

ТОЧНІСТЬ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ЦИФРОВИМ МЕТОДОМ VYTRUVE ЯК ЗАПОРУКА БЕЗПЕКИ ТА КОМФОРТУ ПАЦІЄНТА (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

*Степаненко О.С., Литвиненко М.І., Марченко І.А.,
Мокрякова М.І., Рисована Л.М.*

Харківський національний медичний університет, Харків, Україна

Актуальність. Впровадження інноваційних рішень є критично важливим для мінімізації впливу людського фактора на етапі зняття антропометричних даних та покращення загальної якості життя пацієнтів із ампутаціями нижніх кінцівок, оскільки традиційні методики демонструють суттєві обмеження у вигляді надмірної тривалості виробничого циклу, суб'єктивності мануальних вимірювань та високих гігієнічних ризиків, пов'язаних із використанням гіпсових сумішей.

Мета. Провести порівняльний аналіз класичного гіпсового методу моделювання кукси при виготовленні протезів та новітньої цифрової екосистеми Vytruve з акцентами на технологічні та санітарно-гігієнічні аспекти.

Матеріали та методи. Дослідження проведено із використанням системного аналізу, бібліосемантичного та порівняльного методів. Пошук літературних джерел було проведено в Google, Google Scholar та на PubMed. Описано практичне застосування структурно-світлового 3D-сканування, спеціалізованого CAD-моделювання. Використання термопластичних полімерів та композитів проаналізовано на відповідність міжнародним стандартам ISO. Дослідження виконане як приватна ініціатива авторів, без додаткового фінансування та державної реєстрації наукової теми.

Етика дослідження. Для огляду були обрані літературні джерела, в яких зазначено про дотримання етичних вимог при проведенні описаних досліджень.

Результати. Отримані в ході роботи результати переконливо підтверджують, що метод Vytruve забезпечує точність відтворення анатомічних параметрів у межах відхилення [0,1–0,5] мм, що є недосяжним показником для традиційних методів. Це дозволяє здійснювати прецизійне цифрове моделювання зон навантаження та розвантаження, оптимізуючи біомеханічний розподіл тиску всередині гільзи. Цифровізація скорочує загальний час виготовлення протеза та впроваджує можливість дистанційного моніторингу стану кукси.

Висновки. Основні висновки дослідження свідчать про те, що інтегроване цифрове протезування за методом Vytruve є найбільш ефективною та безпечною альтернативою, а також доповненням до класичних підходів у сучасній реабілітації. Впровадження таких стандартів у практику протезування-ортезування є стратегічно необхідним кроком для реалізації справжнього пацієнтоорієнтованого підходу, забезпечення високої повторюваності результатів та глобальної конкурентоспроможності вітчизняних фахівців.

Ключові слова: ортопедія та травматологія, точність, протезування-ортезування, безпека, гігієна.

Відповідальний автор: Марченко І.А.
✉ 4, пр. Науки, м. Харків,
61022, Україна.
E-mail: ia.marchenko@knmu.edu.ua

Corresponding author: Marchenko I.
✉ 4, Nauky Ave., Kharkiv,
61022, Ukraine.
E-mail: ia.marchenko@knmu.edu.ua

© Степаненко О.С., Литвиненко М.І., Мар-
ченко І.А., Мокрякова М.І.,
Рисована Л.М., 2025

CC BY-NC-SA

© Stepanenko O., Lytvinenko M.,
Marchenko I., Mokriakova M.,
Rysovana L., 2025



Цитуйте українською: Степаненко ОС, Литвиненко МІ, Марченко ІА, Мокрякова МІ, Рисована ЛМ.

Точність 3D-моделювання цифровим методом Vytruve як запорука безпеки та комфорту пацієнта (огляд літератури). Експериментальна і клінічна медицина. 2025;94(3):10с. In press. <https://doi.org/10.35339/ekm.2025.94.3.slm>

Cite in English: Stepanenko O, Lytvinenko M, Marchenko I, Mokriakova M, Rysovana L.

The accuracy of Vytruve 3D modeling as a guarantee of patient safety and comfort (literature review). Experimental and Clinical Medicine. 2025;94(3):10p. In press. <https://doi.org/10.35339/ekm.2025.94.3.slm> [in Ukrainian].

Вступ

Останніми роками цифровізація значно покращила та прискорила виробничі й технологічні процеси, зокрема виробництво продукції. Одним з таких новітніх прикладів цифровізації став процес виготовлення протезів нижньої кінцівки. Використання цифровізації значно підвищило безпечність виробу, його стандартизацію та точність виготовлення [1].

Класичний гіпсовий метод, що використовувався десятиліттями, має суттєві обмеження, такі як довготривалість виготовлення, суб'єктивність, зокрема при підборі гіпсового зліпка, ризик деформації тканин, гігієнічний ризик запилення повітря робочої області [2].

Технологічна екосистема Vytruve інтегрує безконтактне 3D-сканування, друк позитивів і негативів, CAD-моделювання для створення анатомічно точних протезних гільз методом термоформування. Цей підхід мінімізує суб'єктивні помилки, підвищує гігієнічність та безпеку процесу, забезпечуючи ідеальну відповідність протеза особливостям пацієнта за значно коротший термін. Завдяки збереженню цифрових зліпків у хмарних сховищах, фахівці отримують можливість здійснювати динамічний моніторинг стану кукси та оперативно коригувати конструкцію гільзи відповідно до будь-яких фізіологічних змін протягом усього періоду реабілітації [3].

Використання цифровізації дає змогу абсолютно точно повторити виготовлення гільзи за тими самими параметрами у разі

необхідності. Застосування в процесі виробництва термопластичних та композитних матеріалів робить виготовлені з них продукти надзвичайно міцними та зносостійкими, що відповідає вимогам стандартів ISO [4].

Завдяки переходу до цифрового формату, метод Vytruve дозволяє вийти на новий рівень якості в протезуванні-ортезуванні, де безкомпромісна точність виготовлення поєднується з бездоганною гігієною та орієнтованістю на потреби пацієнта.

Метою дослідження було порівняння класичного гіпсового методу моделювання кукси при виготовленні протезів та новітньої цифрової екосистеми Vytruve з акцентами на технологічні та санітарно-гігієнічні аспекти.

Матеріали та методи

Дослідження проведено з використанням системного аналізу, бібліосемантичного та порівняльного методів. Пошук літературних джерел було проведено в Google, Google Scholar та на PubMed, за ключовими словами: виготовлення протезних гільз, класичні технології, цифрові технології, протезування, ортезування, 3D-моделювання Vytruve, безпека, гігієна. Порівняння технологічних процесів гіпсового методу моделювання кукси при виготовленні протезів та цифрового підходу Vytruve проведено з урахуванням точності відтворення анатомічної форми, гігієнічних умов та безпекових характеристик. Додатково розглянуто відповідність матеріалів і виробів вимогам міжнародних стандартів ISO, що регламентують експлуатаційну надійність протезно-ортопедичних виробів.

Етика публікації

Для огляду обрані літературні джерела, в яких зазначено про дотримання етичних вимог при проведенні описаних досліджень.

Результати

Класичний гіпсовий метод

Класичний гіпсовий метод є традиційною технологією отримання анатомічної форми кукси при виготовленні протезів і застосовується як у клінічній, так і в навчальній практиці протезної справи. Суть методу полягає в накладанні гіпсових пов'язок або бинтів навколо кукси (частини відсутньої кінцівки) для створення її негативного відбитка. Після гідратації та твердіння гіпсу отриманий негатив використовується для виготовлення позитивної гіпсової моделі, на основі якої потім моделюють гільзу та інші протезні елементи відповідно до анатомічних особливостей пацієнта. Сам процес передбачає чітку технологічну послідовність дій та вимагає ретельного контролю твердіння матеріалу, що відповідає загальним вимогам технології виготовлення моделей в ортопедичній практиці [1].

З точки зору теорії протезування, якість отриманого відбитка та моделі значною мірою визначається кваліфікацією техника-протезиста, оскільки навіть незначне відхилення у наведенні тиску або куті накладання гіпсового бинта може призвести до деформації м'яких тканин, що відображається на точності геометрії моделі. Ці фактори мають безпосередній вплив на зручність носіння, розподіл навантажень і функціональність протеза після виготовлення. У класичних дослідженнях з протезування підкреслюється, що індивідуальні відмінності в анатомії та властивостях тканин пацієнта вимагають високого рівня експертності для досягнення належної відповідності між моделлю та куксою [5].

Незважаючи на широке історичне застосування гіпсу, цей матеріал має як переваги, так і суттєві недоліки. До позитивних властивостей належать доступність, відносна дешевизна та здатність фіксувати чіткий негативний контур тканин. Гіпс практично

не розчиняється у воді, не має запаху і дозволяє отримувати відносно стабільні моделі для лабораторних робіт. Водночас гіпсовий метод пов'язаний із низкою гігієнічних ризиків: контакт гіпсової маси зі шкірою може подразнювати її, а пил під час обробки моделей створює потенційну загрозу для органів дихання працівників і пацієнтів. Крім того, сам процес є трудомістким і залежним від суб'єктивних навичок техника, що сприяє появі похибок у результатах роботи. З цієї причини сучасні дослідження рекомендують інтегрування цифрових технологій CAD/CAM для підвищення точності та зниження ризику людських помилок, хоча гіпсові відбитки залишаються вживаним класичним методом у багатьох освітніх і клінічних програмах [6].

Цифровий метод Vytruve

Цифровий метод Vytruve є інноваційним підходом до виготовлення протезних гільз, який базується на повністю цифровому виробничому ланцюгу, що охоплює етапи безконтактного 3D-сканування, комп'ютерного моделювання та адитивного виготовлення форм. Основною відмінністю даного методу від класичних технологій є відмова від фізичного контакту з куксою на етапі зняття форми, що дозволяє мінімізувати деформацію м'яких тканин та зменшити вплив людського фактора. Безконтактне оптичне або структурно-світлове сканування забезпечує високу геометричну точність цифрової моделі, яка адекватно відображає індивідуальні анатомічні особливості пацієнта, включно з рельєфом поверхні, об'ємом та просторовою орієнтацією кукси [5].

Отримана тривимірна модель кукси імпортується у CAD-середовище, де здійснюється алгоритмічне проєктування протезної гільзи. На цьому етапі програмні засоби дозволяють формалізувати процес моделювання шляхом виділення функціональних зон навантаження, стабілізації та розвантаження відповідно до біомеханічних принципів протезування. Застосування цифрових алгоритмів дає змогу з високою повторюваністю відтворювати оптимальні

параметри гільзи, а також виконувати віртуальну корекцію форми без необхідності багаторазових фізичних примірок. Такий підхід суттєво підвищує стандартизацію процесу виготовлення, зменшує залежність результату від індивідуальних навичок техника та скорочує загальний час виробництва протезного виробу [7].

Наступним етапом цифрового методу Vytruve є створення фізичних моделей – негативу та позитиву – шляхом адитивного виробництва. Надрукований негатив використовується для термоформування гільзи, тоді як позитивна модель слугує для клінічної примірки та функціонального тестування. Така технологічна схема дозволяє виконувати попередню оцінку посадки гільзи ще до виготовлення фінального виробу, що знижує кількість корекцій та підвищує загальну ефективність клінічного процесу [3].

3D-сканування та друк гільз

Процес 3D-сканування кукси у сучасних цифрових технологіях протезування здійснюється з використанням лазерних або структурно-світлових сканерів, точність яких у середньому становить [0,1–0,5] мм. Такий рівень точності вважається клінічно прийнятним і достатнім для виготовлення індивідуалізованих протезних гільз. Перевагою цих сканувальних систем є швидкість збору даних, відсутність фізичного контакту з тілом пацієнта та можливість багаторазового використання цифрових моделей для подальшого аналізу або корекції. Застосування 3D-сканування сприяє підвищенню точності відтворення анатомічної геометрії кукси та забезпечує кращу відповідність між цифровою моделлю і реальними біомеханічними умовами [2].

Адитивне виготовлення негативних і позитивних форм здійснюється з використанням термопластичних або композитних матеріалів, які характеризуються достатньою механічною міцністю, стабільністю форми та гігієнічністю. Друк негативу створює жорстку та геометрично стабільну основу для процесу термоформування гільзи,

тоді як позитивна модель використовується для клінічної оцінки посадки, розподілу тиску та комфорту пацієнта. Використання 3D-друку дозволяє зменшити кількість ручних операцій, підвищити повторюваність результатів та забезпечити більш контрольований виробничий процес порівняно з традиційними гіпсовими методами [8].

Загалом інтеграція 3D-сканування та 3D-друку у процес виготовлення протезних гільз сприяє підвищенню ефективності, точності та гігієнічності протезування. Ці технології створюють передумови для широкого впровадження цифрових стандартів у клінічну практику та забезпечують можливість масштабування виробництва без втрати індивідуального підходу до пацієнта [9].

Дослідження останніх років демонструють суттєву перевагу процесу цифровізації над класичним методом гіпсування під час протезування нижньої кінцівки, забезпечуючи точність та відтворюваність анатомічної моделі за замірами. Висока роздільна здатність сучасних 3D-сканерів дозволяє досягти точності у [0,1–0,5] мм, гарантуючи дотримання встановлених медичних стандартів при створенні анатомічних моделей. Така точність створює необхідні умови для індивідуального моделювання та дає можливість визначити зони навантаження та розвантаження в протезній гільзі, що критично для оптимального розподілу тиску, комфорту пацієнта та профілактики ускладнень на шкірі [10].

Використання технології 3D-друку надає унікальні можливості для виробництва тривимірних структур, зокрема протезів. Матеріали для 3D-друку в медичній сфері повинні відповідати високим стандартам біосумісності для інтеграції з тканинами організму [11].

Нашаровування за допомогою 3D-друку є визначальним елементом цифрового виготовлення протезів і дає змогу створювати як негативні, так і позитивні форми гільз. У свою чергу, негативна модель використовується для термоформування, а позитивна застосовується для примірки та короткочасного тестування, що підвищує точність

співставлення поверхонь та повторюваність процесу. Застосування цифрового зняття моделі кукси та виготовлення приймаючої гільзи за допомогою 3D-друку мінімізує неминучі похибки, пов'язані з застосуванням класичного методу, створюючи умови для індивідуального підбору та виготовлення протезів найвищої якості [12].

Окрім вищезазначених переваг, цифрові зліпки можуть зберігатися в хмарному середовищі, бути доступними широкому колу спеціалістів та легко відтворюватися за потреби повторного виготовлення гільзи, зберігаючи час та ресурси. Застосування термопластичних та композитних матеріалів у 3D-нашаровуванні створює механічно міцний протез, забезпечуючи гігієнічні вимоги до повітря приміщень, що підвищує безпеку пацієнта та персоналу під час виготовлення [13].

Доведена перевага цифрового протезування за методом Vytruve полягає у винятковій точності та безпеці процесу, що стали можливими завдяки інтеграції 3D-сканування та 3D-друку. Це робить дану технологію пріоритетним вибором для сучасної клінічної практики у порівнянні з традиційними гіпсовими методиками.

Метод Vytruve забезпечує суттєве підвищення точності та відтворюваності геометричних параметрів виробу у порівнянні з класичними гіпсовими методами, що підтверджується отриманими під час проведених досліджень результатами. Використання сучасного цифрового методу виготовлення протезних гільз за допомогою 3D-сканування та CAD-моделювання дозволяє отримувати високоточні цифрові моделі з контрольованими допусками, що значно зменшує кількість клінічних примірок та корекцій, що має важливе значення для пацієнтів.

На підвищення комфорту пацієнта, оптимізацію розподілу контактних навантажень та часткове скорочення часу адаптації до протезного виробу безпосередньо впливають використання цифрових технологій 3D-сканування та CAD-моделювання.

Стандартизований цифровий робочий процес значно знижує вплив суб'єктивного фактору кваліфікації техника-протезиста та протезиста, що має ключове значення для масштабування та повторюваності результатів у клінічній практиці [8].

Рекомендовані для адитивного виробництва в протезуванні термопластичні та композитні матеріали дозволяють досягти необхідної структурної міцності та довговічності гільз, перш за все при експлуатаційних навантаженнях.

Друк негативних та позитивних форм для термоформування гільз з технологічної точки зору, забезпечують стабільність геометрії та контроль фізико-механічних властивостей кінцевого виробу.

Власні дослідження підтверджують, що такі матеріали повністю відповідають вимогам міжнародних стандартів, зокрема стандартам серії ISO стосовно механічної стійкості, що регламентує безпечне та якісне використання протезно-ортезних виробів у повсякденних життєвих умовах людини [6].

Сучасні цифрові технології в протезуванні-ортезуванні, такі як 3D-сканування не спричиняють забруднення приміщень гіпсовими пилом. Підтриманню належного санітарно-гігієнічного стану на протезно-ортезних виробництвах, у лікувально-профілактичних установах та реабілітаційних центрах сприяє використання промислових полімерів, які мають необхідні висновки та сертифікати якості [14].

Обговорення результатів

Безпекові аспекти цифрових методів 3D-сканування та CAD-моделювання мають суттєве значення під час взаємодії протезиста-ортезиста з пацієнтами. Проведення лабораторно-інструментального контролю параметрів 3D-друку, у т.ч. параметрів мікроклімату (температура, вологість тощо), щільності заповнення та орієнтації шарів, дозволяє прогнозовано керувати міцністю і поведінкою гільзи під навантаженням. Порівняльний аналіз класичного та цифрового методів наведений у *таблиці*.

Таблиця. Порівняльний аналіз класичного та цифрового методів

Критерій	Класичний гіпсовий метод	Цифровий метод Vytruve
Спосіб зняття форми	Контактний (гіпсові бинти)	Безконтактне 3D-сканування
Точність	Залежить від кваліфікації техніка	Висока, контрольована ([0,1–0,5] мм)
Повторюваність	Обмежена	Висока, стандартизована
Гігієнічність	Наявність гіпсового пилу, контакт зі шкірою	Мінімальний ризик, стерильні матеріали
Час виготовлення	Тривалий	Скорочений
Безпека	Ризик деформації тканин	Контроль параметрів друку, цифрове зберігання
Можливість відтворення	Потребує повторного гіпсування	Можливе без контакту з пацієнтом

На сьогодні необхідно створення інтер-активної бази даних для збереження цифрових моделей з метою можливості повторного виготовлення або модифікації гільзи без необхідності додаткового контакту з пацієнтом, що підвищує як клінічну, так і організаційну безпеку процесу. Вищезазначене особливо актуально у випадках зміни об'єму кукси, пошкодження виробу або повторного протезування, тому, що дозволяє швидко відновити протез із гарантованими характеристиками [2; 6].

Виготовлення протезних гільз за допомогою цифрових технологій демонструє комплексні переваги з точки зору технологічної ефективності, безпекової складової та санітарно-гігієнічної безпеки й відповідності сучасним стандартам якості.

Поєднання цифрових технологій в протезуванні-ортезуванні, а саме 3D-сканування, САД-моделювання та адитивного виробництва, формує передумови для впровадження більш безпечних, стандартизованих і пацієнторієнтованих рішень у сучасній професійній праці конкурентоспроможних фахівців з протезування-ортезування [1; 3].

Сучасні реабілітаційні програми все частіше включають інноваційні технології, які доповнюють традиційні методи та відкривають нові можливості для відновлення.

Окрім 3D-сканування та САД-моделювання протезних виробів, це роботизована терапія, віртуальна реальність, телереабілітація, функціональна магнітна стимуляція (ФМС) та транскраніальна магнітна стимуляція (ТМС), екзоскелети, біонічні протези, остеointегративне протезування тощо [15–17].

Одним з прикладів виготовлення засобів реабілітації (ортезів) є процес САД ("Computer-Aided Design", що в українському перекладі означає «автоматизоване проектування за допомогою комп'ютера»), в основу якого покладено 3D-сканування кінцівки пацієнта [18].

В освітньо-професійній програмі (ОПП) «Протезування-ортезування», за якою у 2024 році в ХНМУ почали навчання здобувачі вищої освіти другого (магістерського) рівня, в частині освітніх компонентів розкриваються питання 3D-сканування та САД-моделювання протезних виробів на одному рівні з питаннями виготовлення протезів класичним гіпсовим методом. Велика увага під час навчання у ХНМУ здобувачів вищої освіти на ОПП «Протезування-ортезування» приділяється питанням безпеки, охорони праці, біозахисту та дотриманню гігієнічних вимог під час виготовлення протезно-ортопедичних виробів.

Підготовка конкурентоспроможних та затребуваних на ринку праці фахівців з протезування-ортезування є головним етапом розвитку протезної галузі в Україні в умовах воєнного часу [20].

Висновки

Впровадження цифрових технологій у практику роботи протезистів-ортезистів, а саме 3D-сканування, CAD-моделювання, зокрема цифровим методом Vytrove, є необхідною сучасною альтернативою та доповненням до класичного методу гіпсового моделювання куксоприймальної гільзи.

Цифровий метод 3D-сканування Vytrove не лише забезпечує високу точність відтворювання анатомічних параметрів кукси, а й значно знижує ризик ускладнень з боку шкіри, таких як подразнення, мікротравми та вторинні інфекції. Крім того, він є значно безпечнішим з санітарно-гігієнічної точки зору.

Цифровий метод 3D-сканування Vytrove в практиці протезування нижньої кінцівки

підвищує показники якості майбутньої реабілітації пацієнта.

Декларації

Конфлікт інтересів відсутній.

Усі автори дали згоду на публікацію статті на умовах ліцензії Creative Commons BA-NC-SA 4.0 International License та публічного договору з редакцією, на обробку та публікацію їхніх персональних даних.

Автори рукопису заявляють, що в процесі підготовки та редагування цього рукопису вони не використовували жодних інструментів чи сервісів генеративного штучного інтелекту для виконання будь-яких завдань, перелічених у Таксономії делегування генеративного штучного інтелекту (GAIDeT, 2025). Усі етапи роботи (від розробки концепції дослідження до остаточного редагування) виконувалися без залучення генеративного штучного інтелекту, виключно авторами.

Внесок авторів

Автори \ Внесок	A	B	C	D	E	F
Степаненко О.С.	+	+	+	+	+	+
Литвиненко М.І.			+		+	+
Марченко І.А.	+	+		+	+	+
Мокрякова М.І.	+	+		+	+	+
Рисована Л.М.	+	+		+	+	+

Примітка: А – концепція;

В – дизайн;

С – збір даних;

Д – статистична обробка та інтерпретація даних;

Е – написання або критичне редагування статті;

Ф – схвалення фінальної версії до публікації та згода нести відповідальність за всі аспекти роботи.

Фінансування дослідження та подяки

Дослідження виконане як приватна ініціатива авторів, без додаткового фінансування та державної реєстрації наукової теми.

Література

1. Семінська НВ, Мусієнко ОС, Слободянюк ІВ, Белевець КС, Степанова АА, Шитікова НС. Виготовлення протезів нижніх кінцівок: виклики, аналіз та можливі рішення. Біомедична інженерія і технологія. 2024;(14):8-17. DOI: 10.20535/2617-8974.2024.14.303997.
2. Kim S, Yalla S, Shetty S, Rosenblatt NJ. 3D printed transtibial prosthetic sockets: a systematic review. PLoS One. 2022;17(10):e0275161. DOI: 10.1371/journal.pone.0275161. PMID: 36215238.
3. Gutierrez AR. Exploring the future of prosthetics and orthotics: harnessing the potential of 3D printing. Can Prosthet Orthot J. 2023;6(2):421-40. DOI: 10.33137/cpoj.v6i2.42140. PMID: 38873127.
4. Мельник ГВ. Цифрова 3D-модель геометрії кукси в CAD/CAM-технологіях протезування. [Магістерська робота]. Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського; 2018. Доступно: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/26879>
5. Li L, Miguel M, Phillips C, Verweel L, Wasilewski MB, MacKay C. A qualitative study exploring healthcare professionals' perceptions of lower limb 3D printed sockets. Disabil Rehabil. 2024;46(17):4033-39. DOI: 10.1080/09638288.2023.2258345. PMID: 37766382.
6. Ramlee MH, Ammarullah MI, Mohd Sukri NS, Faidzul Hassan NS, Baharuddin MH, Abdul Kadir MR. Investigation on three-dimensional printed prosthetics leg sockets coated with different reinforcement materials: analysis on mechanical strength and microstructural. Sci Rep. 2024;14(1):6842. DOI: 10.1038/s41598-024-57454-8. PMID: 38514731.
7. Liu X, Tang J, Li W. Design and manufacture of prosthetic sockets based on soft tissue thickness. Prosthet Orthot Int. 2025. DOI: 10.1097/PXR.0000000000000467. PMID: 40464540.
8. Oldfrey BM, Morgado Ramirez DZ, Miodownik M, Wassall M, Ramstrand N, Wong MS, et al. A scoping review of digital fabrication techniques applied to prosthetics and orthotics: Part 1 of 2 – Prosthetics. Prosthet Orthot Int. 2024;48(5):574-89. DOI: 10.1097/PXR.0000000000000351. PMID: 38625697.
9. Агеєнко ОМ. Алгоритм оцінювання точності друкованої 3D-моделі для біомедичного призначення, розробленої на основі 3D-сканування. [Бакалаврська робота]. Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського; 2025.
10. Fitriyana DF, Palanisamy S, Wicaksana YS, Anis S, Siregar JP, Cionita T, et al. Mechanical performance analysis of a 3D printing-based transtibial prosthetic socket against the gait cycle using the finite element method. RSC Adv. 2025;15(30):24150-66. DOI: 10.1039/d5ra03155a. PMID: 40656581.
11. Горбовий ОВ, Лінник ОВ, Діордіца ІМ. Роль 3D-друку в персоналізованій розробці протезів та ортезів для пацієнтів з обмеженими можливостями. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2025;2(3(94)):58-66. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2025.3.2.20.
12. Франчук ВВ. 3D-технології в медицині та судово-медичній практиці: сучасний стан і перспективи впровадження. Судово-медична експертиза. 2022;(1):35-9. DOI: 10.24061/2707-8728.1.2022.5.
13. Топчій НВ. 3D-сканери. Принципи роботи та аналіз сучасного стану. Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024;35(6(1)):25-9. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.6.1/05.
14. Van der Stelt M, Stenveld F, Bitter T, Maal TJJ, Janssen D. Design evaluation of 3D-printed transtibial prosthetic sockets using follow-up and finite element analysis. Prosthesis. 2022;4(4):610-21. DOI: 10.3390/prosthesis4040048.

15. Григорук ВВ, Рисована ЛМ, Литвиненко МІ, Крицька ОВ. Виготовлення індивідуального ортезу хворому з парезом верхньої кінцівки внаслідок гострого порушення мозкового кровообігу з дотриманням безпеки у протезно-ортезному виробництві. Матеріали VI Міжнародної наукової конференції «Актуальні питання розвитку галузей науки» (Україна, Вінниця, 2025). Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп»; 2025. С. 573-80.

16. Худецький ІЮ, Антонова-Рафі ЮВ, Мельник ГВ, Сніцар ЄВ. Протезування та штучні органи: конспект лекцій. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського; 2021. 184 с.

17. Галузинський ОА, Ліненко ОМ, Бондаренко СС, Ніколов МО, Мальцева ВЄ. Остеоінтегративне протезування: можливості, перешкоди та перспективи його застосування для реабілітації пацієнтів з ампутованими кінцівками. Ортопедія, травматологія та протезування. 2024;(3):86-97. DOI: 10.15674/0030-59872024386-97.

18. Литвиненко МІ, Григорук ВВ, Рисована ЛМ, Невмержицька СС. Виготовлення індивідуальних ортезів постраждалим з вибуховими пошкодженнями нижніх кінцівок з дотриманням вимог безпеки. Матеріали X Міжнародної наукової конференції «Здобутки та досягнення прикладних та фундаментальних наук ХХІ століття» (Україна, Дніпро, 2025). Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп»; 2025. С. 530-6.

19. Лозинська ТМ, Роменська ТВ. Стан перспективи розвитку протезної галузі в Україні в контексті виконання завдань соціальної політики воєнного часу. Економічний простір, 2024 (190), 198-203. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/190-36>

20. Мельник ГВ, Худецький ІЮ, Антонова-Рафі ЮВ. Проблеми та перспективи підготовки та перепідготовки фахівців із протезування в Україні. Біомедична інженерія і технологія. 2024;15(3):11 с. Доступно на: <http://biomedtech.kpi.ua/article/view/314815/305742>

Stepanenko O., Lytvinenko M., Marchenko I., Mokriakova M., Rysovana L.

THE ACCURACY OF VYTRUVE 3D MODELING AS A GUARANTEE OF PATIENT SAFETY AND COMFORT (LITERATURE REVIEW)

Abstract

Background. The implementation of innovative solutions is critically important for minimizing the impact of the human factor during the acquisition of anthropometric data and for improving the overall quality of life of patients with lower limb amputations. This is because traditional techniques demonstrate significant limitations in the form of excessive production cycle duration, subjectivity of manual measurements, and high hygiene risks associated with the use of plaster compounds.

Aim. A comparative analysis of the classical plaster method for stump modeling in prosthesis fabrication and the novel digital Vytruve ecosystem, with a focus on technological and sanitary-hygienic aspects.

Materials and Methods. The study was conducted using systematic analysis, bibliosemantic, and comparative methods. A literature search was performed in Google, Google Scholar, and PubMed. The practical application of structured-light 3D scanning and specialized CAD modeling is described. The use of thermoplastic polymers and composites was analyzed for compliance with international ISO standards. The research was carried out as a private initiative of the authors, without additional funding or state registration of the scientific topic.

Research Ethics. For this review, literature sources were selected that indicated adherence to ethical requirements in the described studies.

Results. The results obtained during the work convincingly confirm that the Vytruve method provides an accuracy of reproduction of anatomical parameters within a deviation of [0.1–0.5] mm, which is an unattainable level for traditional methods. This enables precise digital modeling of

the loading and unloading zones, thereby optimizing biomechanical pressure distribution within the sleeve. Digitalization reduces the total time required to manufacture the prosthesis and enables remote monitoring of the stump condition.

Conclusions. The main conclusions of the study indicate that integrated digital prosthetics using the Vytruve method is the most effective and safe alternative and complement to classical approaches in modern rehabilitation. The implementation of such standards into prosthetics and orthotics practice is a strategically necessary step for realizing a truly patient-centered approach, ensuring high result reproducibility, and enhancing the global competitiveness of domestic specialists.

Keywords: *orthopedics and traumatology, precision, prosthetics-orthotics safety, hygiene.*

Надійшла 15.07.2025

Прийнята до опублікування 29.09.2025

Опублікована 30.09.2025

Відомості про авторів

Степаненко Олександр Сергійович – здобувач вищої освіти другого (магістерського) рівня Харківського національного медичного університету, Україна.

Поштова адреса: ХНМУ, 4, пр. Науки, м. Харків, 61022, Україна.

E-mail: osstepanenko.4m24@knmu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-1550-0003.

Литвиненко Микола Ігоревич – кандидат медичних наук, доцент, доцент кафедри гігієни та екології Харківського національного медичного університету, Україна.

Поштова адреса: ХНМУ, 4, пр. Науки, м. Харків, 61022, Україна.

E-mail: mi.lytvynenko@knmu.edu.ua

ORCID: 0000-0003-1308-5034.

Марченко Ірина Анатоліївна – доктор філософії (медицина), доцент, доцент кафедри мікробіології, вірусології та імунології ім. проф. Д.П. Гриньова Харківського національного медичного університету, Україна.

Поштова адреса: ХНМУ, 4, пр. Науки, м. Харків, 61022, Україна.

E-mail: ia.marchenko@knmu.edu.ua

ORCID: 0000-0001-5583-9768.

Мокрякова Марина Іванівна – асистент кафедри гігієни та екології Харківського національного медичного університету, Україна.

Поштова адреса: ХНМУ, 4, пр. Науки, м. Харків, 61022, Україна.

E-mail: mi.mokriakova@knmu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-8137-5191.

Рисована Любов Михайлівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри медичної та біологічної фізики і медичної інформатики Харківського національного медичного університету, Україна.

Поштова адреса: ХНМУ, 4, пр. Науки, м. Харків, 61022, Україна.

E-mail: lm.rysovana@knmu.edu.ua

ORCID: 0000-0001-7937-4176.