

Муравйов О.В.

<https://orcid.org/0000-0002-7699-0245>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Нагорний М.Д.

<https://orcid.org/0009-0005-3684-6467>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПЕРСОНАЛІЗОВАНОЇ ТА РЕГЕНЕРАТИВНОЇ МЕДИЦИНИ

У статті здійснено комплексний міждисциплінарний аналіз сучасного стану та перспектив розвитку медичних адитивних технологій як одного з ключових інструментів переходу від уніфікованих підходів до персоналізованої медицини. Особливу увагу приділено технологічному ланцюгу медичного адитивного виробництва та особливостям його реалізації.

Проаналізовано основні технології 3D-друку, що застосовуються в медицині, з акцентом на їхні технічні можливості, обмеження, економічну доцільність і складність впровадження в клінічну практику. Показано, що вибір конкретної технології визначається не лише вимогами до точності та механічних властивостей виробу, але й питаннями стерильності, біосумісності, довготривалої стабільності та можливості остеointegraції. Наведено порівняльний аналіз матеріалів, включаючи термoplastи, фотополімери, титанові сплави, біокераміку та полімери високої біоінертності, для обґрунтування їх використання в різних медичних галузях.

Окремий розділ присвячено клінічному застосуванню адитивних технологій у стоматології та ортопедії, де 3D-друк вже став стандартом лікування. Розглянуто використання хірургічних навігаційних шаблонів, прозорих елайнерів, індивідуальних титанових імплантатів і краніальних пластин, які забезпечують високу точність, зменшення інтраопераційних ризиків та скорочення часу хірургічних втручань. Показано переваги контрольованої пористості імплантатів для покращення біомеханічної інтеграції з кістковою тканиною.

У статті також висвітлено передові напрями розвитку адитивної медицини, зокрема біодрук тканин, технології «органів-на-чипі», 4D-друк «розумними матеріалами» та адитивну фармакологію, які формують підґрунтя для регенеративної медицини та персоналізованої медикаментозної терапії. Подальший розвиток адитивних технологій можливий лише за умови інтеграції технологічних інновацій, міждисциплінарної взаємодії та адаптації регуляторно-етичних норм, що забезпечить повну реалізацію потенціалу 3D-друку в безпечній, ефективній та персоналізованій медицині майбутнього.

Ключові слова: адитивні технології, 3D-друк у медицині, персоналізована медицина, біодрук, медичні імплантати.

Постановка проблеми. Сучасна система охорони здоров'я перебуває на етапі глибокої трансформації, зумовленої одночасним зростанням потреб у високоточних, ефективних і безпечних методах лікування та обмеженістю ресурсів традиційних виробничих і клінічних підходів [1, с. 48–49]. Класична модель медицини, орієнтована на стандартизовані серійні вироби та усереднені клінічні протоколи, дедалі частіше

демонструє свою неспроможність повною мірою враховувати анатомічну, фізіологічну та функціональну індивідуальність пацієнта. Це особливо критично в галузях хірургії, ортопедії, стоматології та реконструктивної медицини, де навіть незначні геометричні або біомеханічні відхилення можуть призводити до ускладнень, повторних втручань і зниження якості життя пацієнтів.

Адитивне виробництво розглядається як пер-



спективний інструмент подолання зазначених обмежень, оскільки забезпечує можливість створення індивідуалізованих медичних виробів, імплантатів та анатомічних моделей без суттєвого зростання виробничих витрат. Проте відсутність уніфікованих підходів до вибору технологій 3D-друку та матеріалів залежно від клінічного завдання ускладнює прийняття обґрунтованих рішень як в окремих медичних закладах, так і на рівні стратегічного планування розвитку галузі. У сукупності ці проблеми стримують повноцінну реалізацію потенціалу адитивних технологій у медицині та потребують комплексного наукового аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останнє десятиліття адитивні технології в медицині стали об'єктом інтенсивного наукового аналізу та експериментальних розробок. Актуальними темами наукових робіт з цього напрямку є вирішення проблем, пов'язаних із точністю, матеріалознавством, біосумісністю та клінічною ефективністю 3D-друкованих виробів [2, с. 115–116]. В оглядовій роботі [3, с. 176] здійснено узагальнення стану технологій адитивного виробництва, проаналізовано їх придатність для медичних застосувань, що створює базу основу для подальших досліджень у цій сфері.

Багато уваги в сучасній науковій літературі приділяється удосконаленню матеріалів для медичних застосувань. Роботи [4, с. 455; 5, с. 8] порівнюють властивості термопластичних полімерів, фотополімерів та металевих сплавів щодо механічних характеристик, біосумісності та потенціалу остеointegraції, проте наведені в них результати аналізу не актуальні на сьогоднішній день, що обумовлено стрімкою тенденцією розширення номенклатури цих матеріалів.

Особливої уваги заслуговують дослідження з біодруку: у публікації [6, с. 774] описано процес створення складних тривимірних тканинних структур, здатних до часткової функціональної інтеграції, що відкриває перспективи регенеративної медицини. Однак ці підходи стикаються із серйозними технічними бар'єрами, зокрема проблемою васкуляризації тканин та підтримання життєздатності надрукованих органів. Таким чином, незважаючи на значні досягнення, питання функціональної адаптації біодрукованих структур до реальних фізіологічних умов залишається відкритим.

Постановка завдання. Метою роботи є комплексний аналіз сучасних технологій адитивного виробництва в медицині з позицій їх техноло-

гічних можливостей, матеріалознавчого забезпечення та клінічного застосування, а також визначення основних перспектив, обмежень і викликів впровадження 3D-друку в умовах переходу до персоналізованої та регенеративної медицини.

Виклад основного матеріалу. Застосування сучасного адитивного виробництва в медичній галузі розглядається як складний, багатоетапний процес, який виходить за рамки простого друку деталей. На відміну від традиційного випуску серійних виробів 3D-друк базується на унікальній анатомії пацієнта, що висуває певні індивідуальні вимоги як до програмного, так і до апаратного забезпечення.

Технологічні основи та матеріали 3D-друку. Найбільш економічно ефективною адитивною технологією в медичній сфері сьогодні став друк розплавленим осадженням (FDM/FFF), що передбачає нанесення розплавлених термопластичних ниток шар за шаром через нагріті екструзійні сопла 3D-принтеру. Завдяки відносно недорогому обладнанню та відсутності токсичних хімікатів, FDM-принтери стали стандартним методом для виготовлення анатомічних навчальних моделей. Однак шарувата структура FDM-виробів створює сприятливе середовище для адгезії та розмноження бактерій, що обмежує використання технології у виготовленні імплантатів.

Для моделей, що вимагають високої точності та ідеальної якості поверхні, зокрема в стоматології та мікрохірургії, використовуються методи фотополімеризації, такі як стереолітографія (SLA) та цифрова обробка світлом (DLP). Ці технології базуються на затвердінні світлочутливих рідких смол під ультрафіолетовим (УФ) світлом, що випромінюється лазером або проектором. На відміну від екструзійного формування фотополімеризація забезпечує точність 10–25 мкм., що має вирішальне значення для виготовлення хірургічних навігаційних моделей, оскільки навіть найменше відхилення геометрії може призвести до пошкодження нервів під час операції. Хімічні властивості процесу дозволяють виготовляти однорідні, ізотропні, водостійкі вироби з гладкою поверхнею, які відповідають вимогам гігієни порожнини рота. Однак використання рідких смол вимагає складної подальшої обробки, включаючи промивання спиртовими розчинами та подальше УФ затвердіння, для досягнення кінцевих механічних властивостей та повної біосумісності.

Технології виробництва на основі підкладок (плавлення металевого порошку), такі як селективне лазерне спікання (SLS) та пряме лазерне спі-

кання металу (DMLS/SLM), є одними з найбільш технологічно передових методів. Вони використовують високоенергетичні лазерні промені для сплавлення частинок полімеру або металевого порошку. Ключовою перевагою порошкової технології є усунення потреби в опорній конструкції, оскільки неспечений порошок створює необхідну підтримку. Комбіноване використання титанових сплавів з пористими поверхневими структурами вирішує головну проблему в ортопедії: забезпечення надійного зрощення кісток. Жива кісткова тканина може прорости через пори надрукованого імплантату, стаючи невід'ємною частиною тіла та значно покращуючи довговічність протеза порівняно з традиційними литими виробами. Одночасно активний розвиток біокерамічних матеріалів (таких як гідроксиапатит) дозволяє створювати біорозкладні структури, які з часом замінюються власними тканинами пацієнта, реалізуючи таким чином концепцію регенеративної медицини. Тому синергія між передовими методами цифрового дизайну, точним обладнанням та інноваційними біоматеріалами формує технологічну основу сучасного персоналізованого

3D-друку. У таблиці 1 наведені результати комплексного порівняльного аналізу можливостей застосування адитивних технологій медичного призначення.

3D-друк у стоматології, ортопедії та реконструктивній хірургії. Сьогодні найпоширенішим та новаторським застосуванням технології адитивного виробництва є виготовлення твердих тканин людини, таких як кістки та зуби. Сучасні клінічні процедури в стоматології більше не починаються з фізичних зліпків, натомість використовують внутрішньоротові сканери для створення цифрових моделей ротової порожнини. Широке використання хірургічних направляючих є значним нововведенням у галузі. Полімерні ковпачки, виготовлені за допомогою технології 3D-друку, містять металеві втулки, які точно спрямовують позиціонування хірургічних свердел. Такі направляючі дозволяють розміщувати імплантати з точністю до десятих міліметра, запобігаючи пошкодженню нижньощелепного нерву або перфорації пазухи, підвищуючи хірургічну передбачуваність.

Ортодонція – ще одна галузь, де 3D-друк став важливим при виробництві прозорих елайнерів.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз адитивних технологій у медичній практиці

Технологія / матеріали	Сфера застосування	Переваги	Недоліки	Особливості застосування
Екструзія термопластів (FDM/FFF) / PLA, ABS-M30i, PETG, TPU/TPU, PEEK, PEI.	Реабілітація та навчання: анатомічні моделі, краніальні імплантати.	Найнижча вартість; нетоксичність та широка номенклатура матеріалів.	Низька міцність та точність геометрії; накопичення бактерій.	Не потребує кваліфікованого персоналу та складної вентиляції; обмеження для постійних імплантатів.
Фотополімеризація (SLA/DLP) / Біосумісні, стоматологічні, еластичні смоли.	Стоматологія та мікрохірургія: коронки, мости, слухові апарати.	Найвища точність (10-25 мкм); ідеально гладка поверхня.	Токсичність рідких смол; крихкість виробів під впливом УФ.	Необхідність постобробки; обмежений термін стабільності матеріалів.
Селективне лазерне спікання (SLS) / PA12, PA11, TPU порошки, композити.	Ортопедія та інструментарій: протези, складні ортопедичні конструкції, хірургічні інструменти.	Біосумісність матеріалів; друк складних механізмів в зборі; висока міцність.	Пориста та шорстка поверхня; тривале охолодження виробів.	Потребує кваліфікованого догляду в лабораторних умовах, станції для просіювання порошку та потужної витяжки.
Друк металами (SLM/DMLS/EBM) / Ti-6Al-4V ELI, CoCrMo, нержавіюча сталь 316L, тантал.	Травматологія та імплантати: індивідуальні імплантати та ендопротези.	Пористі структури для вrostання кістки; висока міцність.	Дуже висока вартість; необхідність додаткової обробки поверхонь.	Потребує кваліфікованого персоналу та заходів безпеки через вибухонебезпечність.
Біопринтинг / Природні гідрогелі (альгінат, колаген), синтетичні (PEG, PLGA), клітинні компоненти.	Регенеративна медицина та тканинна інженерія: шкіра та хрящі, моделювання операцій.	Відсутність відторгнення; вирішення кризи донорських органів.	Низька механічна міцність; короткий термін життя тканин.	Потреба наукової команди з біологів, інженерів та лікарів; робота в стерильних приміщеннях.

Технологія дозволяє друкувати кілька моделей щелепних кісток, кожна з яких імітує наступний етап руху зубів, що реалізує високо персоналізоване лікування без необхідності використання традиційних ортодонтичних апаратів. В ортопедії та травматології 3D-друк допомагає прибирати складні дефекти кісток, які неможливо ефективно лікувати за допомогою звичайних протезів. Це особливо актуально в ортопедичних та онкологічних операціях, де резекції пухлин (наприклад, остеосаркоми) можуть призвести до серйозних атипових дефектів кісток. У таких випадках дані комп'ютерної томографії використовують для розробки індивідуальних титанових імплантатів, які точно імітують анатомію місця дефекту.

Ключовою перевагою друківаних імплантатів є контрольована пористість поверхні. Губчаста структура металу, яку неможливо відтворити за допомогою лиття, імітує структуру живої кістки, створюючи умови, необхідні для росту тканини глибоко всередині імплантату. Технологія забезпечує формування стабільного біологічного зв'язку на межі «імплантат-кісткова тканина», що сприяє довготривалій фіксації імплантату навіть у молодих фізично активних пацієнтів та знижує ризик асептичного розхитування.

Традиційні краніальні та нейрохірургічні процедури вимагають ручного формування титанової сітки під час операції, що є трудомістким процесом і не забезпечує задовільних косметичних результатів. Технологія ламінування дозволяє виготовляти попередньо розроблені пластини, використовуючи «дзеркальне відображення» здорової сторони комп'ютерно-згенерованої моделі. Біоінертний полімер РЕЕК (поліефіретеркетон), який використовується при цьому в якості матеріалу імплантату, на відміну від металів, є непровідним та рентгеноконтрастним, що дозволяє проводити функціональну магнітно-резонансну томографію (МРТ) мозку без спотворення зображення. Використання адитивного виробництва в хірургії може скоротити час операції, зменшити крововтрату та значно покращити косметичні та функціональні результати реабілітації.

Біодрук, фармакологія та моделювання м'яких тканин. Хоча адитивне виробництво для відновлення скелетних структур стало клінічним стандартом, застосування м'яких тканин та біоактивних матеріалів є на передньому краї сучасної біомедицинської інженерії. Цю галузь можна умовно розділити на три взаємопов'язані області: передопераційне моделювання м'яких тканин, біодрук та адитивну фармакологію. Перша область

активно використовується в хірургії, зокрема в кардіологічних та онкологічних операціях. Технології струменевого друку фотополімерами, такі як PolyJet [7, с. 2–3], дозволяють хірургам створювати анатомічні моделі, використовуючи матеріали з різними фізичними властивостями. Наприклад, під час планування кардіохірургії для немовляти з вродженим пороком серця модель може бути надрукована з використанням еластичної гуми для міокарда та жорсткого пластику для кальцифікованих ділянок або пухлин. Це дозволяє хірургам візуально оцінити ураження та отримати тактильний зворотний зв'язок, тобто, «репетирувати» майбутню хірургічну процедуру.

Найбільш інноваційним та найдосконалішим технологічним трендом є 3D-біодрук, що дозволяє створювати тривимірні тканинні структури шляхом нашарування живих клітин, біоматеріалів та факторів росту. На відміну від імплантаційного друку, який використовує інертні матеріали, «будівельні блоки» 3D-біодруку складаються з біочорнил, гідрогелевих матеріалів (на основі альгінату, колагену, желатину), збагачених спеціалізованими або власними стовбуровими клітинами пацієнта. Сучасні екструзійні біопринтери здатні виготовляти відносно прості аваскулярні тканинні конструкції, зокрема шкіру, вушний хрящ та меніск. Найбільшим технічним викликом у створенні повноцінних функціональних органів, таких як серце, нирки та печінка, залишається васкуляризація – включення розгалуженої капілярної мережі в надруковану тканину. Без ефективною системи кровообігу клітини всередині тканини гинуть від нестачі кисню та поживних речовин. Тому сучасні дослідження зосереджені на розробці технологій коаксіального друку для створення порожнистих мікроканалів та культивування в них ендотеліальних клітин для формування судинного шару. Наразі цей технологічний напрямок обмежений виготовленням альгінатних каркасів органів (рис. 1), що використовуються в якості шаблонів для тканинної інженерії серця або моделей для дослідження васкуляризації.

Паралельно з тканинною інженерією швидко розвивається адитивна фармакологія, яка змінює парадигму медикаментозної терапії, переходячи від масово вироблених стандартизованих рецептур до персоналізованого лікування. Традиційні методи виробництва таблеток мають обмеження в контролі дозування та вивільнення ліків. Технологія 3D-друку дозволяє виробляти таблетки зі складною внутрішньою структурою та пористістю, що робить можливим програмування про-

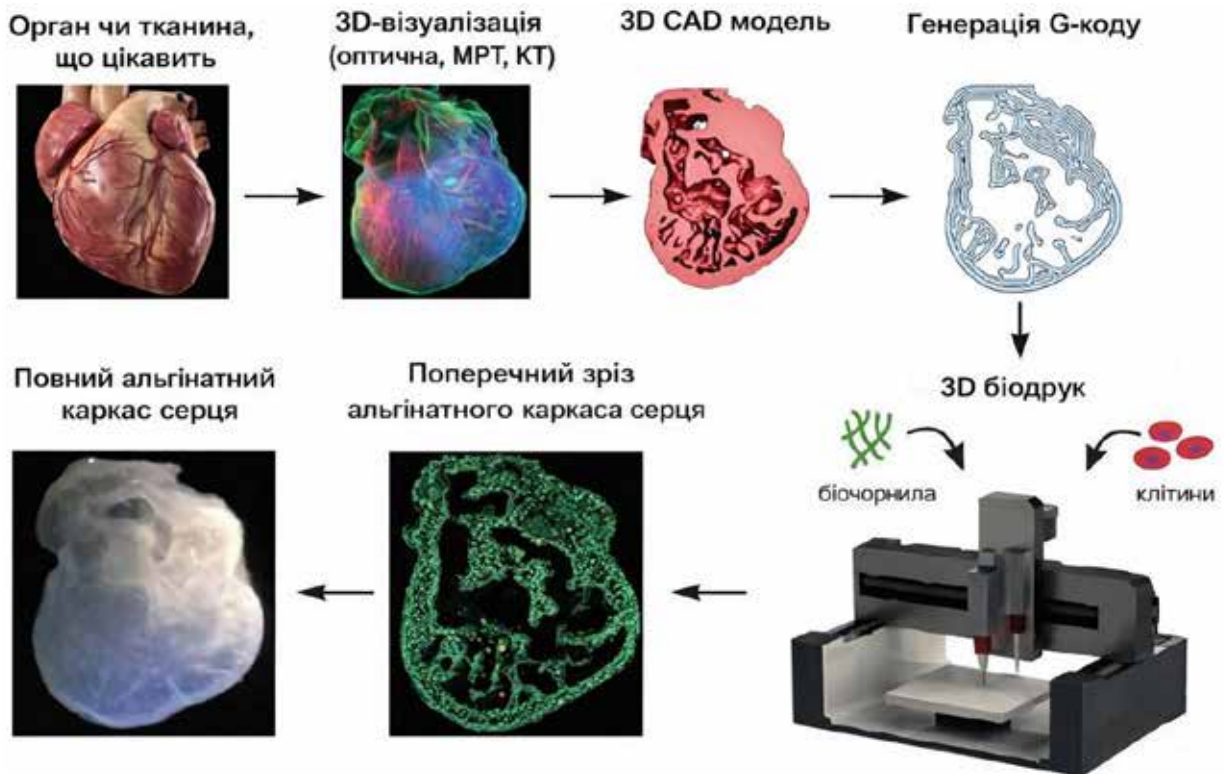


Рис. 1. Етапи біодруку альгінатного каркаса серця

філей вивільнення ліків в організмі. Яскравим прикладом є схвалена FDA технологія виробництва протиепілептичних препаратів. Технологія друкує пористу структуру, яка дозволяє таблетці швидко розчинятися в слині, що є вирішальною перевагою для пацієнтів, які мають труднощі з ковтанням. Також це відкриває шлях для розробки так званих композитних таблеток – багатшарових препаратів, що містять кілька активних інгредієнтів в одній капсулі, розділених захисним шаром. Підхід дозволяє пацієнтам із хронічними захворюваннями максимізувати терапевтичну ефективність однієї дози препарату: кожен активний інгредієнт вивільняється за потреби в травному тракті.

Інноваційні горизонти медичних адитивних технологій. Традиційні методи лікування глибоких опіків та обширних травм часто вимагають болісної, автоматизованої пересадки шкіри. Ця процедура передбачає взяття шкіри зі здорової частини тіла пацієнта та її пересадку на пошкоджену ділянку, що може призвести до додаткових ризиків травми та інфекції. Біодрук у судинній системі – це революційна альтернатива [8, с. 4–8]. Технологія дозволяє друкувати безпосередньо в операційній, усуваючи необхідність вирощування тканин у лабораторних чашах. Метод вико-

ристовує мобільний 3D-принтер, що нагадує роботизовану руку. Цей пристрій має вбудований 3D-сканер, який аналізує морфологію рани в режимі реального часу та визначає її глибину та нерівності. На основі цієї інформації програмне забезпечення миттєво розраховує шлях друкувальної головки. Далі екструдер наносить шар спеціального гелю, що містить власні клітини шкіри пацієнта (кератиноцити та фібробласти), фактори росту для сприяння регенерації та фібрин для швидкого згортання крові. Це покращує рівень успішності та результати загоєння порівняно з традиційними методами пересадки шкіри та відкриває нову еру в лікуванні опіків та травм.

У той час як звичайний 3D-друк створює статичні тривимірні об'єкти, динамічна технологія 4D-друку додає четвертий вимір – час. Технологія використовує «розумні матеріали», які можуть змінювати свою форму та фізичні властивості під час процесу імплантації у відповідь на зовнішні подразники. У дитячій хірургії, де природний ріст пацієнтів є значним викликом, ця технологія виявляється справжнім благом. Звичайні жорсткі імплантати з часом стають занадто малими, що вимагає численних операцій для їх заміни з високим ризиком. Нещодавній клінічний прорив включає 4D-друковані трахеальні трубки для лікування

трахеобронхомалаяції у дітей, патології, що характеризується звуженням та погіршенням стану м'яких дихальних шляхів. Дослідники розробили спеціальний медичний імплантат у вигляді трубчастого каркаса, що встановлюють усередині судини або іншого порожнистого органу, виготовлений з біорозкладного полікапролактону [9, с. 2]. Така друкована трубка має здатність розширюватися в міру зростання м'язів дитини, адаптуючись до анатомії. На момент, коли дихальні шляхи пацієнта відновлені, імплантат розчиняється в організмі та легко виводиться.

Органи на чіпах є одним з найперспективніших напрямків сучасної біотехнології, метою якого є заміна неетичного та неточного тестування фармацевтичних препаратів на тваринах. Ці мікрофлюїдні чіпи, виготовлені за допомогою фотолітографії високої роздільної здатності, мають розмір USB-накопичувача, але містять складну систему мікроканалів, заповнених живими людськими клітинами з певних органів, таких як печінка, легені, нирки та серце. Додаючи препарат до рідини, що імітує кровотік, і дозволяючи їй проходити через ці канали, можна точно відтворити фізіологічні реакції людських органів на хімічні речовини. Наприклад, «легені на чіпі», розроблені в Гарвардському університеті, не тільки дозволяють газообмін, але й механічно надуваються, імітуючи вдих і видих [10, с. 2–4]. Технологія перспективна в онкології, оскільки дозволяє створювати індивідуальні «мікропухлини на чіпі» з використанням власних клітин пацієнта, безпечно протестувати сотні схем хіміотерапії та знайти найефективніше лікування.

Висновки. Ефективність застосування 3D-друку в медицині безпосередньо залежить від правильного вибору технології адитивного виробництва та матеріалів. Технології FDM/FFF демонструють високу економічну доцільність і доступність для освітніх, реабілітаційних та допоміжних клінічних завдань, однак обмежені щодо точності та гігієнічних вимог. Методи фотополімеризації (SLA/DLP) забезпечують надвисоку точність

і якість поверхні, що робить їх незамінними в стоматології та мікрохірургії, попри потребу у складній додатковій обробці та використанні потенційно токсичних матеріалів. Порошкові технології (SLS, SLM/DMLS/EBM) відкривають можливості створення функціональних полімерних та металевих імплантатів зі складною внутрішньою геометрією й контрольованою пористістю, що є критично важливим для ортопедії та травматології.

Особливу клінічну цінність мають індивідуальні імплантати з титанових сплавів та біоінертних полімерів, які забезпечують високий рівень остеоінтеграції, механічної стабільності та функціональної сумісності з організмом пацієнта. Використання таких рішень у краніопластичній, щелепно-лицьовій хірургії та онкоортопедії дозволяє скоротити тривалість операцій, зменшити інтраопераційні ризики, крововтрату та прискорити процеси післяопераційної реабілітації, що позитивно впливає на клінічні результати.

Передовий науковий фронт адитивної медицини зміщується у напрямку біодруку, адитивної фармакології та мікрофлюїдних систем типу «органи-на-чіпі». Вказані технології формують підґрунтя для розвитку регенеративної медицини, персоналізованого підбору лікарських засобів, зменшення залежності від донорських органів та доклінічних випробувань на тваринах. Незважаючи на значний потенціал, ці напрями наразі обмежені фундаментальними технічними викликами, зокрема проблемами васкуляризації тканин, забезпечення їх довготривалої життєздатності та контролю функціональної активності надрукованих структур.

Подальший розвиток адитивних технологій у медицині має ґрунтуватися на поєднанні технологічних інновацій, міждисциплінарної співпраці та системної адаптації регуляторних і етичних норм. Саме такий комплексний підхід дозволить реалізувати повний потенціал 3D-друку як одного з ключових інструментів медицини майбутнього, орієнтованої на безпечне, ефективне та індивідуалізоване лікування пацієнтів.

Список літератури:

1. Муравйов О.В., Петрик В.Ф., Лисенко Ю.Ю., Богдан Г.А., Наконечна А.В. Автоматизація методу термографічної діагностики патологій організму людини. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2022. № 1. С. 47–53. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.1.5>.
2. Муравйов О.В., Нижник Ю.М., Петрик В.Ф., Протасов А.Г., Серий К.М. Сучасний стан та перспективи розвитку адитивних технологій. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2021. Том 32 (71). № 5. С. 114–119. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/18>.
3. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 143. P. 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.

4. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. *New York: Springer*, 2015. 498 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3.
5. Chia H.N., Wu B.M. Recent advances in 3D printing of biomaterials. *Journal of Biological Engineering*. 2015. Vol. 9(1). 4. DOI: 10.1186/s13036-015-0001-4.
6. Murphy S.V., Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology*. 2014. Vol. 32. P. 773–785. DOI: 10.1038/nbt.2958.
7. Emiliani N., Porcaro R., Pisaneschi G., et al. Post-printing processing and aging effects on Polyjet materials intended for the fabrication of advanced surgical simulators. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2024. Vol. 156. 106598. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106598>.
8. Li W., Li J. Pan C., et al. Light-based 3D bioprinting techniques for illuminating the advances of vascular tissue engineering. *Materials Today Bio*. 2024. Vol. 29. 101286. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2024.101286>.
9. Wahbeh J.M., Lama J., Park S., et al. Degradation and fatigue behavior of 3D-printed bioresorbable tracheal splints. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*. 2024. 112(12). DOI:10.1002/jbm.b.35501.
10. Dasgupta Q., Jiang A., Wen A.M., et al. A human lung alveolus-on-a-chip model of acute radiation-induced lung injury. *Nature Communications*. 2023. 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42171-z>.

Muraviov O.V., Nahornyi M.D. ADDITIVE TECHNOLOGIES AS A TOOL FOR PERSONALIZED AND REGENERATIVE MEDICINE

The article presents a comprehensive interdisciplinary analysis of the current state and future prospects of additive manufacturing in medicine as a key technological driver of the transition from standardized healthcare solutions to personalized medicine. Particular attention is paid to the technological chain of medical additive manufacturing and the specific features of its implementation.

The study analyzes the major additive manufacturing technologies currently applied in medicine with an emphasis on their technical capabilities, limitations, economic feasibility, and clinical applicability. It is demonstrated that the selection of a specific printing technology depends not only on accuracy and mechanical performance requirements, but also on sterility, surface quality, biocompatibility, long-term stability, and osseointegration potential. A comparative assessment of materials such as thermoplastics, photopolymers, titanium alloys, bioceramics, and high-performance bioinert polymers is provided, supporting evidence-based decisions for their use in various medical applications.

Special focus is given to clinical implementations of additive manufacturing in dentistry and orthopedics, where 3D printing has already become part of routine medical practice. The article discusses the use of surgical guides, transparent orthodontic aligners, patient-specific titanium implants, and cranial plates, which enable high surgical precision, reduced intraoperative risks, and shorter procedure times. The advantages of controlled implant porosity for enhancing bone ingrowth and long-term biomechanical integration are emphasized.

The paper also explores cutting-edge developments in additive medicine, including tissue bioprinting, organ-on-a-chip systems, 4D printing with «smart materials», and additive pharmacology, which collectively form the foundation of regenerative medicine and personalized drug therapy. The further development of additive technologies in medicine requires the integration of technological innovations, interdisciplinary collaboration, and the adaptation of regulatory and ethical frameworks to fully realize the potential of 3D printing in safe, effective, and personalized future healthcare.

Keywords: *additive technologies, medical 3D printing, personalized medicine, bioprinting, medical implants*

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 03.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026