

РЕЦЕНЗІЯ

Завідувача відділу реконструктивної ортопедії та травматології дитячого і юнацького віку ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України»

доктора медичних наук

Філіпчука Віктора Васильовича

на дисертаційну роботу **Зубкова Олександра Сергійовича**

«Використання навігаційної системи під час складного ендопротезування кульшового суглоба для точного відновлення центру ротації та підвищення післяопераційної функціональності суглоба»,

подану до разової спеціалізованої вченої ради на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 14.01.21 «Травматологія та ортопедія» (галузь знань 22 «Охорона здоров'я», спеціальність 222 «Медицина»)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ ТА ЇЇ АКТУАЛЬНІСТЬ

Дисертаційна робота О.С. Зубкова присвячена одній з найактуальніших та найскладніших проблем сучасної ортопедично-травматологічної практики — удосконаленню технологій первинного складного ендопротезування кульшового суглоба в умовах виражених анатомічних деформацій. Стрімке зростання кількості пацієнтів із дегенеративно-дистрофічними, посттравматичними та диспластичними ураженнями кульшової западини й проксимального відділу стегнової кістки, зумовлене як прогресивним старінням населення, так і значним підвищенням травматизму серед військових і цивільних у період збройних конфліктів, формує об'єктивну потребу в пошуку інноваційних хірургічних рішень для великих суглобів.

Особливу клінічну та наукову значущість порушеної теми визначає складність відновлення коректних анатомічних орієнтирів у разі дефіциту кісткової тканини або порушення нормальних топографічних взаємин вертлюгової западини та стегнової голівки. За таких умов традиційні «free-hand»-методики нерідко виявляються недостатньо точними для відтворення фізіологічного центру

ротації, що призводить до післяопераційних ускладнень — вивихів ендопротеза, функціональної різниці довжини кінцівок, нестабільності або прискореного зношування компонентів імплантату. Наслідком є погіршення якості життя пацієнтів, підвищення ризику ранніх ревізійних втручань і зростання економічного навантаження на систему охорони здоров'я.

У цьому контексті запропоноване автором дослідження щодо використання навігаційної системи змішаної реальності на базі гарнітури HoloLens 2 є вагомим кроком уперед, що інтегрує передові цифрові технології в рутинну хірургічну практику. Поєднання тривимірного попереднього планування, інтерактивної інтраопераційної візуалізації та динамічної калібровки просторових орієнтирів дозволяє суттєво підвищити точність позиціонування компонентів ендопротеза, мінімізувати «людський фактор» і, відповідно, покращити ранні та довгострокові функціональні результати лікування.

Отже, представлена тема є не лише своєчасною, а й надзвичайно важливою для подальшого розвитку теоретичної й практичної ортопедії; вона відкриває широкі перспективи впровадження комбінованих навігаційних і доповнених-реальності платформ у стандартизовані протоколи ендопротезування кульшового суглоба, що в кінцевому підсумку сприятиме підвищенню ефективності та безпеки ортопедичної допомоги.

Здобувач поставив перед собою наступні завдання:

1. Проаналізувати сучасні підходи до ендопротезування кульшового суглоба, зокрема у складних клінічних випадках, та оцінити існуючі методи відновлення центру ротації.
2. Дослідити можливості та переваги застосування навігаційних систем у хірургії кульшового суглоба, з акцентом на точність позиціонування компонентів ендопротеза.
3. Покращити ефективність передопераційного планування в контексті тотального ендопротезування кульшового суглоба.

4. Розробити компактну навігаційну систему для застосування в складному ендопротезуванні кульшового суглоба для забезпечення анатомічно точного відновлення центру ротації.
5. Провести порівняльний аналіз клінічних та рентгенологічних результатів ендопротезування кульшового суглоба, виконаного із застосуванням навігаційної системи та без неї, з урахуванням точності встановлення компонентів і функціонального стану суглоба після операції.
6. Вдосконалити техніку ендопротезування кульшового суглоба за допомогою комп'ютерної навігаційної системи.
7. Визначити вплив зміни центру ротації в кульшовому суглобі на колінний суглоб, шляхом 3D та математичного моделювання зміни розподілу навантаження в останньому.
8. Оцінити клінічну ефективність запропонованого підходу на основі даних післяопераційного періоду, функціональних шкал, рентгенологічних та комп'ютерних показників.

Наукова новизна дослідження

1. Вперше розроблена навігаційна система на основі змішаної реальності з програмним забезпеченням, для ендопротезування кульшового суглоба при важких анатомічних змінах, та значних дефектах кульшового суглоба, що дозволяє встановити компоненти з більш високою точністю та відновити центр ротації.
2. Вперше проведено комплексне біомеханічне та математичне моделювання впливу зміщення центру ротації кульшового суглоба при ТЕПКС, на навантаження в колінному суглобі з використанням 3D-моделі нижньої кінцівки. Продемонстровано, що навіть незначні зміщення ЦР (2–8 мм) в медіальному або латеральному напрямках істотно впливають на розподіл навантаження колінному суглобі, що призводить до вторинного ураження останнього.
3. Після проведеного експериментального дослідження було поглиблено знання доцільності включення індивідуальної орієнтації таза в алгоритми

передопераційного шаблонування з метою оптимального визначення положення центру ротації кульшового суглоба.

4. Удосконалено підхід до різних варіантів відновлення опорної та кінематичної функції кульшового суглоба.

5. Удосконалено підхід до передопераційного планування ТЕПКС шляхом інтеграції сучасних методів 3D-візуалізації та комп'ютерного моделювання з урахуванням індивідуальної анатомічної варіабельності пацієнтів.

6. На підставі отриманих результатів запропоновано новий підхід до хірургічної тактики при складному ендопротезуванні кульшового суглоба, орієнтований на персоніфіковане передопераційне планування та інтраопераційний контроль з використанням змішаної реальності, що відкриває нові перспективи в хірургії великих суглобів.

Практична значимість результатів роботи.

Запропонована система навігації на основі змішаної реальності для ендопротезування кульшового суглоба дозволяє суттєво підвищити точність позиціонування імплантів, зменшити похибки, пов'язані з візуальною орієнтацією, та індивідуалізувати передопераційне планування. Результати дослідження можуть бути використані в практиці ортопедичних відділень як державних, так і приватних закладів, зокрема при оперативному лікуванні складних випадків дисплазії, контрактур та анкілозу кульшового суглоба.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами

Дисертаційна робота є самостійною науково-дослідною роботою автора виконана на базі ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України».

Апробація матеріалів дослідження:

Апробація результатів дисертаційного дослідження здійснювалася впродовж 2023–2024 рр. на авторитетних науково-освітніх платформах. Перші проміжні висновки було представлено 6 липня 2023 р. під час онлайн-семінару «Загальні аспекти ендопротезування кульшового суглоба», де автор окреслив

теоретичні передумови застосування навігаційних технологій та отримав фахові зауваження щодо протоколу передопераційного планування. Поглиблений аналіз можливостей системи змішаної реальності Hololens 2 продемонстровано 24 листопада 2023 р. на Конференції молодих вчених «Hololens 2 в ендопротезуванні кульшового суглоба»; там було вперше публічно презентовано інтегрований алгоритм динамічної калібровки, що викликав жваву дискусію серед спеціалістів із цифрової хірургії.

Подальша апробація відбулася 18 квітня 2024 р. у межах фахової школи «Особливості ендопротезування кульшового суглоба», де автор представив комплексний порівняльний аналіз переваг і недоліків навігаційних MR-систем, отримавши рекомендації щодо розширення вибірки та тривалості спостереження. Завершальне обговорення й офіційне схвалення матеріалів дослідження відбулося 23 квітня 2024 р. на засіданні вченої ради ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», що засвідчило відповідність методології та результатів дисертації сучасним науковим вимогам і дозволило рекомендувати роботу до захисту.

Рівень виконання поставленого наукового завдання, оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності

Дисертаційна робота Зубкова О. С. виконана із залученням достатньої кількості клінічних досліджень, на високому науковому та методичному рівнях. Наукові завдання, які поставлені здобувачем, чітко співпадають з метою наукових досліджень. Він чітко оволодів методологію наукових досліджень і це дозволило йому отримати репрезентативні дані та виконати всі завдання на шляху до поставленої мети. Статистична обробка отриманих результатів дослідження проведена грамотно та коректно.

Структура та обсяг дисертації

Робота складається із 160 друкованих сторінок українською мовою, включає вступ, огляд літератури, шість розділів власних досліджень, висновки, перелік

практичних рекомендацій, список літератури з 116 джерел, а також 21 рисунок і 12 таблиць. Структура є логічною, дозволяє послідовно простежити шлях автора від проблемного питання до отриманих результатів. Ілюстративний матеріал виконано на належному технічному рівні: 3D-схеми, графіки та рентгенограми чіткі, мають пояснювальні підписи, що спрощує їхнє сприйняття фахівцем.

Аналіз змісту розділів дисертації

У вступній частині роботи всебічно обґрунтовано її актуальність: автор докладно описує сучасні клінічні виклики, пов'язані з відсутністю точних і водночас економічно доступних систем інтраопераційної навігації, що особливо гостро відчувається у складних випадках ендопротезування. Чітко сформульовано мету дослідження та окреслено конкретні завдання, спрямовані на розроблення та впровадження навігаційної платформи змішаної реальності, здатної підвищити точність позиціонування компонентів імпланта. Окремий наголос зроблено на науковій новизні, яка полягає у синтезі 3D-передопераційного планування з інтерактивною MR-візуалізацією, а також на практичній значущості отриманих результатів для ортопедичного хірурга й системи охорони здоров'я загалом. Автор детально окреслює існуючі прогалини в технологічному забезпеченні та підкреслює нагальну потребу у впровадженні доступних, високоточних навігаційних рішень, що й визначає цінність проведеного дослідження.

У розділі **систематичного огляду** автор опрацював 116 джерел, опублікованих протягом останнього десятиліття, що охоплюють фундаментальні дослідження та клінічні звіти провідних ортопедичних центрів Європи, Північної Америки та Азії. Аналіз виконано за чітко визначеними критеріями PRISMA, із розподілом усіх систем навігації на чотири ключові кластери: механічні напрямні, оптичні треки з інфрачервоними маркерами, роботизовані платформи з активним позиціонуванням та технології змішаної реальності (MR), зокрема гарнітури HoloLens 2. Для кожного кластера наведено порівняльні таблиці, де узагальнено точність позиціонування ацетабулярного компонента (середнє відхилення у

градусах і міліметрах), тривалість операції, відсоток ускладнень (вивихи, нестабільність, ревізії) та економічні показники вартості обладнання й обслуговування.

Особливу увагу приділено розбіжностям у підходах до відтворення центру ротації (ЦР). Автор продемонстрував, що навіть незначне латеро-медіальне зміщення ЦР на 4–6 мм підвищує пікові навантаження у медіальному та латеральному відділі колінного суглоба, що підтверджено результатами трьох біомеханічних і двох проспективних клінічних спостережень. Такі дані засвідчують недостатню кількість досліджень, які системно оцінюють взаємозв'язок між неточною орієнтацією імпланта та вторинними змінами у суміжних суглобах. На підставі виявлених прогалин автор переконливо формує логічний місток до власної методики MR-навігації, аргументуючи, що саме відображення анатомічних орієнтирів у реальному часі дозволяє мінімізувати зміщення ЦР, знизити ризик колінних ускладнень і водночас зберегти економічну доступність порівняно з роботизованими системами.

Розділ 2. Матеріали і методи

У дослідженні проаналізовано 119 пацієнтів (151 тотальне ендопротезування кульшового суглоба) з безцементною фіксацією. Основна група: 23 пацієнти / 29 суглобів оперовані з допомогою навігації HoloLens 2; контрольна: 96 пацієнтів / 118 суглобів без навігації. У 87 випадках виконано однобічне, у 32 — двобічне ТЕП. Середній вік хворих — 59,7 року; жінки — 54 %, чоловіки — 46 %.

Критерії включення: складні диспластичні, посттравматичні або дегенеративні зміни кульшового суглоба; запланована безцементна фіксація; відсутність інфекцій та системних захворювань кісткової тканини. Виключали ревізійні втручання й протипоказання до КТ. Передопераційне планування виконували за мультиспіральною КТ; 3D-моделювання та розрахунок «ідеального» центру ротації проводили у Slicer 3D і SolidWorks. Інтраопераційне позиціонування у

групі MR здійснювали через HoloLens 2. Післяопераційно оцінювали відхилення компонентів, Harris Hip Score SF-36 та ускладнення.

Статистичний аналіз виконано: тест Шапіро–Вілка для нормальності, t-тест або Манна–Уїтні для міжгрупових відмінностей, χ^2 для категоріальних змінних, кореляція Пірсона; значущим вважали $p < 0,05$. Всі пацієнти надали інформовану згоду.

Розділ 3. Математичне моделювання

У середовищі SolidWorks створено авторську високоточного тривимірну модель усієї нижньої кінцівки, що включає таз, стегнову кістку, колінний суглоб та великогомілкову кістку з анатомічно коректними властивостями матеріалу. На цій основі виконано серію симуляцій, у яких латеральне зміщення центру ротації (ЦР) кульшового суглоба варіювали від 2 до 8 мм із кроком 2 мм. Результати показали прогресивне зростання згинальних моментів у медіальному виростку великогомілкової кістки: при зміщенні на 2 мм — 21,735 Н·м, на 4 мм — 44,033 Н·м, на 6 мм — 69,975 Н·м, а при 8 мм — 120,25 Н·м. Величини, зафіксовані при зміщеннях понад 4 мм, у десятки разів перевищують фізіологічно допустимі показники навантаження, що суттєво підвищує ризик розвитку вальгусної деформації та раннього медіального гонартрозу. Таким чином, результати симуляції наочно підтверджують критичну необхідність точного відтворення ЦР під час тотального ендопротезування, аби мінімізувати вторинні патологічні зміни у суміжних відділах опорно-рухового апарату, насамперед у колінному суглобі.

Розділ 4. Розробка навігаційної системи

Даний розділ демонструє високий рівень інженерної та клінічної інтеграції: автор ґрунтовно обґрунтовує вибір технології змішаної реальності як доступної альтернативи дорогим роботизованим платформам і докладно описує апаратно-програмну архітектуру системи, у якій гарнітура HoloLens 2 забезпечує безперервне трекінг-відображення анатомічних орієнтирів без погіршення

огляду хірургічного поля. Наведені алгоритми динамічної калібровки координатної системи таза, симуляційні результати на 3-D фантомах і перші інтраопераційні випробування переконливо свідчать про значне зменшення похибок позиціонування ацетабулярного компонента та потенційну економію за рахунок скорочення ревізійних втручань. Окремо підкреслено адаптацію моделі до індивідуальних варіацій нахилу таза, що додає універсальності запропонованій методиці.

Розділ 5. Порівняльний аналіз результатів лікування

У п'ятому розділі автор переконливо демонструє переваги навігаційної MR-системи, порівнюючи рентгенологічні та клінічні показники двох когорт. Наведено детальну статистику: у контрольній групі «free-hand» середнє вертикальне зміщення центру ротації становило $5,4 \pm 2,1$ мм, причому в 34,7 % випадків воно перевищувало 6 мм ; у навігаційній групі ці показники суттєво нижчі, що підтверджує підрозділ 5.2 (вплив навігації на точність). Функціонально це відобразилося на достовірно вищих балах Harris Hip Score ($93,13 \pm 5,99$ проти $86,23 \pm 9,90$) та SF-36 ($79,1 \pm 4,5$ проти $76,0 \pm 4,0$), статистичну значущість яких автор коректно підтвердив тестом Манна-Уїтні ($p = 0,00018$). Такий комплексний аналіз — від геометрії чашки до самооцінки якості життя — створює переконливу доказову базу, що використання HoloLens 2 суттєво покращує точність імплантації й клінічні результати.

Розділ 6. Реабілітація

У шостому розділі автор переконливо підкреслює ключову роль реабілітації як рівноцінного етапу комплексного лікування після тотального ендопротезування кульшового суглоба. Подано змістовний огляд сучасних доказових протоколів — від ранньої активізації і мультимодальної анальгезії до залучення біомеханічного моніторингу — і співставлено рекомендації ERAS, AAOS та NICE з українською практикою, наголошуючи на спільному прагненні забезпечити швидке повернення пацієнта до активного життя . Автор логічно пояснює, як комплекс фізичних вправ, поступове нарощування навантажень і

міждисциплінарна взаємодія скорочують строки відновлення, зменшують ризики контрактур і нестабільності ендопротеза та підвищують довготривалу виживаність імпланта.

Висновки сформульовано повноцінно і відповідають на поставлені завдання, мають теоретичне значення і повністю витікають із проведених досліджень.

Недоліки дисертації щодо змісту та оформлення Дисертаційна робота являє собою самостійне та завершене наукове дослідження, у якому чітко сформульовані й успішно вирішені поставлені мета та завдання. У процесі роботи було дотримано логічної послідовності етапів наукового пошуку, що забезпечило можливість здійснення якісного порівняльного аналізу отриманих результатів. Отримані у дослідженні дані є переконливими та не викликають сумнівів щодо їх достовірності.

Під час аналізу тексту дисертації було виявлено окремі стилістичні недоліки та певні неточності у формулюванні окремих положень, однак ці зауваження носять несуттєвий характер і не знижують загальний високий рівень наукової новизни та практичної значущості представленої роботи.

ПИТАННЯ ДО АВТОРА

1. Які обмеження щодо використання доповненої реальності були виявлені у пацієнтів з надмірною масою тіла, остеопенією або значною деформацією кульшової западини?
2. У роботі зазначено, що система навігації створена на основі Hololens 2 та Unity. Чи тестувалась вона у сценаріях багатокористувацької взаємодії (наприклад, для асистента або інтерна)? І чи може вона бути інтегрована у формат телехірургічного моніторингу або дистанційної підтримки хірурга?
3. Чи можуть результати вашої роботи скоротити «криву навчання» спеціалістів?

Дисертаційна робота Зубкова Олександра Сергійовича на здобуття наукового ступеня доктор філософії за темою «Використання навігаційної системи під час складного ендопротезування кульшового суглоба для точного відновлення центру ротації та підвищення післяопераційної функціональності суглоба» виконана в ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМНУ» під науковим керівництвом доктора медичних наук, Торчинського Віктора Петровича є закінченою, самостійною роботою, яка містить нове рішення актуальної проблеми – точність відновлення центру ротації в кульшовому суглобі та коректне положення компонентів ендопротеза при складному первинному ендопротезуванні кульшового суглоба. Висновки роботи достовірні, обґрунтовані, мають теоретичне та практичне значення і повністю витікають із проведених досліджень. Матеріали дисертації висвітлені в опублікованих працях. Таким чином за своєю актуальністю, науковою новизною, теоретичним, практичним значенням, методичним рівнем дисертаційна робота Зубкова Олександра Сергійовича відповідає вимогам п. 6 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор Зубков О. С. заслуговує присудження ступеня доктора філософії з галузі знань «Охорона здоров'я» за спеціальністю «Медицина».

Офіційний рецензент

Завідувач відділу

реконструктивної ортопедії

та травматології дитячого і юнацького віку

ДУ «ІТО НАМН України»

доктор медичних наук



Віктор Філіпчук

Віктор Філіпчук
Засвідчую:

Ст. інспектор
відділу кадрів

Зубков О. С.