголки знаходяться застосування в різних сферах медицини і фармації. Вони можуть бути використані для введення вакцин, забезпечуючи безболісну та ефективну імунізацію. Сьогодні такі препарати знаходяться на стадії розроблення [10–16].

Ще одним напрямом використання мікроголок є доставка ліків для лікування хронічних захворювань. Існують дані про численні дослідження з розроблення мікроголкових систем для лікування діабету (доставка інсуліну), онкологічних захворювань, а також хронічних гормонозалежних захворювань, як злоякісних, так і доброякісних [17].

Найбільш розповсюдженою сферою застосування мікроголок є косметологія. Такі засоби знаходяться не лише на стадії розроблення, а й активного користування. Мікроголки використовують для доставки косметичних засобів, таких як вітаміни сироватки, пептиди, зволожувачі тощо, до більш глибоких шарів шкіри, що підвищує їх ефективність. Такі засоби не зареєстровані як лікарські препарати в Україні та представляють сегмент косметичного ринку. Косметичні засоби представлені патчами на гідрогелевій основі. Здебільшого це антивікові засоби корейського виробництва з гіалуроновою кислотою та пептидами (рис. 4–6).

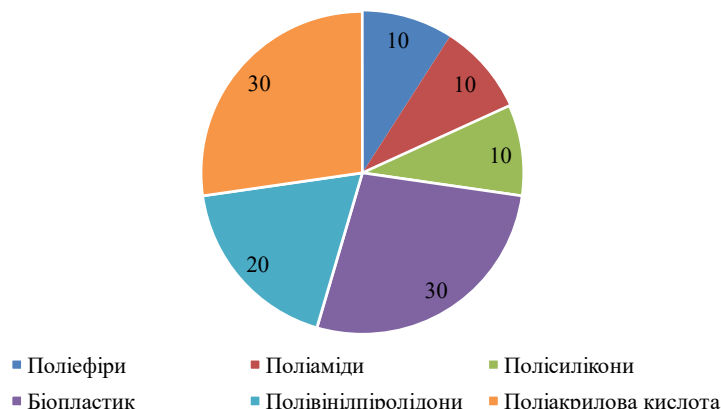


Рис. 3. Полімерні матеріали, які найчастіше використовують для виготовлення мікроголок, %

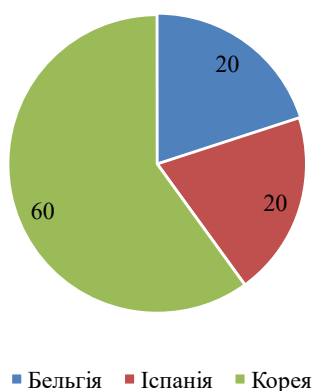


Рис. 4. Розподіл асортименту косметичних засобів із мікроголками за країнами-виробниками, %

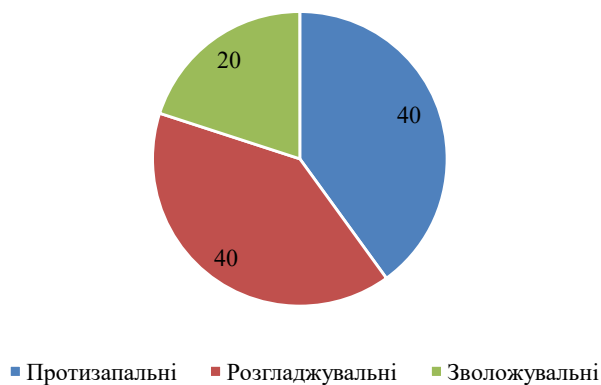


Рис. 5. Розподіл асортименту косметичних засобів із мікроголками за призначенням, %

Технологічні аспекти. Виготовлення мікроголкових систем складається з одержання пластирної основи, а також виготовлення мікроголкового каркасу [18; 19].

Вибір технології залежить від матеріалу, який використовується для виготовлення мікроголкового каркасу, а також типу трансдермального пластиру. Найчастіше, якщо АФІ не потребує контрольованих умов вивільнення, вибирають

матричний тип пластирів, що пов'язано зі швидкістю та економічною вигодою технологічного процесу [20]. Для виготовлення мікроголкового каркасу все більш популярними стають полімерні матеріали, які дають змогу використати технологію 3D-друку. Узагальнену технологічну схему виготовлення трансдермального пластиру матричного типу з полімерним мікроголковим каркасом наведено на рис. 7.

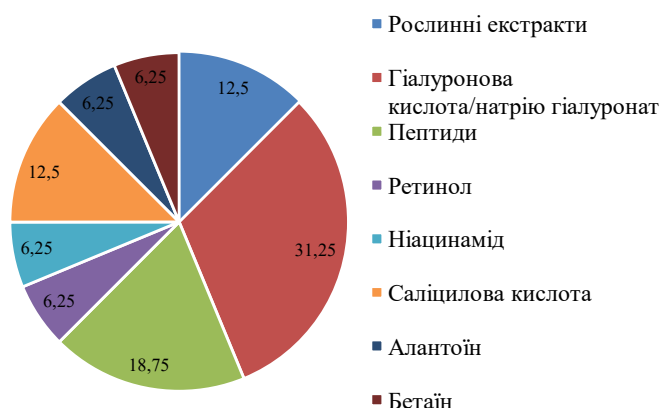


Рис. 6. Розподіл асортименту косметичних засобів із мікроголками за діючими речовинами, %

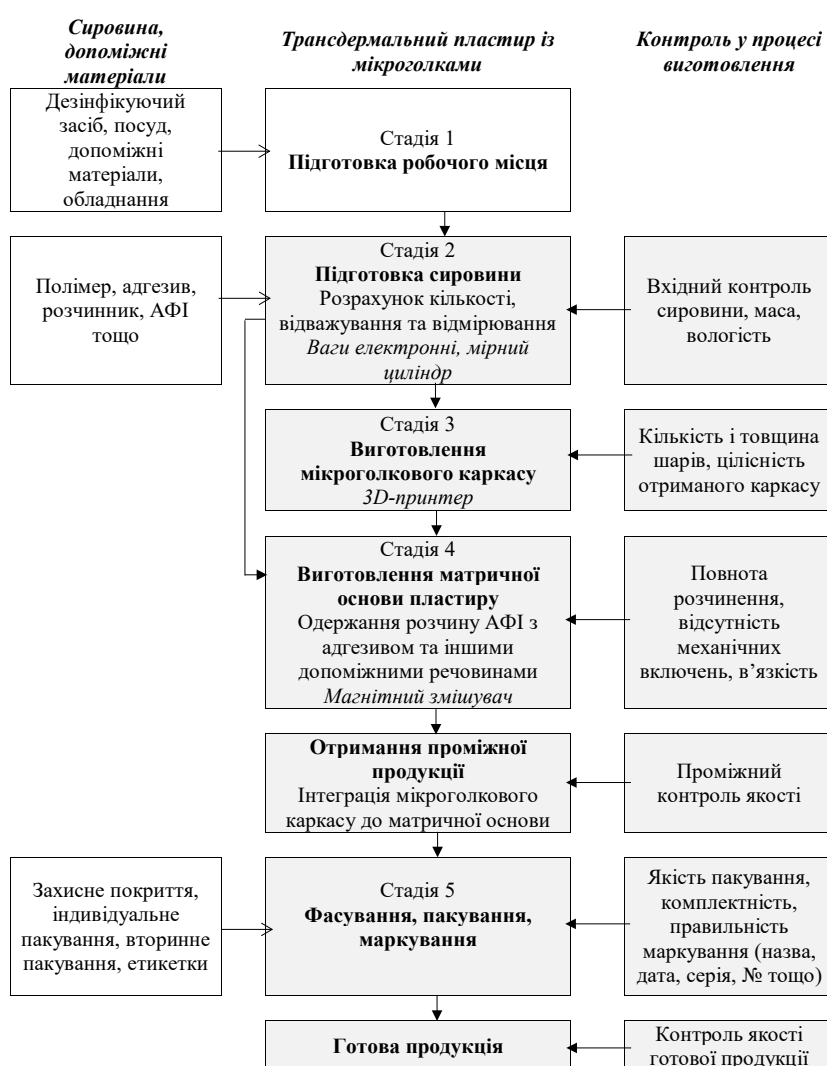


Рис. 7. Загальна технологічна схема виготовлення трансдермальних пластирів із мікроголками

Із розвитком технологій найбільш розповсюдженим методом отримання мікроголкового каркасу став 3D-друк [21; 22]. До технологій 3D-друку належать:

— моделювання методом наплавлення (Fused Deposition Modeling, FDM);
— лазерна стереолітографія (Laser Stereolithography, SLA);

- селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering, SLS);
- селективне лазерне плавлення (Selective Laser Melting, SLM);
- пряме лазерне спікання металу (Direct Metal Laser Sintering, DMLS);
- вибіркове теплове спікання (Selective Heat Sintering, SHS);
- виготовлення об'єктів за допомогою ламінування (Laminated Object Manufacturing, LOM);
- метод багатоструминного моделювання (Multi Jet Modeling, MJM);
- електронно-променеве плавлення (Electron-beam Melting, EBM);

- кольоровий струминний друк (Color Jet Printing, CJP);
- цифрова світлодіодна проєкція (Digital Light Processing, DLP).

Для виготовлення мікроголок найчастіше використовують методи моделювання методом наплавлення, лазерної стереолітографії, селективного лазерного спікання та селективного лазерного плавлення (рис. 8).

Контроль якості. Вибір методів контролю якості залежить від лікарської форми, у якій використовуються мікроголочки. Безпосередньо мікроголковий каркас має бути симетричним, без пошкоджень, на всій площі своєї поверхні

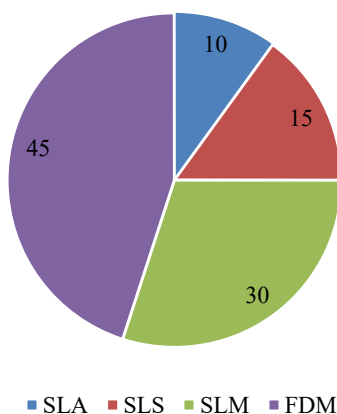


Рис. 8. Частота використання найбільш розповсюджених технологій 3D-друку для виготовлення мікроголкового каркасу, %

повинен мати голки однакового розміру і форми. Основні методи контролю якості застосовують до пластира, частиною якого є мікроголочки. До таких методів належать: вивчення показників мікробіологічної чистоти, визначення однорідності вмісту та однорідності дозованих одиниць. Часто для випробування однорідності вмісту використовують тест «Розчинення» [15; 18; 19].

Висновки

1. Наведено переваги та недоліки мікроголкових систем, аналіз яких дав змогу зробити висновки про актуальність виготовлення трансдермальних терапевтичних систем із мікроголками.

2. Установлено, що серед сучасних матеріалів для виготовлення мікроголок частіше використовують полімери: поліефіри (10%), поліаміди (10%), полісилікони (10%), полівінілпіролідони (20%), біопластик (30%), поліакрилова кислота (30%).

3. Наведено узагальнену технологічну схему виготовлення трансдермальних пластирів із мікроголками, основними стадіями якої є виготовлення мікроголкового каркасу та виготовлення трансдермальної терапевтичної системи.

4. Установлено, що найбільш сучасним методом виготовлення мікроголкового каркасу є технологія 3D-друку, зокрема моделювання методом наплавлення (45%), лазерна стереолітографія (10%), селективне лазерне спікання (15%) та селективне лазерне плавлення (30%).

5. Контроль якості мікроголкових систем включає органолептичний контроль мікроголкового каркасу та проведення випробувань, характерних для трансдермальних пластирів: вивчення показників мікробіологічної чистоти, визначення однорідності вмісту та однорідності дозованих одиниць.

Конфлікту інтересів немає

ЛІТЕРАТУРА

1. Khan A., Mishra P., Gupta D., Kumari P. Advances in Transdermal Drug Delivery Systems: From Patches to Microneedles. 2024. № 1. P. 105–112. DOI: <https://doi.org/10.21590/jddhs.01.02.06>
2. Вишневецька Л. І. Розчинні мікроголки як одна з інноваційних технологій трансдермальних систем доставки лікарських препаратів. *Сучасні досягнення фармацевтичної справи* : збірник наукових праць. Харків : НФаУ, 2023. С. 138–142.
3. Zhang Y., Chen Z., Wu W., Xu C. Focused ion beam (FIB) prepared microtextured microneedle array capable of delivering drugs through punctured skin. *Scientific Reports*. 2024. № 14. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83094-z>
4. Nguyen H., Kipping T., Banga A. Polymeric Microneedles Enhance Transdermal Delivery of Therapeutics. *Pharmaceutics*. 2024. № 16. P. 845. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16070845>
5. Khan M. U. A., Aslam M., Abdullah M., Gul H., Stojanovic G., Abdal-hay Ali A., Hasan A., Microneedle system for tissue engineering and regenerative medicines: a smart and efficient therapeutic approach. *Biofabrication*. 2024. № 16. DOI: <https://doi.org/10.1088/1758-5090/ad6d90>
6. Chen X., Wang L., Yu H., Li C., Feng J., Haq F., Khan A., Khan R. Preparation, properties and challenges of the microneedles-based insulin delivery system. *Journal of Controlled Release*. 2018. № 288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2018.08.042>
7. Bahadur S., Radhika., Sahu K., Singh A. Advances and Challenges of Microneedle Assisted Drug Delivery for Biomedicals Applications: A Review. *Current pharmaceutical biotechnology*. 2024. № 26. DOI: <https://doi.org/10.2174/0113892010310769240924053724>
8. Gu Z., Song K., An H., Sun D., Ma Y., Wang H., Chen Y., Gu Q., Wen Y. Advances in adhesion of microneedles for bioengineering. *Journal of Materials Chemistry B*. 2025. № 13. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4TB02517B>
9. Kumar S., Shukla R. Advancements in microneedle technology: current status and next-generation innovations. *Journal of microencapsulation*. 2024. № 41. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1080/02652048.2024.2418613>
10. Aswar G., Hatwar P., Bakal R., Kalamb V., Thak I. Microneedles: An efficient technique to enhance Transdermal Drug Delivery System. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*. 2024. № 29. P. 256–266. DOI: <https://doi.org/10.30574/gscbps.2024.29.3.0480>
11. Wang Z., Tong S., Niu J., Cao C., Gao A., Jiao Y., Fu Y., Li D., Pan X., Sheng N., Cui S., Lin S., Yanlei L., Yan L., Cui D. Microneedles: multifunctional devices for drug delivery, body fluid extraction, and bio-sensing. *Nanoscale*. 2024. № 17. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4NR03538K>
12. Zhang J., Su Y., Zhao T., Dong L., Ji L., Yan L., Wang S., Chen Y. Research progress in stimuli-responsive microneedles for biomedical applications. *Chinese Journal of Biotechnology*. 2024. № 40. P. 4019–4041. DOI: <https://doi.org/10.13345/j.cjb.240121>
13. Goswami A., Radha G., Venuganti V. V. Transforming Biologics Delivery through Microneedles. *Current Nanoscience*. 2024. № 21. DOI: <https://doi.org/10.2174/0115734137317813241014113421>
14. Aroche A., Nissan H., Daniele M. Hydrogel-Forming Microneedles and Applications in Interstitial Fluid Diagnostic Devices. *Advanced Healthcare Materials*. 2024. № 14. DOI: <https://doi.org/10.1002/adhm.202401782>
15. Wang W., Liang Y., Yan X., Tang G., Xu F., Li Z. Based on Finite Element Simulation: Optimization of Microneedle Structure and Mechanical Performance Analysis. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. № 2890. e012059. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2890/1/012059>
16. Hemalatha KP, Mancy SP, Rahman U. A Systematic Review on Microneedles: A Guide to Fabrication, Applications, and Various Research Probe. *African Journal of Biomedical Research*. 2024. № 27. DOI: <https://doi.org/10.53555/AJBR.v27i4S.7100>
17. Dhanlobhe V., Dongre B., Khandale N., Mahanur V., Maske A., Mondal M. Microneedles: A New Frontier in Cancer Therapy. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*. 2024. P. 388–397. DOI: <https://doi.org/10.48175/IJARSC-22856>
18. Choi H., Seo H., Yoon H. Fabrication Methods of Microneedles with Polymeric Materials. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2024. № 42. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11814-024-00314-y>
19. Kong B., Liu R., Kong T., Zhao Y. Bioinspired Wet Adhesive Proanthocyanidins Microneedles for Ocular Wound Healing. *Research*. 2024. № 7. DOI: <https://doi.org/10.34133/research.0485>
20. Roy S., Ali K., Biswas M., Dey A., Bishal A., Kuiry A. Microneedles: An Efficient Technique to Increase Transdermal Drug Delivery System. *Current drug delivery*. 2024. № 21. DOI: <https://doi.org/10.2174/0115672018301931240624072453>
21. Kouassi M. C., Ben Abdallah A., Noura S., Ballut S., Fitoussi J., Shirinbayan M., Kallel A. FDM printing of microneedles based on biocompatible and biodegradable thermoplastic polymers. *Journal of Applied Polymer Science*. 2024. № 141. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.56067>
22. He Y., He D., Fan L., Ren S., Wang L., Sun J. Application of hydrogel microneedles in the oral cavity. *Biopolymers*. 2024. № 115. e23573. DOI: <https://doi.org/10.1002/bip.23573>

REFERENCES

1. Khan, A., Mishra, P., Gupta, D., Kumari, P. (2024). Advances in Transdermal Drug Delivery Systems: From Patches to Microneedles, 1, 105–112. DOI: <https://doi.org/10.21590/jddhs.01.02.06>
2. Vyshnevskaya L. I. (2023) Rozchynni mikroholky yak odna z innovatsiynykh tekhnolohii transdermalnykh system dostavky likarskykh preparativ [Soluble microneedles as one of the innovative technologies for transdermal drug delivery systems]. Suchasni dosiahennia farmatsevtichnoi spravy : zbirnyk naukovykh prats. Kharkiv: NFAU, 138–142. [In Ukrainian]

3. Zhang, Y., Chen, Z., Wu, W., Xu, C. (2024). Focused ion beam (FIB) prepared microtextured microneedle array capable of delivering drugs through punctured skin. *Scientific Reports*, 14, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83094-z>
4. Nguyen, H., Kipping, T., Banga, A. (2024). Polymeric Microneedles Enhance Transdermal Delivery of Therapeutics. *Pharmaceutics*, 16, 845. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16070845>
5. Khan, M. U. A., Aslam, M., Abdullah, M., Gul, H., Stojanovic, G., Abdal-hay Ali, A., Hasan, A. (2024). Microneedle system for tissue engineering and regenerative medicines: a smart and efficient therapeutic approach. *Biofabrication*, 16. DOI: <https://doi.org/10.1088/1758-5090/ad6d90>
6. Chen, X., Wang, L., Yu, H., Li, C., Feng, J., Haq, F., Khan, A., Khan, R. U. (2018). Preparation, properties and challenges of the microneedles-based insulin delivery system. *Journal of Controlled Release*, 288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2018.08.042>
7. Bahadur, S., Radhika, S., Sahu, K., Singh, A. (2024). Advances and Challenges of Microneedle Assisted Drug Delivery for Biomedicals Applications: A Review. *Current pharmaceutical biotechnology*, 26. DOI: <https://doi.org/10.2174/0113892010310769240924053724>
8. Gu, Z., Song, K., An, H., Sun, D., Ma, Y., Wang, H., Chen, Y., Gu, Q., Wen, Y. (2025). Advances in adhesion of microneedles for bioengineering. *Journal of Materials Chemistry B*, 13. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4TB02517B>
9. Kumar, S., Shukla, R. (2024). Advancements in microneedle technology: current status and next-generation innovations. *Journal of microencapsulation*, 41, 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1080/02652048.2024.2418613>
10. Aswar, G., Hatwar, P., Bakal, R., Kalamb, V., Thak, I. (2024). Microneedles: An efficient technique to enhance Transdermal Drug Delivery System. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 29, 256–266. DOI: <https://doi.org/10.30574/gscbps.2024.29.3.0480>
11. Wang, Z., Tong, S., Niu, J., Cao, C., Gao, A., Jiao, Y., Fu, Y., Li, D., Pan, X., Sheng, N., Cui, S., Lin, S., Yanlei, L., Yan, L., Cui, D. (2024). Microneedles: multifunctional devices for drug delivery, body fluid extraction, and bio-sensing. *Nanoscale*, 17. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4NR03538K>
12. Zhang, J., Su, Y., Zhao, T., Dong, L., Ji, L., Yan, L., Wang, S., Chen, Y. (2024). Research progress in stimuli-responsive microneedles for biomedical applications. *Chinese Journal of Biotechnology*, 40, 4019–4041. DOI: <https://doi.org/10.13345/j.cjb.240121>
13. Goswami, A., Radha, G., Venuganti, V. V. (2024). Transforming Biologics Delivery through Microneedles. *Current Nanoscience*, 21. DOI: <https://doi.org/10.2174/0115734137317813241014113421>
14. Aroche, A., Nissan, H., Daniele, M. (2024). Hydrogel-Forming Microneedles and Applications in Interstitial Fluid Diagnostic Devices. *Advanced Healthcare Materials*, 14, DOI: <https://doi.org/10.1002/adhm.202401782>
15. Wang, W., Liang, Y., Yan, X., Tang, G., Xu, F., Li, Z. (2024). Based on Finite Element Simulation: Optimization of Microneedle Structure and Mechanical Performance Analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2890, 012059. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2890/1/012059>
16. Hemalatha, KP, Mancy, SP, Rahman, U. (2024). A Systematic Review on Microneedles: A Guide to Fabrication, Applications, and Various Research Probe. *African Journal of Biomedical Research*, 27. DOI: <https://doi.org/10.53555/AJBR.v27i4S.7100>
17. Dhanlobhe, V., Dongre, B., Khandale, N., Mahanur, V., Maske, A., Mondal, M. (2024). Microneedles: A New Frontier In Cancer Therapy. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 388-397. DOI: <https://doi.org/10.48175/IJAR SCT-22856>
18. Choi, H., Seo, H., Yoon, H. (2024). Fabrication Methods of Microneedles with Polymeric Materials. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 42. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11814-024-00314-y>
19. Kong, B., Liu, R., Kong, T., Zhao, Y. (2024). Bioinspired Wet Adhesive Proanthocyanidins Microneedles for Ocular Wound Healing. *Research*, 7. DOI: <https://doi.org/10.34133/research.0485>
20. Roy, S., Ali, K., Biswas, M., Dey, A., Bishal, A., Kuiry, A. (2024). Microneedles: An Efficient Technique to Increase Transdermal Drug Delivery System. *Current drug delivery*, 21. DOI: <https://doi.org/10.2174/0115672018301931240624072453>
21. Kouassi, M. C., Ben Abdallah, A., Nouira, S., Ballut, S., Fitoussi, J., Shirinbayan, M., Kallel, A. (2024). FDM printing of microneedles based on biocompatible and biodegradable thermoplastic polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 141. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.56067>
22. He, Y., He, D., Fan, L., Ren, S., Wang, L., Sun, J. (2024). Application of hydrogel microneedles in the oral cavity. *Biopolymers*, 115, e23573. DOI: <https://doi.org/10.1002/bip.23573>