

УДК 378.4/.6:001.891]:[606:61](477)

# ДОСЯГНЕННЯ Й АКТУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ БІОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ЯК ПЕРСПЕКТИВНОЇ ГАЛУЗІ БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ В УКРАЇНІ

Головко М.В.

m.golovko@ukr.net

Архирей М.В.

marina\_arkhyrei@ukr.net

Кафедра біокібернетики та аерокосмічної медицини  
Національний авіаційний університет  
м. Київ, Україна

**Реферат** – з використанням бібліометричного аналізу оприлюднених у Національному депозитарії академічних текстів результатів наукових досліджень з біомедичної інженерії, що виконуються в 2017–2022 рр. в установах Національної академії наук України та провідних вітчизняних університетах, здійснено огляд здобутків, узагальнено особливості організації, основні напрями та перспективи подальшої розбудови цієї галузі сучасних біотехнологій. Показано, що одним із пріоритетів вітчизняної біомедичної інженерії є біоматеріалознавство, що зумовлено значними потребами у новітніх матеріалів для реконструктивної хірургії, які зростають в умовах воєнного часу. Проаналізовано теоретичні та практичні здобутки науково-дослідних установ НАН України як потужного інтегрального центру розв'язання актуальних проблем створення та використання сучасних біотехнологій на основі досягнень біології, фізики, хімії, матеріалознавства, генетики, медицини. Проаналізовано здобутки університетської науки з біоматеріалознавства та наголошено щодо її важливої ролі у формуванні нового покоління дослідників-фахівців у галузі біомедичної інженерії. Акцентовано увагу на зростанні значення прикладних досліджень, результатом яких будуть технології створення та використання новітніх біоматеріалів. Визначено необхідність удосконалення та оновлення лабораторної бази підготовки майбутніх фахівців з біомедичної інженерії, доцільність більш тісної інтеграції університетської та академічної науки як умови раціонально використовувати інтелектуальних і матеріальних ресурсів, задля отримання нових наукових результатів та включення студентської молоді в сучасний науково-дослідницький простір, врахування європейського досвіду організації досліджень шляхом створення науково-дослідних містечок, парків, кластерів, стартапів.

**Ключові слова** – біомедична інженерія, біосумісні матеріали, академічна та університетська наука в Україні, перспективи розвитку.

## I. ВСТУП

План відновлення науки та освіти в Україні передбачає не лише подолання проблем руйнування науково-освітньої інфраструктури внаслідок воєнних дій, а й модернізацію цих галузей відповідно до сучасних міжнародних стандартів, повноправну інтеграцію до Європейського дослідницького простору, підвищення інституційної спроможності закладів вищої освіти щодо здійснення наукових досліджень світового рівня, спрямування розвитку науки на створення інновацій та технологій у пріоритетних для держави напрямках [1]. До таких пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок, визначених Кабінетом Міністрів України внесено фундаментальні

проблеми наук про життя та розвиток біотехнологій [2].

З огляду на актуальність розбудови вітчизняної галузі біотехнологій, особливості та перспективи цього процесу знайшли достатньо широке висвітлення в наукових публікаціях. Зокрема, в роботі [3] автори наголошують, що розвиток біотехнологічної сфери є пріоритетом державної політики більшості країн світу. Відтак, одним із першочергових завдань в Україні є стимулювання наукових досліджень у галузі біотехнології.

У дослідженні [4] виконано бібліометричний та патентний аналіз стану вітчизняних наукових досліджень із біотехнологій у 2000–2019 рр., публікаційної активності та перспектив комерціалізації результатів. Особлива

увага приділяється біомедичній інженерії як стратегічному та високотехнологічному напрямку сучасних біотехнологій. Саме з її недостатнім розвитком в Україні дослідники пов'язують відсутність у державі власного виробництва вакцин, біосимілярів, сучасних діагностичних засобів, а важливим чинником розв'язання цієї проблеми визначено розвиток медико-біологічних досліджень та трансфер таких технологій із подальшою реалізацією у виробничих процесах [5].

Ще за довоєнними прогнозами ринок медичної техніки та біоматеріалів в Україні оцінювався у понад 800 млн доларів і мав тенденцію до стійкого зростання [6].

Натомість роль біомедичної інженерії в нашій державі зростає в контексті подолання наслідків воєнних дій та відновлення повноцінної функціональності громадян, обмеженої внаслідок отриманих травм. Зокрема, особливої актуальності набуває біонічне протезування, що є результатом найсучасніших біотехнологій. Так, цього річ у Львові виконано перше в Україні біонічне протезування, і цей напрямок потужно розвивається [7].

Відтак, В.Б. Максименко та В.П. Яценко розглядають розвиток цієї галузі в Україні як інструмент економічного зростання та якісної модернізації системи охорони здоров'я та медичного виробництва. При цьому учені наголошують, що одним із ключових обмежувальних чинників широкого запровадження прогресивних медичних технологій є недостатня кількість біомедичних інженерів [8].

У роботі [9] визначено актуальні завдання біомедичної інженерії в Україні, особливості та перспективи її розвитку як галузі науки й освіти. При цьому подальший її динамічний поступ автори співвідносять із розбудовою університетської освіти, що дасть можливість не лише забезпечити медичну галузь висококваліфікованими фахівцями, а й залучити до наукових досліджень творчу та активну молодь.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Оскільки в сучасних реаліях особливої важливості набувають питання створення та широкого використання новітніх біоматеріалів, це актуалізує доцільність узагальнення здобутків цього перспективного наукового напрямку вітчизняної біомедичної інженерії, окреслення основних завдань та шляхів його розвитку.

## III. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Для досягнення мети дослідження використано метод бібліометричного та вебметричного аналізу матеріалів, в яких репрезентовано результати та особливості організації вітчизняних наукових досліджень з біомедичної інженерії в аспекті біоматеріалознавства, що виконуються упродовж 2017–2022 р.р. (наукові звіти, представлені у Національному депозитарії академічних текстів, веб-ресурси).

Аналіз здійснювався за двома основними категоріями виконавців науково-дослідних робіт: академічні установи НАН України та провідні вітчизняні університети, що здійснюють підготовку здобувачів вищої освіти за спеціальністю «Біомедична інженерія».

## IV. РЕЗУЛЬТАТИ

Огляд зарубіжного досвіду розвитку галузі біотехнологій показує, що одним із пріоритетних напрямів наукових досліджень є біомедична інженерія. При цьому за обсягами інвестицій та значенням для розв'язання глобальних проблем, зокрема, в Європі, з нею може позмагатися лише біоекономіка, дослідження якої спрямовані на вирішення глобальних проблем продовольчої безпеки, створення технологій відновлюваної сировини, збереження біологічного розмаїття, захисту клімату та навколишнього середовища [10].

Ці тренди характерні й для України, оскільки саме біотехнології у галузі сільського господарства, що є основою для розвитку біоекономіки, мають державну підтримку та потенційно достатньо швидко

можуть комерціалізуватися. Натомість у провідних міжнародних наукометричних базах найбільшою є питома вага наукових публікацій вітчизняних учених з біоматеріалознавства, яка становить близько 0,3 % загальносвітового обсягу таких досліджень. Щоправда, обсяг патентування вітчизняних розробок перебуває на рівні 0,05 %, тоді як частка Китаю, США та країн ЄС становлять відповідно 33,1, 24,9 та 18,1 % відповідно [4]. Попри це, є прогнозована тенденція до зростання в Україні кількості наукових досліджень з біомедичної інженерії в цілому, та біоматеріалів, зокрема.

Таким чином, одним зі стратегічно важливих сегментів вітчизняної біомедичної інженерії є біоматеріалознавство, що забезпечує розроблення та створення новітніх матеріалів для відновлення функціональності різноманітних систем організму. Чинником цього, на думку адеміка С.О. Фірстова, є велика потреба в операціях кісткової пластики, проведення яких ще в довоєнний період щорічно в обсязі близько 5 тис. задовольняло попит менше, ніж на 15 % [6]. Відтак, потреба в таких матеріалах в сучасних умовах суттєво зростає.

Аналіз наукових звітів, оприлюднених у Національному депозитарії академічних текстів [11] дає можливість зробити висновок, що основна частка фундаментальних та прикладних наукових досліджень означеної проблематики виконується в установах Національної академії наук України. Зокрема, вагомий внесок у розвиток сучасного біоматеріалознавства роблять науковці Інституту проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України. Вони досліджують структуру та властивості широкого спектру нових композиційних наноматеріалів медичного призначення з біологічною та механічною сумісністю (біокераміку, модифіковану магнетитом, мідю, кремнієм, сріблом, гідроксиапатити для прискорення лікування дефектів кісткової тканини, вуглецеві біоматеріали

для виготовлення кровоспинних матеріалів, ентеросорбенти). В Інституті створено нові сплави титану, біоактивну кераміку з регульованими властивостями, біоситали з кристалічною структурою апатита та вітлокіта, біоінертну кераміку з фазовою стабільністю до процесу старіння у вологих середовищах для розроблення двокомпонентної головки ендопротезу тазостегнового суглобу нового покоління. Отримано кальційфосфатні біосумісні матеріали з властивостями тривалого функціонування у фізіологічному середовищі, які є перспективними для відновлення кісткової тканини, а також вуглеволоконисті наноструктурні як основа створення матеріалів для виведення токсичних речовин з організму. Розроблено технологію виготовлення 3D-друком імплантатів з біоактивної кераміки для відновлення кісткової тканини та функції кісток після поранень (пластини для остеосинтезу, кортикальні гвинти), методики створення імплантатів, які складаються з біосумісної основи (біоактивна кераміка) та аутоклітин пацієнта. Синтезовано порошки з біоактивної кераміки з остеоіндуктивними та антибактеріальними властивостями для покриттів титанових імплантатів. Отримано та досліджено біосумісні матеріали з остеоіндуктивними властивостями, їхні композиції для реконструктивно-відновлювальної хірургії (відновлення кісткової тканини та функцій травмованих кісток). Запропоновано технології виготовлення наноструктурованої та двофазної біоактивної кераміки антибактеріальними властивостями для покриттів імплантів з нових сплавів титану. Одержано біоактивну кераміку як основу для створення гібридних імплантатів (кальційфосфатна кераміка – аутоклітини реципієнта) для регенеративної медицини. Синтезовано нові біосумісні матеріали на основі сплавів титану й кальційфосфатної кераміки з покращеними фізико-механічними (щодо навантажень) та остеоіндуктивними (щодо сорбування

поверхні лікарських препаратів) властивостями. Досліджено властивості кальційфосфатних біоматеріалів, отриманих методом мікрохвильового спікання, для використання в ортопедії та травматології.

В Інституті скінтіляційних матеріалів НАН України розробляються багатофункціональні біосумісні наноконтейнери та наноносії для доставки, діагностики і лікування, методи іммобілізації органічної речовини на поверхні наночастинок. Синтезовано стійкі біосумісні гідрозолі.

Науковці Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України розробляють методи отримання та технології нанесення композиційних покриттів на основі сплавів і сполук з аморфною та нанокристалічною структурою, що мають високу зносо- та корозійну стійкість, міцність, оптимальне поглинання нейтронного випромінювання, покращені біомедичні характеристики. Створено технології мікроплазмового напилення біосумісних покриттів з керованою структурою для імплантатів (титан-біокераміка, цирконій-біокераміка). Розробляються нанокомпозитні полімери біоматеріалів з противірусною та антимікробною дією та технології синтезу з них шляхом 3D-друку виробів медичного призначення.

В Інституті молекулярної біології і генетики НАН України розроблено методи одержання біотехнологічних раневих покриттів. Із використанням методу іммобілізації біологічного матеріалу створено нові електрохімічні ферментні біосенсори.

Фахівці Інституту біоколоїдної хімії імені Ф.Д. Овчаренка розробляють методи синтезу термочутливих мікро- та наногелів та нанокомпозитів (фізично зшитих гідрогелів на основі лапоніту та акрилової кислоти з підвищеною механічною міцністю), біонанокомпозитного матеріалу малої токсичності на основі клітин лактобактерій, отримано наноматеріали біомедичного призначення на основі

гідрогелевих і біомінеральних колоїдних структур.

В Інституті хімії поверхні імені О.О. Чуйка НАН України розробляються композитні системи на основі органічних і неорганічних сполук з регульованими властивостями для використання в біомедицині (адсорбенти, каталізатори, наповнювачі, носії лікарських речовин тощо). Створюються біонанокомпозити з використанням супрамолекулярних структур на основі біополімерів та лікарських речовин, нанокомпозити на основі кремнеземів та полімерів, що є нетоксичними та не спричиняють вираженої місцевої запальної реакції.

В Інститут молекулярної біології і генетики Національної академії наук України розроблено методику вирощування клітин на біоактивній кераміці, отримано імплантати нового покоління на основі синтетичних аналогів кісткової тканини та стовбурових клітин для відновлення ушкоджених кісткових тканин.

Ученими Інституту надтвердих матеріалів імені В.М. Бакуля Національної академії наук України створюються новітні біосумісні матеріали для антибактеріальних поверхонь імплантів кісткових тканин із кальційфосфатної кераміки, модифікованої наносріблом. Розробляються технології оброблення поверхонь медичних імплантів ендопротезів.

Науковцями Інституту металофізики імені Г.В. Курдюмова НАН України розроблено технології створення нових аморфних та наноструктурних високоміцних сплавів для використання в медицині, отримано сплави та нанопокриття з високою твердістю та зносостійкістю на основі нікель-хрому.

У Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б.І. Веркіна отримано та досліджено наногібриди біологічних молекул з 2D-матеріалами (гібриди графену та оксиду графену з урацилом та його галогенпохідними, полінуклеотидами, цитозинном, катіонним порфірином.

В Інституті біоорганічної хімії та нафтохімії імені В.П. Кухаря НАН України створюються на основі біосумісних полімерів і речовин біологічного походження нові гібридні матеріали (композити поліаніліну з наночастками полістиролу, кополімеру аніліну з амінотерeftалевою кислотою та галуазитними нанотрубками) та досліджуються їхні функціональні властивості, на основі яких можуть створюватися біосенсори, чутливі на зміну температури: аміак, важкі метали. Розробляються методи отримання нанокомпозитів електропровідних полімерів (поліанілін, поліпірол, полі(3-метилтіофен), полі-3,4-етилендіокситіофен) з оксидами металів та вуглецевими нанотрубками та досліджується їхня взаємодія з біологічно активними сполуками.

В Інституті загальної та неорганічної хімії імені В.І. Вернадського НАН України синтезовано неорганічні й органо-неорганічні наноматеріали для медико-біологічного використання.

Дослідниками Інституту фізики НАН України створюються біоматеріали нового покоління (2D-матеріалів) для створення на їхній основі біосенсорів, зокрема реєстрації спектрів від компонентів клітин; на основі експериментального дослідження властивостей радіаційно-зшитих гідрогелів розроблено технологію виробництва з цих біосумісних матеріалів медичного перев'язувального матеріалу.

В Інституті прикладної фізики НАН України розробляються новітні біоматеріали на основі біополімерів для регенерації кісткової та нервової тканин, шкіри. Отримано матеріали на основі хітозану й інших органічних речовин для зупинки внутрішніх кровотеч, запобігання спайкам при хірургічному втручанні. Запропоновано технології оброблення поверхні матеріалів для модифікації їхніх властивостей фізичними методами (фемтосекундний лазер, високоенергетичні протони). Досліджуються механізми впливу радіаційних факторів на біоматеріали та

можливості їхнього використання для стерилізації.

В Інституті фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України розроблено технологію виробництва гібридних медичних імплантатів на основі нанокераміки з наноструктурованими біосумісними покриттями на титанових підкладках, що мають антибактеріальні властивості та забезпечують зв'язок між кістковою тканиною організму та поверхнею імплантат під навантаженням.

Науковці Інституту хімії високомолекулярних сполук НАН України розробляють методи одержання функціональних полімерних композитів з регульованою структурою на основі полісахаридів та нанонаповнювачів різної природи. Отримано нові біологічно активні полімери з регульованими антисептичними та прорегенераторними властивостями, що використовуються для відновлення кісткової тканини в стоматології.

В Інституті експериментальної патології, онкології і радіобіології імені Р.С. Кавецького НАН України розроблено технологію одержання композитних покриттів для адсорбентів медичного призначення, що підвищує біосумісність гемосорбенту з кров'ю при лікуванні інтоксикацій; запропоновано способи визначення впливу біосумісних матеріалів на основі фосфатів кальцію на активність клітин.

Зауважимо, що за результатами переважної більшості з цих досліджень отримано патенти на винаходи технологій отримання новітніх біоматеріалів та методик оцінки їхньої якості, здійснено доклінічні випробування, а значну частину в упроваджено в медико-біологічну практику. Вони стали основою реалізації Державної програми «Матеріали для медицини і медичної техніки та технології їх отримання і використання» (започаткована в 2018 році), спрямованої на створення та запровадження сучасних технологій виготовлення імплантів, отримання новітніх біосумісних матеріалів та медичного

інструментарію, біомаркерів та біоіндукторів, ендо- та екзопротезів. За цією програмою в установах НАН України вже розроблено та впроваджено новітні біоматеріали для виробництва імплантів нового покоління на основі титанових сплавів і біоактивної кераміки, збагаченої кремнієм, що є основою для самовідновлення хрящової тканини (Інститут металофізики імені Г.В. Курдюмова, Інститут механіки імені С.П. Тимошенка), технології нанесення на імпланти біосумісних покриттів (Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона), унікальні технології світового рівня тривимірного друку персоналізованих імплантів кісток, що враховують індивідуальні потреби пацієнтів (Інститут експериментальної патології, онкології і радіобіології імені Р.Є. Кавецького) [12].

Академічна наука оперативно відреагувала на потреби біомедицини в умовах воєнного часу. Зокрема, вже 22 березня 2022 року Президія Національної академії наук України ініціювала започаткування Цільову програму наукових досліджень на 2022–2026 роки «Створення біоматеріалів та наукових основ їх застосування в реконструктивно-відновлювальній медицині». Створено та затверджено Концепцію цієї програми, а також наукову раду, до компетенції якої входить організація конкурсу інноваційних проєктів та їхня експертиза. Головним завданням наукового біоматеріалознавства визначено розроблення біоматеріалів нового покоління (матеріали для контакту з тілом людини, медичні пристрої, біосенсори, імпланти, каркаси для тканинної інженерії, системи доставки ліків тощо. Вже в четвертому кварталі 2022 року заплановано розпочати щорічне обговорення результатів виконання Програми, зокрема, щодо створення та застосування біоматеріалів у реконструктивно-відновлювальній медицині, пошуку механізмів організації клінічних випробувань та виробництва біомедичної продукції [13].

Одним із рушіїв розвитку галузі біомедичної інженерії в Україні є університетська освіта, роль якої актуалізується в умовах євроінтеграції та входження до єдиного європейського науково-освітнього простору. Лише мінімальна потреба держави у таких фахівцях становить близько 17 тисяч із перспективою збільшення до 35 тисяч [9].

Тенденційним є й зростання ваги університетських наукових досліджень з біомедичної інженерії, що відповідає сучасним європейським трендам. Адже саме ця галузь є одним із пріоритетних напрямів наукових розвідок європейських університетів, науковці яких досліджують технології синтезу та використання в медико-біологічній практиці новітніх біоматеріалів, процеси утворення органічних тканин на біоматеріалах та способи оцінки їхньої якості, використанням спектроскопічних методів дослідження біомедичного потенціалу біоматеріалу з метою усунення необхідності тестування на тваринах тощо [14].

Потужна науково-педагогічна школа біомедичної інженерії імені М.М. Амосова сформувалася та функціонує в Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, що історично став першим осередком розбудови цього напрямку вищої професійної освіти” [15]. Її представники зробили вагомий внесок і в розвиток біоматеріалознавства. Виконуються фундаментальні дослідження хіміко-технологічних процесів створення нових біологічно-активних речовин, матеріалів та композитів. Розробляються сенсори для детектування хімічних та біомолекулярних сполук, зокрема водних розчинів органічного та неорганічного походження тощо.

У Київському національному університеті імені Тараса Шевченка досліджуються гібридні наносистеми на основі smart-полімерів для біомедичного застосування, гідрогелеві біоматеріали для терапії, наногібридні функціональні

композити на полімерних матрицях, що мають властивості реагувати на зовнішні впливи [16]. Розроблено методику синтезу гібридних наносистем в розгалуженій водорозчинній полімерній матриці для флуоресцентної діагностики (візуалізації) пухлин, фотодинамічної протипухлинної терапії, дизайн новітніх мультифункціональних полімерів і нанокомпозитів для створення міцелярних систем керованого доставлення ліків.

Фахівці Національного авіаційного університету розробляють технології оцінювання та підвищення якості біомедичних об'єктів різної природи. У Національному університеті "Львівська політехніка" розроблено технології отримання нанокомпозитних полімерних систем на основі структурованих біосумісних полімерів методами полімеризаційного наповнення та структурування полімерних матриць наповнених нанокомпозитів. Створено нові біологічно активні рідкі мінерал-полімерні композити для регенеративної пластики кісткової тканини на основі природно-синтетичної полімерної матриці, що мають властивості заповнювати значні кісткові дефекти. Науковці Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна розробляють біосумісні імплантати кісткової тканини та шкіри, методи насичення (імпрегнації) імплантатів фотосенсибілізаторами з антибіотичними властивості та активізації процесів регенерації електромагнітним випромінюванням оптичного діапазону. Синтезовано високодисперсні порошкові форми фосфату кальцію, що є основою отримання композитних керамічних імплантатів твердих тканинах для проведення лікування онкологічних захворювань.

У Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" досліджуються біоактивні склокомпозиційні кальційсилікофосфатні матеріали та покриття для кісткових ендопротезів. Розроблено нові методи

синтезу біоактивних склокристалічних матеріалів з високою міцністю в умовах статичних і динамічних навантажень, скороченими термінами резорбції та зрощування з органічною кістковою тканиною; методику прискорення біоінтеграції шарових систем поверхні імплантату з живими тканинами шляхом переведення оксидних шарів в електретний стан.

В Українському державному хіміко-технологічному університеті розроблено та досліджено біоактивні кальцій-фосфатні покриття на сплавах титану та магнію з біоактивними та біорезистивними властивостями для виготовлення імплантатів кістки; методи контролю процесів розчинення та біорезорбції біоактивних покриттів. Дослідження з біоматеріалознавства здійснюються й у Національному університеті "Києво-Могилянська академія", де розроблено способи одержання та синтезовано нанокомпозити на основі пірогенного діоксиду силіцію з іммобілізованими на його поверхні антибактеріальними агентами. Використання таких біоматеріалів із антиадгезивними й антимікробними властивостями сприяє прискоренню лікування ускладнених запальних процесів. Науковцями Запорізького національного технічного університету розроблено новітні біорозчинні матеріали (сплави на основі магнію) для фіксаторів переломів з позитивним впливом на регенерацію кісткової тканини та відсутністю токсичної дії на органічні тканини продуктів біокорозії матеріалу імпланта. У Сумському державному університеті розроблено методику синтезу наноструктурованих апатит-біополімерних композитних матеріалів та покриттів для медицини та отримано біоматеріал на основі фосфорельованого хітозану. Ці результати впроваджені в освітній програмі, зокрема, використані при розробленні лабораторних робіт для магістрів біомедичної інженерії.

На окрему увагу заслуговує й такий аспект університетської науки, як залучення студентів бакалаврату та магістратури до проведення теоретичних й експериментальних досліджень, підготовки доповідей та публікацій за їхніми результатами, участі в наукових форумах.

Важливу роль у розвитку сучасної вітчизняної біомедичної інженерії як галузі науки й університетської освіти, популяризації її результатів та залученні до наукових досліджень майбутніх фахівців відіграє фаховий науково-практичний журнал «Біомедична інженерія і технології», започаткований у 2018 році зусиллями провідних фахівців Національної медичної академії імені О. Богомольця та НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». У його семи випусках (2018–2022) опубліковано понад 100 наукових статей з актуальних проблем створення та використання медичної техніки, біоматеріалів, новітніх біомедичних технологій. Примітно, що співавторами 55 публікацій є студенти, переважна більшість яких (понад 90 %) навчаються в Київському політехнічному інституті імені Ігоря Сікорського.

## V. ОБГОВОРЕННЯ

Вітчизняна біомедична інженерія загалом та біоматеріалознавство, зокрема, активно розвивається в науково-дослідних установах Національної академії наук України, яка акумулює та інтегрує для розв'язання актуальних проблем створення та використання біотехнологій новітні досягнення з біології, фізики, хімії, матеріалознавства, генетики, медицини, інформаційно-комунікаційних технологій.

Натомість, хоча загальні обсяги наукових досліджень із цього напрямку в університетах значно менші, ніж в академічних установах, вони мають надзвичайно важливе значення у контексті залучення до цього процесу талановитої студентської молоді, а відтак – формування нового покоління фахівців-дослідників з біомедичної інженерії. Як правило, при випускових кафедрах за цим напрямом

активно функціонують осередки студентської науки, працюють експериментальні лабораторії, в яких свої перші дослідження здійснюють майбутні науковці.

Вітчизняна академічна та університетська наука має багатий досвід, унікальний інтелектуальний та ресурсний потенціал, інтегроване використання якого сприятиме якнайшвидшому впровадженню в медичну практику технологій створення й використання новітніх біоматеріалів.

## VI. ВИСНОВКИ

1. Бібліометричний аналіз результатів наукових досліджень та розробок з біомедичної інженерії у розрізі біоматеріалів, виконаних вітчизняними ученими в межах планової тематики академічних установ та провідних університетів, дає можливість зробити висновок, що ця галузь в Україні активно розвивається та є тенденція щодо розширення кола її актуальної проблематики з акцентом на практичні потреби біомедицини. Хоча основна вага фундаментальних та прикладних досліджень припадає на установи Національної академії наук України, внесок університетської науки є не менш важливим у контексті залучення до дослідницького процесу студентської молоді та використання в освітньому з підготовки майбутніх біоінженерів прогресивних досягнень сучасних біотехнологій.

2. Попри те, що переважна більшість досліджень мають прикладний характер й орієнтовані на отримання результатів, важливих для практичної медицини, до цього часу залишаються недостатньо ефективними механізми їхнього впровадження та налагодження відповідного виробництва вітчизняними підприємствами новітніх біоматеріалів і виробів медичного призначення на їхній основі. Відтак актуальним є удосконалення державної політики в галузі біомедичної інженерії та створення умов для її інноваційного розвитку. Важливим кроком



у цьому напрямі стало запровадження в 2021 році бюджетного фінансування на першочергові заходи зі створення біокластеру “Біологічна безпека та розвиток біотехнологічних технологій”: організацію конкурсного відбору та науково-технічної експертизи проєктів; здійснення прикладних наукових досліджень та експериментальних розробок лікарських засобів і медичних виробів для їхнього виробництва в Україні; проєктування лабораторного комплексу [17].

3. Одним із найбільш затребуваних напрямів сучасного біоматеріалознавства є технології отримання та використання новітніх матеріалів для реконструктивної хірургії. Особливо перспективними є дослідження біонанокompatивів, а також атомномолекулярний інжиніринг, що забезпечує отримання унікальних багатокомпонентних високоентропійних нових функціональних матеріалів з практично необмеженим набором властивостей [6].

При цьому варто зауважити, що частка наукових досліджень в університетах та, відповідно, й публікацій, присвячених новим біоматеріалам є незначною. Зокрема, в провідному вітчизняному виданні “Біомедична інженерія і технологія”, яке традиційно широко репрезентує досягнення університетської науки, зі 100 публікацій за останні п’ять років лише окремі присвячені створенню та використанню новітніх біосумісних матеріалів (наприклад, біоматеріали для виготовлення ортезів [18], технології адитивного 3D-друку прототипів кісткових імплантатів з полігідроксіалканатів [19], отримання гібридних апатит-біополімерних покриттів для поверхонь титанових імплантів [20], методи оцінки якості полімерних покриттів [2]).

Натомість серед університетських досліджень із біомедичної інженерії, зокрема, й тих, до проведення яких активно залучаються студенти, превалює комп’ютерне моделювання біомедичних процесів та розроблення на його основі

сучасних методів діагностики. Це, з одного боку, підтверджує високий ступінь інтеграції університетського освітньо-наукового процесу з цифровими технологіями та відповідає європейським трендам розвитку біотехнологій. З іншого боку, порівняно незначна кількість досліджень зі створення та вивчення новітніх біоматеріалів зумовлена особливостями матеріально-технічного й технологічного забезпечення таких розвідок, яке, вочевидь, в університетах потребує постійного оновлення.

Відтак, оскільки дослідження з біоматеріалознавства потребують сучасного високотехнологічного та спеціалізованого обладнання, а також високовартісних витратних матеріалів, актуальним є постійне удосконалення та оновлення лабораторної бази університетів, що здійснюють підготовку біоінженерів. Одним зі шляхів вирішення цієї проблеми може стати більш тісна інтеграція університетської та академічної науки. Зокрема, більш активне залучення установ Національної академії наук України та галузевих академій у якості партнерів та стейкхолдерів, що дасть можливість більш раціонально використовувати наявні інтелектуальні та матеріальні ресурси, створити сприятливі умови для студентів як для проходження фахової практики та потенційного працевлаштування, так і долучення до сучасного науково-дослідницького простору.

Важливим аспектом цього питання є й більш широке використання новітніх досягнень біомедичної інженерії в системі підготовки майбутніх фахівців цієї галузі. Натомість, лише в одному з проаналізованих звітів до практичних здобутків наукового дослідження віднесено включення його результатів до освітнього процесу, зокрема, змісту навчання та експериментальної підготовки.

4. У контексті поглиблення інтеграції вітчизняної університетської освіти до європейського науково-освітнього простору особливої актуальності набуває долучення

науково-педагогічних працівників, студентів і аспірантів до грантових проєктів, міжнародного обміну та стажування.

Ефективною є й практика пошуку інноваційних рішень із біомедичної інженерії та механізмів їхнього оперативного впровадження шляхом організації стартапів. Цей трендовий на сьогодні механізм дає можливість акумулювати інтелектуальний потенціал дослідників із різних країн світу та залучити до значні фінансові ресурси, що суттєво оптимізує та скорочує цикли створення новітніх біотехнологій. Одним із перших таких проєктів в Україні, що досягнув практичного результату, став стартап із виготовлення біонічних протезів, потреба в яких особливо зросла в умовах воєнного стану [22; 23].

Доцільним є також врахування європейського досвіду організації сучасних досліджень із біомедичної інженерії. Зокрема, щодо створення на базі провідних університетів та академічних установ науково-дослідних містечок (кампусів, парків), що об'єднують дослідників, медиків, інженерів із різних країн та інфраструктуру відповідних технологічних підприємств [3]. Перспективи міжнародних інвестицій у такі кластери та своєрідні дослідницькі хаби в умовах повоєнного відновлення України відкривають нові горизонти для розвитку вітчизняних біотехнологій.

Відтак, доцільним є здійснення подальших аналітичних досліджень досягнень та перспектив розбудови вітчизняної біомедичної інженерії як наукової та освітньої галузі із застосуванням методів бібліометричного, кореляційного, прогнозного аналізу з метою вивчення та узагальнення отриманих здобутків, визначення перспектив її подальшого розвитку та практичних механізмів розбудови відповідно до світових стандартів.

**Фінансування.** Дане дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

**Конфлікт інтересів.** Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

**Згода на публікацію.** Усі пацієнти, що мають стосунок до рукопису дали згоду на публікацію даної роботи.

**ORCID ID та внесок авторів.**

[0000-0002-8634-591X](https://orcid.org/0000-0002-8634-591X) (A,B,D,F) Holovko Mykola

[0000-0002-2200-8404](https://orcid.org/0000-0002-2200-8404) (C,D,E) Arkhyrei Maryna

A – Концепція роботи та дизайн, B – аналіз даних, C – Відповідальність за вебметричний аналіз, D – Написання статті, E – Критичний огляд, F – Остаточне схвалення статті.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Проєкт Плану відновлення України : Матеріали робочої групи «Освіта і наука». *Урядовий портал*. URL: <https://bit.ly/3RYi23P> (дата звернення: 29.11.2022).
- [2] Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2021 року : Постанова Кабінету Міністрів України від 7 вересня 2011 р. № 942. *ZakonOnline*. URL: [https://zakononline.com.ua/documents/show/388534\\_672263](https://zakononline.com.ua/documents/show/388534_672263) (дата звернення: 29.11.2022).
- [3] Юхновська Т.М., Груздова Т.В. Стратегічні напрями розвитку біотехнологічної сфери деяких країн світу: орієнтири для України. *Український соціум*. 2015. № 2 (53). С. 50–64.
- [4] Poliakova O.Yu., Shlykova V.O., Buntov I.Yu. Forecast of Biotechnology Trends in the World and in Ukraine Based on Analysis of Publications and Patents. *Наука та інновації*. 2019. Т. 15. № 1. С. 31–49.
- [5] Сфера біотехнологій в Україні: стан та перспективи розвитку. Підсумкові матеріали круглого столу, 1 грудня 2021. *Укрінформ*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-preshall/3359951-cfera-biotehnologij-v-ukraini-stan-ta-perspektivi-rozvitku.html> (дата звернення: 29.11.2022).
- [6] Фіртсов С.О. Новітні напрями у матеріалознавстві. *Вісник Національної академії наук України*. 2017. Вип. 5. С. 18–21.
- [7] Перший біонічний протез руки встановили у Львові (Відео). *Про захід*. URL: <https://prozahid.com/pershyj-bionichnyj-protez-ruky-vstanovyly-u-lvovi-video/> (дата звернення: 29.11.2022).
- [8] Яценко В.П., Максименко В.Б. Концепція розвитку освітянського напрямку “Біомедична інженерія” в Україні: дискусія. *Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”*. URL: <https://kpi.ua/713-10> (дата звернення: 29.11.2022).
- [9] Максименко В.Б., Білошицька О.К., Овчаренко Г.Р., Юр’єва К.О. Актуальні завдання біомедичної інженерії в Україні. *Біомедична інженерія і технології*. 2020. № 3. С. 1–5.
- [10] National Research Strategy BioEconomy 2030. Our Route towards a biobased economy. Federal Ministry of Education and Research. 2010. 50 p.

- [11] Національний депозитарій академічних текстів. URL: <https://nrat.ukrintei.ua/searchdb> (дата звернення: 29.11.2022).
- [12] Академія представила результати виконання нової бюджетної програми у 2018 році. *Національна академія наук України*. URL: <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=4651> (дата звернення: 29.11.2022).
- [13] Про започаткування Цільової програми наукових досліджень НАН України «Створення біоматеріалів та наукових основ їх застосування в реконструктивно-відновлювальній медицині» на 2022–2026 роки : Постанова Президії НАН України від 22.03.2022 № 88. *Національна академія наук України*. URL: <https://files.nas.gov.ua/PublicMessages/Documents/0/2022/03/220325190038172-3768.pdf> (дата звернення: 29.11.2022).
- [14] POWROTY – Wykorzystanie metod spektroskopowych do oceny procesu kościotworzenia na biomateriałach typu ceramicznego w warunkach in vitro. *Uniwersytet Medyczny w Lublinie*. URL: <http://www.umlub.pl/nauka/badania-i-rozwoj/krajowe-programy-badawcze/powroty-wykorzystanie-metod-spektroskopowych/> (дата звернення: 29.11.2022).
- [15] Наукові школи. Науково-педагогічна школа «Біомедичної інженерії» імені М. М. Амосова. *Кафедра біомедичної інженерії. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*. URL: <https://bmi.fbmi.kpi.ua/science/scientific-schools> (дата звернення: 01.12.2022).
- [16] Науково-дослідницька робота в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка: Підсумки за 2021 рік та завдання на 2022 рік : аналітична доповідь / заг. ред. і керівництво Ганна Толстаново. Київ : Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2022. 227 с. URL: <https://science.knu.ua/upload/%D0%B7%D0%B2%D1%82-2021-%D0%BD%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%B0.pdf> (дата звернення: 01.12.2022).
- [17] Про затвердження Порядку використання коштів, передбачених у державному бюджеті для створення біокластера “Біологічна безпека та розвиток біотехнологічних технологій”: Постанова Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2021 р. № 869. *Верховна Рада України. Законодавство України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/869-2021-%D0%BF#Text> (дата звернення: 29.11.2022).
- [18] Мохонько О.І., Беспалова О.Я. Матеріали для виготовлення ортезів. *Біомедицина інженерія і технологія*. 2019. № 2. С. 95–100.
- [19] Сорочан О.М., Московцова О.Д. Ефективність використання адитивних технологій при накістковому остеосинтезі. *Біомедицина інженерія і технологія*. 2020. № 4. С. 28–35.
- [20] Суходуб Л.Ф. Гібридні апатит-біополімерні покриття, отримані методом термічної депозиції на модельних імплантатах з титану та його сплавів. *Біомедицина інженерія і технологія*. 2021. № 6. С. 29–45.
- [21] Поліщук О.С., Козьор В.В. Оцінка якості нанесеного на інтраокулярну лінзу шару полімеру. *Біомедицина інженерія і технологія*. 2022. № 7. С. 21–27.
- [22] Біонічні протези з hardware з України. Як стартап Esper Bionics готується дати українцям роботу майбутнього. *DOU*. URL: <https://dou.ua/lenta/interviews/bionic-prostheses-esper-bionics-for-ukrainians/> (дата звернення: 29.11.2022).
- [23] Мельник О. Український стартап виготовить доступні біонічні протези. *Na chasi*. URL:

<https://nachasi.com/news/2018/09/11/robota-nad-bionichnymy-protezamy/> (дата звернення: 29.11.2022).

## REFERENCES

- [1] Uriadovyi portal. (2022, Jul.). *Project of the Recovery Plan of Ukraine : Materials of the Working Group “Education and Science”* [Online]. Available: <https://bit.ly/3RYi23> (in Ukrainian).
- [2] Kabinet Ministriv Ukrainy. (2011, Sep. 7). *Resolution no. 942, On approval of the list of priority thematic areas of scientific research and scientific and technical development for the period until 2021* [Online]. Available: [https://zakononline.com.ua/documents/show/388534\\_67226\\_3](https://zakononline.com.ua/documents/show/388534_67226_3) (in Ukrainian).
- [3] T. M. Yukhnovska and T. V. Hruzdova, “Strategic directions of development of the biotechnological sphere of some countries of the world: guidelines for Ukraine”, *Ukrainskyi sotsium*, no. 2 (53), pp. 50–64, 2015 (in Ukrainian).
- [4] O. Yu. Poliakova, V. O. Shlykova, I. Yu. Buntov, “Forecast of Biotechnology Trends in the World and in Ukraine Based on Analysis of Publications and Patents”, *Nauka ta innovatsii*, vol. 15, no. 1, pp. 31–49, 2019 (in English).
- [5] Ukrinform. (2021, Dec. 1). *The field of biotechnologies in Ukraine: state and prospects for development. Final materials of the round table, December 1, 2021* [Online]. Available: <https://www.ukrinform.ua/rubric-presshall/3359951-cfera-biotehnologij-v-ukraini-stan-ta-perspektivi-rozvitku.html> (in Ukrainian).
- [6] S. O. Firstov, “New trends in materials science”, *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, vol. 5, pp. 18–21, 2017 (in Ukrainian).
- [7] Pro zakhid. (2022, Sep. 16). *The first bionic hand prosthesis was installed in Lviv (Video)* [Online]. Available: <https://prozahid.com/pershyj-bionichnyj-protezh-ruky-vstanovyly-u-lvovi-video/> (in Ukrainian).
- [8] V. P. Yatsenko and V. B. Maksymenko, Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy “Kyivskyi politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho”. (2007, Apr. 4). *The concept of the development of the educational direction “Biomedical engineering” in Ukraine: a discussion* [Online]. Available: <https://kpi.ua/713-10> (in Ukrainian).
- [9] V. B. Maksymenko, O. K. Biloshytska, H. R. Ovcharenko and K. O. Yurieva, “Actual tasks of biomedical engineering in Ukraine”, *Biomedychna inzheneriia i tekhnolohii*, no. 3, pp. 1–5, 2020 (in Ukrainian).
- [10] *National Research Strategy BioEconomy 2030. Our Route towards a biobased economy*. Federal Ministry of Education and Research. 2010.
- [11] National depository of academic texts. <https://nrat.ukrintei.ua/searchdb> (accessed Nov. 29, 2022) (in Ukrainian).
- [12] S. Firstov, Natsionalna akademii nauk Ukrainy. (2019, Feb. 22). *The Academy presented the results of the implementation of the new budget program in 2018* [Online]. Available: <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=4651> (in Ukrainian).
- [13] Natsionalna akademii nauk Ukrainy. (2022, Mar. 22). *Resolution of the Presidium no. 88, On the initiation of the Targeted Scientific Research Program of the National Academy of Sciences of Ukraine “Creation of biomaterials and the scientific basis of their use in reconstructive and restorative medicine” for 2022–2026* [Online]. Available: <https://files.nas.gov.ua/PublicMessages/Documents/0/2022/03/220325190038172-3768.pdf> (in Ukrainian).

[14] Uniwersytet Medyczny w Lublinie (Medical University of Lublin). (n. d.). *POWROTY – Wykorzystanie metod spektroskopowych do oceny procesu kościotworzenia na biomateriałach typu ceramicznego w warunkach in vitro (RETURNS – The use of spectroscopic methods to assess the process of bone formation on ceramic-type biomaterials in vitro)* [Online]. Available: <http://www.umlub.pl/nauka/badania-i-rozwoj/krajowe-programy-badawcze/powroty-wykorzystanie-metod-spektroskopowych/> (in Polish).

[15] Kafedra biomedycznej inżynierii. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho». (n. d.). *Scientific schools. Scientific and pedagogical school of "Biomedical engineering" named after M. M. Amosov* [Online]. Available: <https://bmi.fbmi.kpi.ua/science/scientific-schools> (in Ukrainian).

[16] H. Tolstanova, Ed. *Scientific and research work at Taras Shevchenko National University of Kyiv: Results for 2021 and tasks for 2022 : analytical report*. Kyiv, Ukraina: Kyivskiy natsionalnyi universytet imeni Tarasa Shevchenka, 2022. [Online]. Available:

<https://science.knu.ua/upload/%D0%B7%D0%B2%D1%82-2021-%D0%BD%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%B0.pdf> (in Ukrainian).

[17] Verkhovna Rada of Ukraine. (2021, Aug. 18). *Resolution no. 869, On the approval of the Procedure for the use of funds provided in the state budget for the creation of a biocluster "Biological safety and development of biotechnological*

*technologies* [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/869-2021-%D0%BF#Text> (in Ukrainian).

[18] O. I. Mokhonko and O. Ia. Bepalova, "Materials for making orthoses", *Biomedyczna inżynieria i technologia*, no. 2, pp. 95–100, 2019 (in Ukrainian).

[19] O. M. Sorochan and O. D. Moskovtsova, "Effectiveness of the use of additive technologies in osseous osteosynthesis", *Biomedical engineering and technology*, no. 4, pp. 28–35, 2020 (in Ukrainian).

[20] L. F. Sukhodub, "Hybrid apatite-biopolymer coatings obtained by the method of thermal deposition on model implants made of titanium and its alloys", *Biomedical engineering and technology*, no. 6, pp. 29–45, 2021 (in Ukrainian).

[21] O. S. Polishchuk and V. V. Koziar, "Evaluation of the quality of the polymer layer applied to the intraocular lens", *Biomedical engineering and technology*, no. 7, pp. 21–27, 2022 (in Ukrainian).

[22] DOU. (2022, Aug. 24). *Bionic prostheses with hardware from Ukraine. As a startup, Esper Bionics is preparing to give Ukrainians the robots of the future* [Online]. Available: <https://dou.ua/lenta/interviews/bionic-prostheses-esper-bionics-for-ukrainians/> (in Ukrainian).

[23] O. Melnyk, Na chasi. (2018, Sep. 11). *Ukrainian startup will produce affordable bionic prostheses* [Online]. Available: <https://nachasi.com/news/2018/09/11/robota-nad-bionichnymy-proteзамy/> (in Ukrainian).

UDC 378.4/.6:001.891]:[606:61](477)

# MODERN BIOMEDICAL ENGINEERING IN DOMESTIC ACADEMIC AND UNIVERSITY SCIENCE

**Mykola Holovko**

m.golovko@ukr.net

**Maryna Arkhyrei.**

marina\_arkhyrei@ukr.net

Department of Biocybernetic and aerospace medicine

National aviation university

Kyiv, Ukraine

**Abstract** – Bibliometric analysis published in the National depository of Academic texts of the results of scientific research on Biomedical Engineering, carried out in 2017-2022 in institutions of the National Academy of Educational Sciences of Ukraine and leading domestic universities, the review of achievements was carried out, the features of the organization, the main directions and prospects for further development of this branch of modern Biotechnologies were analysed. It is shown that one of the priorities of Domestic Biomedical Engineering is Biomaterial Science, which is due to the significant needs for the latest materials for reconstructive surgery, which are growing in wartime conditions. The article analyses the theoretical and practical achievements of scientific-research institutions of the National Academy of Educational Sciences of Ukraine as a powerful integral Centre for solving current problems of creating and using modern Biotechnologies. The achievements of University Science in Biomaterial Science are presented and its important role in the formation of a new generation of researchers-specialists in the field of Biomedical Engineering is noted. Attention is focused on the growing importance of Applied Research, which will result in technologies for creating and using the latest Biomaterials. The necessity of improving and updating the laboratory base for training future bioengineers, the expediency of closer integration of University and Academic Science as conditions for rational use of intellectual and material resources, for obtaining new scientific results and including students in the modern research space, taking into account the European experience of organizing research by organizing research campuses, parks, clusters, start-ups.

**Keywords** – *Biomedical Engineering, Biomaterial, Academic and University Science Academic and University Science in Ukraine, development prospect.*