

УДК 616-78

ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОГРАФІЇ ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ КРОВООБІГУ ТА ЗАПАЛЕННЯ В КУКСІ: СУЧАСНИЙ СТАН, ДІАГНОСТИЧНІ МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

Шликів Владислав Валентинович

v.shlykov@kpi.ua

Калашнікова Лариса Євгенівна

doc_hom2000@yahoo.com

Лебедєв Олексій Володимирович

biowelding@gmail.com

кафедра біомедичної інженерії

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

м. Київ, Україна

Анотація – У даній роботі розглядається можливість застосування систем інфрачервоної термографії високого дозволу в протезуванні з метою оцінки стану кровообігу та запалення в куксі. Термографія є неінвазивним методом візуалізації інфрачервоного випромінювання, який дозволяє оцінювати зміни поверхневої температури тіла. Іншими словами термографія – це графічний запис теплового випромінювання об'єкта. Термографія слугує допоміжним методом діагностики й повинна оцінюватися разом із клінічними, лабораторними та анамnestичними даними. Основними перевагами методу термографії вважають такі особливості як: повна безпечність, швидкість, висока точність, придатність для вагітних і дітей, оглядовість.

Даний систематичний огляд спрямований на оцінку клінічного застосування інфрачервона термографії (ІЧТ) в протезуванні, у якому особливу увагу приділено її потенціалу як неінвазивного, економічно ефективного та достовірного інструменту діагностики, моніторингу та лікування для покращення результатів лікування пацієнтів. Запалення в куксі характеризуються порушенням кровообігу, яке супроводжується змінами локальної температури тканин і порушеннями мікроциркуляції. Термографія, як високочутливий метод реєстрації інфрачервоного випромінювання, здатна виявляти мінімальні температурні коливання (до 0,1 °C) і тому є цінним інструментом для аналізу запальних процесів. На відміну від рентгенологічних методів або МРТ, термографія не супроводжується опроміненням, не потребує фізичного контакту й дозволяє оцінювати великі зони тіла одночасно. Наприклад, у ревматології цей метод використовується для виявлення запальних процесів у суглобах і м'яких тканинах, аналізу мікроциркуляції та моніторингу ефективності лікування при різних захворюваннях. Огляд узагальнює сучасні дані щодо застосування термографії в протезуванні, а також під час системних захворюваннях сполучної тканини. Розглянуто переваги та обмеження методу термографії.

Метою даного огляду є аналіз сучасного стану застосування термографії в протезуванні під час ампутації та після неї, що допомагає хірургам визначити оптимальну лінію ампутації, перевірити життєздатність тканин, а також наділі контролювати загоєння та підготовку до протезування. В статті проаналізовано можливість застосування інфрачервоної термографії для виявлення ділянки з порушеним кровообігом чи інфекцією, системні захворювання сполучної тканини за змінами температури шкіри і м'яких тканинах.

Висновок: метод ІЧТ продемонстрував значний потенціал у якості неінвазивного інструменту діагностики, моніторингу та оцінки стану кровообігу та запалення в куксі. Хоча її ефективність змінювалася в залежності від життєздатності тканин, що залишаються після ампутації, ІЧТ дає можливість виявляти ознаки запалення (гіпертермія) або, навпаки, недостатнього кровопостачання (гіпотермія) у ранньому періоді після операції під час загоєння кукси. Під час довгострокового моніторингу формування кукси ІЧТ дає можливість виявляти проблемні ділянки, що потребують додаткового догляду або втручання, і підготовки до протезування. Однак, необхідні подальші дослідження для стандартизації протоколів і підтвердження клінічної достовірності ІЧТ.

Ключові слова – інфрачервона термографія, гіпотермія, кукса, ампутація, кровообіг, остеопатична корекція

I. ВСТУП

Термографія відіграє ключову роль у виборі рівня ампутації, дозволяючи

візуалізувати розподіл температури у тканинах і виявляти зони з порушеним кровообігом, що допомагає визначити

життєздатні тканини для збереження і вибрати оптимальну лінію ампутації, мінімізуючи ризик ускладнень і покращуючи загоєння хурти, особливо при діабеті, коли адекватне кровопостачання критично важливе.

Термографічна система реєструє теплове випромінювання, яке походить від тіла. Зони з умовно хорошим кровообігом (артеріальним припливом) будуть на графічному зображенні «теплыми», а зони з недостатнім кровопостачанням (ішемічні) – «холодними». Для оцінювання стану кровообігу та запалення в куксі лікарі використовують ці теплові карти, щоб знайти саму «теплу» (життєздатну) зону, яка знаходиться вище за вражену, де тканини отримують достатньо кисню та поживних речовин, що забезпечує краще загоєння. Чим краще кровообіг у зоні передбачуваної ампутації, тим вище ймовірність успішного загоєння кукси та інтеграції протезу.

Інфрачервона термографія (ІЧТ) як додатковий діагностичний метод визнаний Американською академією медичної інфрачервоної візуалізації з 1887 року, а його фундаментальним принципом є різниця температур між двома точками, де асиметрія вище $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ вважається патологічною та може свідчити про відповідні клінічні зміни [1, 2, 3].

Зокрема, застосування інфрачервоної термографії надає об'єктивні дані про мікроциркуляцію та тканинний стан після ампутації:

1. Під час вибору рівня ампутації ІЧТ дозволяє точно визначити оптимальний рівень ампутації, щоб зберегти якнайбільше здорової тканини та забезпечити кращу функцію майбутньої кукси.

2. Під час профілактики ускладнень допомагає виявити ранні ознаки запалення, інфекції або поганого загоєння, що знижує ризик розвитку конічної кукси та інших проблем.

3. Під час реабілітації ІЧТ використовується для моніторингу стану кукси після операції, підбору протезу та

оцінки ефективності реабілітаційних заходів, що впливають на кровообіг та набряки.

Таким чином, застосування інфрачервоної термографії дає можливість хірургам приймати обґрунтоване рішення про рівень ампутації, зберігаючи максимум здорових тканин та покращуючи функціональний результат після протезування.

II. ІНСТРУМЕНТИ ТА МЕТОДИ

Для оцінки стану кровообігу та запалення в куксі застосовуються такі інструментальні методи, як радіоізотопна сцинтиграфія, емісійна томографія, термографія, імпедансометрія, лазерна доплерівська флоуметрія та навіть гістологічне дослідження м'яких тканин на різних рівнях [4].

Метод інфрачервоної термографії полягає у перетворенні інфрачервоного випромінювання у видиму частину спектра і є достатньо об'єктивним, даючи зображення ізотермічних рівнів, що корелюють з інтенсивністю шкірного кровотоку. Виходячи з клінічної практики проведення первинних та вторинних ампутацій, проблематики реабілітації пацієнтів після ампутації кінцівок, метод ІЧТ застосовується під час таких маршрутів пацієнта:

1. Перед ампутацією термографія дає можливість виявляти ділянки з поганим кровопостачанням (ішемію), які можуть бути нежиттєздатними. Це допомагає хірургу обрати місце для ампутації, що забезпечує краще загоєння.

2. Під час операції термографія допомагає оцінити адекватність пересічення судин та життєздатність тканин, що залишаються.

3. Після операції (загоєння кукси) у ранньому періоді ІЧТ дає можливість виявляти ознаки запалення (гіпертермія) або, навпаки, ознаки недостатнього кровопостачання (гіпотермія).

Довгостроково застосування методу ІЧТ забезпечує моніторинг формування кукси, виявлення проблемних ділянок, що потребують додаткового догляду або втручання, і підготовку до протезування. Однак метод ІЧТ не дає повної відповіді на питання про локалізації ураження судин, проте відображає функціональний стан кровообігу в кінцівці, що дає можливість достовірно визначити межу адекватного кровопостачання тканин і за цією ознакою побічно мати уяву про їхню життєздатність.

Зокрема, при патологічних станах кровообігу виявляються порушення симетрії розподілу температури щодо середньої лінії [5, 6]. Критеріями визначення рівня ампутації при інфрачервоній термографії є температурна асиметрія та поздовжній термографічний градієнт, тобто різниця у температурі сусідніх сегментів тіла [7]. Метод інформативний у розпізнаванні судинних порушень та його ускладнень, з його допомогою можливе здійснення динамічного контролю над станом тканин [7, 8]. Однак, такий підхід не дає можливості визначити стан кожного м'яза окремо, наприклад, при гангрені визначення істинних значень шкірного кровотоку за даними цього методу ускладнено, оскільки в області трофічних виразок внаслідок запалення температура шкіри може бути підвищена.

Визначення теплоутворення можна використовувати для оцінки обміну речовин як критерій норми та патології. Дистанційна інфрачервона термометрія дозволяє фіксувати радіаційну температуру заданої точки поверхні з точністю до 0,1 – 0,0 °С. Таке застосування методу ІЧТ є інформативним у розпізнаванні судинних порушень та їх ускладнень, дає можливість здійснення динамічного контролю над станом тканин. Метод простий у виконанні та нешкідливий [9, 10, 11].

Відповідно до отриманих даних термографічного дослідження, можливо прогнозувати рівень ампутації у хворих з

термінальними стадіями ішемії, при яких не можна виконати реконструктивну операцію. [12]. Наприклад, під час використання методу інфрачервоної термографії та оцінки швидкості шкірного кровообігу було проведено 100 ампутацій, 81 з яких – із збереженням колінного суглоба та 6 вимагали реампутацій (7,5%), що підтверджує діагностичну значущість даної методики [13, 14].

Є ряд повідомлень про значення шкірної термометрії для визначення оптимального рівня ампутації [15]. Водночас встановлено виражену варіабельність шкірної температури залежно від різних умов навколишнього середовища та загального стану пацієнта, тому цей показник не є об'єктивним критерієм [16]. Незважаючи на те, що інфрачервона термометрія не вважається інформативним методом для визначення межі життєздатності тканини, теплове картування ізотермічних шарів дозволяє оцінити не тільки життєздатність тканин, але і збігається зі шкірним кровообігом, що по суті обґрунтовує методику «косой клаптевої ампутації» [17].

За допомогою методу інфрачервоної термографії можна об'єктивно досліджувати результати остеопатичної корекції, зокрема зміну мікроциркуляції та кровообіг в тканинах. [18, 19, 20].

Отже, термографія успішно застосовується в клінічній практиці під час ампутацій, насамперед для визначення оптимального рівня ампутації та оцінки життєздатності тканин, особливо у пацієнтів із судинними захворюваннями та критичною ішемією.

III. УМОВИ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ІНФРАЧЕРВОНОЇ ТЕРМОГРАФІЇ В ПРОТЕЗУВАННІ

Значення температури на поверхні тіла людини залежить від індивідуальних фізіологічних особливостей організму та визначається патологічними змінами в організмі. Вимірювання означає отримання

можливості виявлення та визначення цих патологічних змін більш детально [21]. Реакції тканин кукси на дію зовнішніх сил є складними. До них належать деформація тканин, внутрішньо-тканинний кровообіг, ішемія, гіперемія, пітливість, біль, зміна температури шкіри, зміна кольору шкіри тощо. Механічні сили, що діють на поверхню шкіри кукси, викликають напруження та напругу в шкірі та тканинах кукси [22].

На рисунку 1 показано температуру окремих ділянок тіла на передній частині тіла людини згідно з термографічними дослідженнями [23, 24]. У представленому дослідженні вимірювалася температура в області нижче колін, і згідно зі згаданими дослідженнями температура поверхні повинна становити приблизно 31°C.

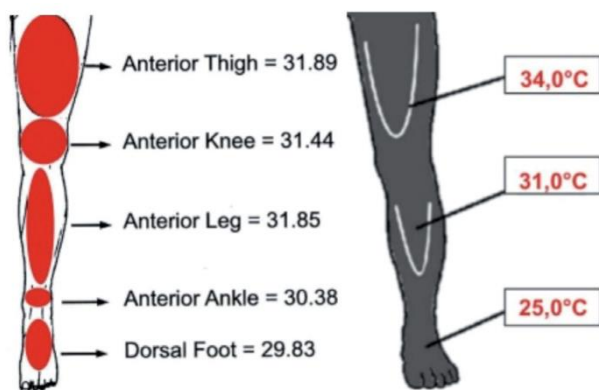


Рис. 1 – Температура крові в тілі людини та температура поверхні тіла людини за термографічними дослідженнями.

Кількісні дослідження [25], у яких тепловізор використовували для визначення фантомного болю після ампутації, визначили асиметричне підвищення температури, локалізоване в ділянках кукси, де знаходилася інфекція або біль, або в місці, що спричиняє більший тиск. Далі було встановлено, що фантомний біль пов'язаний з тепловими картами, на яких відстеження змін температури на куксі було доповнено інформацією про вологість у лунці під час ходьби. У всіх випадках спостерігалася зниження температури від проксимальної до дистальної частини кукси.

У процесі інших термографічних дослідженнях [26] було розглянуто застосування тепловізійної камери як технології, яка дає можливість одночасно з цілеспрямованою модифікацією гільзи протеза, порівнювати вплив різних типів вкладишів на куксу та можливість їх сприяння підвищенню комфорту пацієнта. Ці дослідження було зосереджено на моніторингу змін температури при транстібальній ампутації до та після ходьби з протезом. Користувач з транстібальним протезом ходив протягом 15 хвилин, протягом яких було виявлено підвищення температури у середньому на 20%. У критичних місцях кукси у 80% згаданих пацієнтів спостерігалася підвищена температура в нижній ділянці колінної чашечки та на медіальній стороні головки стегнової кістки, а у 40% пацієнтів спостерігалася підвищена температура на передньому краї великогомілкової кістки та на латеральній стороні головки стегнової кістки.

Тепловізійні зображення також використовуються під час прийняття клінічних рішень щодо встановлення конструкції гільзи, локалізації фантомного болю як допоміжної діагностики під час знеболювального лікування. Теплові карти дають можливість встановити локалізацію запальних процесів, виявлених на куксі, локалізацію тромботичних симптомів після ампутації при захворюваннях периферичних кровоносних судин, здійснити перевірку стану кукси до та після використання транстібального протеза. Наприклад, під час перевірки стану кукси визначається розподіл тиску на межі розділу між куксою та гільзою транстібального протеза, що необхідно для оцінки дизайну та конструкції гільзи. Отримання правильних даних за допомогою таких вимірювань тиску в гільзах вимагає відповідних давачів та правильного розташування датчиків, належної вимірювальної технології. Встановлення датчиків тиску в конструкцію гільзи має сприяти моніторингу фактичного

поверхневого натягу, тобто розподілу тиску, без суттєвого втручання в початкові умови структури гільзи, таким способом, як у галузі ортопедії та протезування [27].

У дослідженнях [28] термограми кукси, отримані за допомогою тепловізійної камери FLIR SC-660 та додатково оброблені за допомогою програмного забезпечення FLIR Reporter, представлено на рисунку 2.

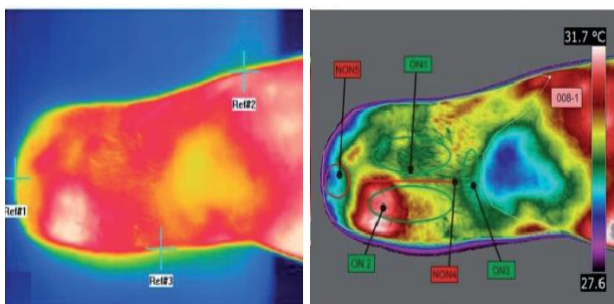


Рис. 2 – Методика вимірювання теплової картини на поверхні кукси.

Під час вимірювання дослідники контролювали декілька ділянок на поверхні кукси великогомілкової кістки, на яких визначають ділянки, що піддаються навантаженню (ON1, ON2, ON3), та ділянки, що піддаються розвантаженню (NON4, NON5). Контрольовані ділянки на трансгібальній куксі, з яких отримують необхідні значення температури, позначалися або вибиралися за допомогою полігонів.

Окрім впливу на здатність ходити, вважається, що підвищене навантаження на неампутовану сторону спричиняє додатковий дефіцит кровотоку у людей із судинними захворюваннями [29], біль у спині та ногах [30], а також передчасний знос та артрит у довгостроковій перспективі через збільшення сил тертя.

Встановлено, що вплив ампутації нижньої кінцівки на судинні захворювання посилюється поширеними супутніми захворюваннями, які з нею пов'язані, та впливом перевантаження решти кінцівки. Найчастіше повідомлялося про проблеми,

що призводять до зниження якості життя, такі як жар/пітливість у гільзі протеза (72%), виразки/подроздринення шкіри в області гільзи (62%), неможливість ходити лісом та полем (61%) та неможливість швидко ходити (59%). Майже половину пацієнтів турбує біль у кукси (51%), біль у фантомній кінцівці (48%), біль у спині (47%) та біль в іншій нозі (46%) [30]. Незалежно від використовуваного методу підгонки, гільза для будь-якого пацієнта з ампутацією повинна забезпечувати однакові загальні функціональні характеристики, включаючи комфортне навантаження, стабільність у фазі стійкої ходи, вузьку основу ходи та фазу розгойдування, максимально нормальну, що відповідає залишковій функції, доступній пацієнту з ампутацією. Ці характеристики забезпечують технічний формат для опису трансфеморальних гільз [31]. Тому у пацієнта з ампутацією інтенсивне та часто болісне звуження периферичних кровоносних судин і, таким чином, зменшення кровопостачання, призводить до надзвичайно тривалого часу відновлення, коли розширення кровоносних судин та реперфузія призводять до повторного зігрівання ураженої кінцівки [32]. Використання методу цифрової термографії дає можливість кількісно оцінювати умови дотримання правильної методології реабілітації.

Наприклад, у дослідженнях [33] тепловізійні зображення кукси ампутованого після десяти хвилин ходьби виявили надзвичайно низькі температури на дистальному кінці кукси (рисунок 3), а також нерівномірний розподіл тепла. Це можна пояснити тим, що кукса відчуває нерівномірний окружний або затискний тиск на проксимальну область, просто перебуваючи всередині гільзи, що є аномальною схемою тиску на кінцівку, яка може спричинити порушення кровотоку.

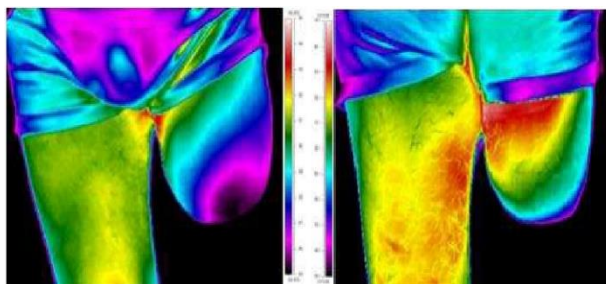


Рис. 3 – Тепловізійні зображення кукси ампутованого: після десяти хвилин ходьби (а), зона опори навантаження (б).

Низька температура на дистальному кінці кукси чітко демонструє відсутність контакту або тертя з протезом (рисунок 3, а). Можна очікувати, що люди з ампутованими нижніми кінцівками, через біомеханічні характеристики гільз протезів, можуть відчувати окружні або затискні сили, а також сили тертя, обертання та дистальні сили опори на куксу, що є дуже аномальними схемами для шкіри та тканин. Кінцевий тиск буде сумою стабілізуючого тиску, попередньо прикладеного до гільзи, що постійно створює вакуум всередині гільзи, та тиску, що створюється силами, пов'язаними з ходьбою, зокрема, на фазі стійки. Передньо-дистальний кінець кукси показує температуру від 20 °C до 25 °C, тоді як на дистальному проксимальному ділянці температура підвищується до 34 °C – 35 °C. Ці відмінності температури є чітким показником того, як загальний тиск розподіляється на куксу після 10-хвилинної ходьби, і можуть бути використані для оцінки можливої найкращої підходящої лунки та її типу.

Також необхідно зазначити, що зображення внутрішніх стінок лунки також демонструє той самий розподіл температури, що й відповідна кукса (рисунок 3, б). Вони збігаються з очікуваними точками тиску на межі кукси-лунки, оскільки задіяні ділянки для навантаження на лунку чотирикутного типу розташовані в проксимальній області кукси-лунки, а саме над медіальною, задньою та передньою частинами кукси-лунки. Отже,

важливим відкриттям цих досліджень є висока температура, зафіксована в опорних зонах навантаження, яка також спостерігається в протезі та, можливо, є показником ділянок, де стінки лунки щільніші та створюють додатковий тиск на куксу. Крім того, за результатами теплових вимірювань можна чітко визначити ділянки лунки, де контакт з тілом є більш інтенсивним, що практично призводить до підвищення температури, оскільки це зменшує тепловий опір. Таким чином, термографія видається дуже корисним інструментом, який допомагає точно налаштувати лунку на куксу, а також забезпечує кращий комфорт користування для ампутованого.

У дослідженнях [34] для вимірювання карт поверхневого розподілу тепла кукси також використовувалася тепловізор. Дослідниками була розроблена і протестована *in vitro* система для запису температури та відносної вологості щонайбільше у чотирьох анатомічних точках. Паралельне застосування інфрачервоної камери та портативних датчиків температури та вологості забезпечило додаткову інформацію.

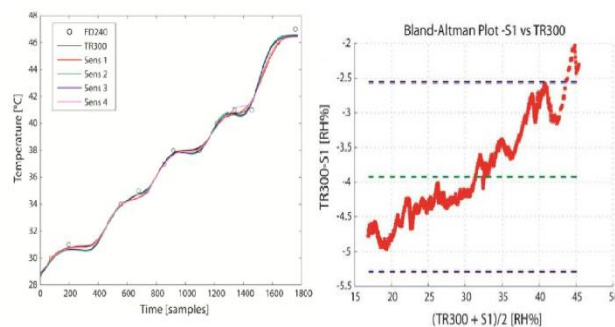


Рис. 4 – Застосування інфрачервоної камери та портативних датчиків вологості.

На куксі було визначено чотири основні області інтересу (нижня надколінок, латеральні/медіальні надвиростки, горбистість великогомілкової кістки) з хорошою повторюваністю даних вимірювання. Після ходьби спостерігалось середнє збільшення температури на 20% у

гарячих зонах порівняно з умовами спокою. Датчики всередині манжети в куксі реєстрували під час ходьби підвищення температури (у середньому $+1,1 \pm 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$) та підвищення значення вологості (у середньому $+4,1 \pm 2,3\%$) через виділення поту. Це дослідження дає можливість розпочати розробку набору довідкових даних для оптимальної конструкції гільзи та вкладки-кукси.

У подальших дослідженнях знадобився двоетапний процес збору даних [35]. Двовимірні теплові зображення усамітненої кінцівки реєструвалися після ходьби (рисунок 5) та у стані спокою (рисунок 6). З наведених термограм видно, що ходьба призвела до загального нагрівання всієї поверхні кінцівки.

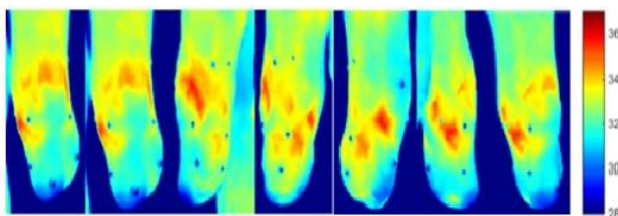


Рис. 5 – Теплові зображення, отримані одразу після ходьби (теплові маркери видно на поверхні кінцівки).

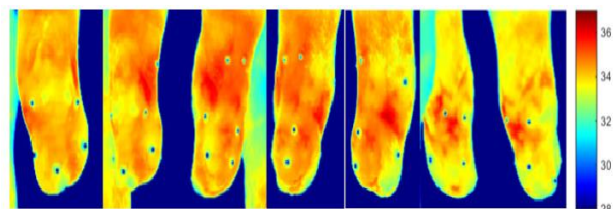


Рис. 6 – Теплові зображення, отримані після 15 хвилин відпочинку (теплові маркери видно на поверхні кінцівки).

Після 20 хвилин відпочинку температура шкіри на поверхні кінцівки загалом знизилася. Температура на поверхні шкіри дистальної частини кінцівки досягла найнижчих значень (близько $30 \text{ }^\circ\text{C}$). Отже, моніторинг температури шкіри культі може надати цінну інформацію щодо небажаних механічних напружень та зниженої васкуляризації, що може призвести до запалення, виразок на шкірі та виразок.

У дослідженнях [36] термограми було зібрано з оголеної залишкової кінцівки пацієнтів з транстібіальними ампутаціями як у передній, так і в задній фронтальній площинах, до та після природної ходьби з протезом. Початкові термограми відображали значення температури в діапазоні від $22 \text{ }^\circ\text{C}$ до $34 \text{ }^\circ\text{C}$. Для порівняння середніх значень температури було застосовано тест Вілкоксона, який дав можливість виявити статистично значущі відмінності в обох площинах після ходьби. Ці результати показують, що значні відмінності температур на поверхні кукси спостерігаються після ходьби, що свідчить про фізіологічні зміни, які можуть бути критично важливими для розуміння адаптації тканин та впливу використання протезів (рисунок 7).

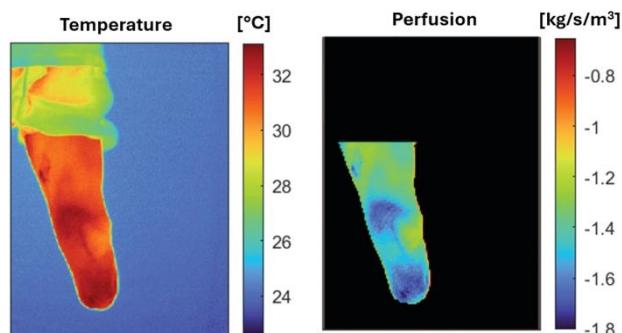


Рис. 7 – Ліворуч: оригінальна повернута термограма з температурним картуванням. Праворуч: остаточне сегментоване перфузійне картування.

Привертає увагу на рисунку 7, що на термограмах залишкової кінцівки відзначається кадрування залишкової довжини кінцівки та нелінійне перетворення температури в перфузію крові. Тому майбутні дослідження необхідно зосередити на підтвердженні клінічної ефективності ІЧТ в умовах реабілітації та включенні її до протоколів підбору протезів.

Отже, застосування медичних систем інфрачервоної термографії може бути додатковим методом оцінки рівня ампутації у пацієнтів з критичною ішемією нижніх кінцівок. Наприклад, пацієнти з оклюзійним захворюванням периферичних артерій мають більші поздовжні градієнти

температури порівняно з іншими групами пацієнтів з ампутованими кінцівками [37]. Зокрема, результат у 95% довірчого інтервалу свідчить про те, що різниця температур є достовірно більшою за 3 °C. У цьому контексті, ІЧТ має потенційну корисність для виявлення динаміки зниження температури у пацієнтів з обструктивним атеросклерозом нижніх кінцівок, особливо у тих, хто має інвазію нижніх кінцівок. З цієї точки зору, метод ІЧТ є корисним для вибору рівня ампутації у пацієнтів з обструктивним атеросклерозом нижніх кінцівок та інвазією нижніх кінцівок.

У загальному підсумку, інфрачервона термографія, у поєднанні з підходом до обробки даних, надає цінний інструмент для оцінювання стану решток кінцівок під час процесу адаптації до протезу. За допомогою тепловізійних зображень, які реєструються до та після ходьби клініцисти можуть об'єктивно контролювати зміни перфузії крові та виявляти точки тиску, проблеми з кровообігом та потенційні ризики пошкодження тканин. Цей фізіологічний зворотний зв'язок дає можливість після ампутації керувати підбором гільзи протеза, покращуючи комфорт користувача та зменшуючи ускладнення.

IV. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ІЧТ У ДОВГОСТРОКОВІЙ ПЕРСПЕКТИВІ

У протезуванні метод інфрачервоної термографії давно та успішно використовують у клінічній практиці для уточнення та вибору способу ампутації нижніх кінцівок при судинних захворюваннях [38, 39]. Оскільки відновні процеси в кістковій тканині перебігають повільно, особливо на фоні розладів місцевого кровопостачання, у віддалені терміни після первинної ампутації (2 та 3 роки) виявляються виражені дистрофічні та некротичні зміни з боку усіх тканин кукси [40]. У м'яких тканинах переважають процеси фіброзного та, у меншій мірі, жирового переродження. М'язові волокна,

що збереглися, мають вигляд невеликих фрагментів, які повністю втрачають свою структурно-функціональну організацію. Одним з найважливіших чинників, який відповідає за життєздатність, загоювання післяопераційної рани кукси є стан її кровопостачання [41, 42, 43]. Тому особливо важливим є вибір адекватного рівня ампутації та післяопераційної реабілітації. З цією метою використовуються різні методи контролю стану кровообігу: реовазографія, термографія [44], доплерографія [45], полярографія [46], артеріографія [47], радіоізотопне дослідження і біопсія м'яких тканин [48].

У більш віддалені строки після первинної ампутації (34,5 та 101 міс.) у багатьох пацієнтів відзначається облітеруючий атеросклероз судин нижніх кінцівок, у тканинах кукс спостерігаються виражені та поширені патологічні зміни [40]. Згідно сучасних даних провідна роль у формуванні больового синдрому, викликаного пошкодженням, ішемією і запаленням, належить аллогенним сполукам (гістамін, серотонін, простагландини, брадикінін, іони водню та калію), які активізують нейрони, що посиляють імпульси в центральну нервову систему. Ці імпульси сприймаються як біль. Тому з метою полегшення страждань хворих хірурги продовжують пошук універсального засобу, який би усував післяампутаційний біль. Саме метод ІЧТ дає можливість оцінити функціональний стан кровообігу в куксі [5, 6] та визначити межу адекватного кровопостачання тканин з ішемією і запаленням, яке ще більше обмежує кровообіг та викликаючи біль.

Клінічно доведено, що інфрачервона термографія є оптимальним методом для моніторингу та оцінки ефективності реабілітації [19, 20, 49]. Постійно ведеться пошук нових методів реабілітації пацієнтів з ампутаційними дефектами кінцівок у зв'язку із соціальною значимістю захворювання. Зокрема, остеопатична корекція має доведені ефекти нормалізації м'язового

тону, покращення кровообігу, які можна оцінити за допомогою інфрачервоної термографії. Наприклад, у дослідженнях [50] пацієнтам з ампутаціями нижніх кінцівок було проведено остеопатичну корекцію, яка полягає у усуненні соматичних дисфункцій, виявлених під час остеопатичної діагностики. Протягом сеансів остеопатичної корекції 45 хв. під час реабілітації пацієнтам з ампутаційними дефектами нижніх кінцівок на рівні гомілки було застосовано артикуляційні, нейродинамічні, м'язово-енергетичні та інгібіційні остеопатичні техніки (рисунк 8).

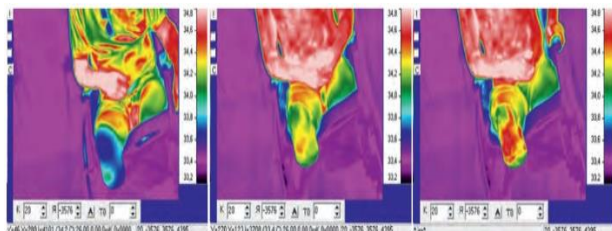


Рис. 8 – Термограми пацієнта: до остеопатичної корекції (а), після 1-го сеансу остеопатичної корекції (б), після 2-го сеансу остеопатичної корекції (в).

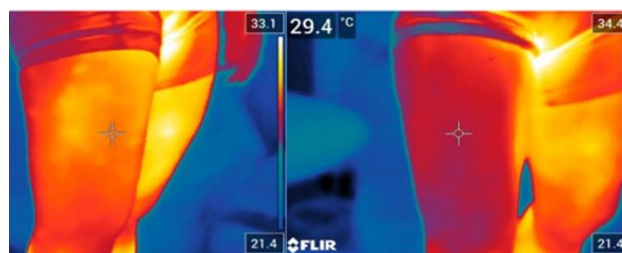
Представлене дослідження показало стійке збільшення температури у пацієнтів з ампутаційними дефектами нижніх кінцівок на рівні гомілки після проведення остеопатичної корекції. Температура дистального кінця правої кукси у пацієнта до 1-го сеансу остеопатичної корекції складала 33,6 °С, після 1-го сеансу вона збільшилася на 0,4 °С, перед 2-м сеансом температура була 33,9 °С і ще збільшилася після 2-го сеансу до 34,2 °С. Наведені результати свідчать про поліпшення кровообігу у зрізаній кінцівці, що дає можливість рекомендувати використання остеопатичної корекції в комплексній реабілітації пацієнтів з ампутаційними дефектами нижніх кінцівок. За допомогою методу ІЧТ можна об'єктивно досліджувати результати остеопатичної корекції, зокрема зміни мікроциркуляції в тканинах.

Крім того, надмірне потовиділення та тепло в усамітненій кінцівці є найважливішим фактором, який негативно

впливає на якість життя користувачів трансфеморальних протезів. Зокрема, тепле та вологе середовище та неоднорідний розподіл маси можуть погіршити кровообіг в усамітненій кінцівці [51]. Наведені фактори сприяють розвитку уражень шкіри, припиненню використання протезів та подальшим ампутаціям (рисунк 9).

Рис. 9 – Термограми передньої поверхні стегна у двох сценаріях: неоднорідна картина, що спостерігається у стані спокою (а), термоекспресія після навантаження та тиску (б).

Це пояснюється тим, що м'які тканини



залишкової кінцівки не призначені для того, щоб витримувати навантаження та тиск під час використання протеза, що може призвести до ураження шкіри [52]. Наприклад, сили та механічний вплив можуть призвести до кількох проблем зі шкірою та дискомфорту, які вражають близько 65% користувачів нижніх протезів [53]. Для покращення теплової та механічної характеристики в різних умовах, включаючи повсякденну діяльність та/або екстремальні погодні умови, у прийнятних гільзах використовують композитні матеріали для посилення ефекту дифузії тепла відповідно до механічних вимог.

Однак на практиці персоналізоване проектування композитних матеріалів є трудомістким процесом і вимагає врахування великої кількості деталей. Для правильного проектування також потрібні кваліфіковані фахівці. Крім того, потрібно враховувати індивідуальні потреби користувачів протезів, щоб покращити коефіцієнти використання.

У розвитку застосування методів ІЧТ у протезуванні термографія дає можливість достовірно підтвердити діагноз облітеруючого атеросклерозу артерій

нижніх кінцівок з мультифокальними ураженнями [54]. Зокрема, термографічні зображення на рисунку 10 достовірно демонструють оклюзію лівої поверхневої стегнової артерії, множинні стенози клубових, стегнових, підколінних і гомілкових артерій.

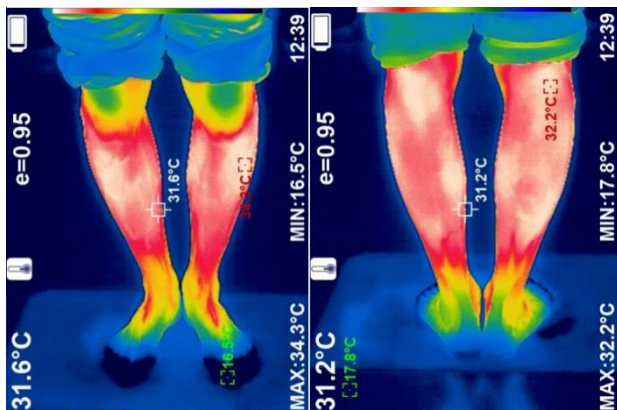


Рис. 10 – Термограма нижніх кінцівок під час первинного огляду.

За умов наявної ішемії (зниження кровотоку) у кінцівках відмічається симетричне зниження температури на обох стопах. Мінімальна температура в ділянці пальців 16,5 °С, максимальна 34,3 °С на гомілках. Отже, візуалізація теплового випромінювання дає важливу інформацію про стан периферичного кровообігу при облітеруючих захворюваннях артерій нижніх кінцівок до і після лікування.

V. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Оскільки ампутація кінцівок призводить до негативних наслідків – соціальних, психологічних та медичних, реабілітація пацієнтів з ампутаційними дефектами нижніх кінцівок має високу соціальну значимість. Основними медичними наслідками ампутацій є фантомно-больовий синдром, дегенеративні зміни м'яких тканин, підвищення тону м'язів кукси, погіршення кровообігу в ампутованій кінцівці.

Інфрачервона термографія може бути цінним методом у дослідженні результатів під час хірургічної операції та у період реабілітації пацієнтів з ампутаційними дефектами кінцівок. Метод ІЧТ реєструє лише власне теплове випромінювання

об'єктів в інфрачервоному діапазоні, тому він абсолютно безпечний як для пацієнтів, так і для лікаря. Може без обмежень використовуватися як для діагностичних так і для профілактичних обстежень. Перевагами застосування ІЧТ у протезуванні та реабілітації є: неінвазивність (немає контакту з раною), візуалізація кровотоку в куксі, раннє виявлення ускладнень.

Отже, узагальнюючи результати досліджень в галузі використання термографії для оцінки стану кровообігу та запалення в куксі, можна зробити висновок про те, що використання термографії в клінічній практиці та реабілітації в даний час носить прогресуючий характер. Методика безпечна і неінвазивна як для обстежуваного, так і для дослідника. Метод ІЧТ дає змогу діагностувати патологічні зміни під час вибору рівня ампутації, під час реабілітації та профілактики ускладнень, дає можливість проводити моніторинг лікування (як хірургічного, так і консервативного), повторювати дослідження в динаміці, дає додаткову діагностичну інформацію. Крім того, термографічні системи не відносяться до дорогого обладнання, що сьогодні особливо важливе для вирішення соціально-оздоровчих проблем пацієнтів, які перенесли ампутацію.

ВИСНОВОК

Метод ІЧТ продемонстрував значний потенціал у якості неінвазивного інструменту діагностики, моніторингу та оцінки стану кровообігу та запалення в куксі. Хоча його ефективність змінювалася в залежності від життєздатності тканин, що залишаються після ампутації, ІЧТ дає можливість виявляти ознаки запалення (гіпертермія) або, навпаки, недостатнього кровопостачання (гіпотермія) у ранньому періоді після операції під час загоєння кукси. Під час довгострокового моніторингу формування кукси ІЧТ дає можливість виявляти проблемні ділянки, що потребують додаткового догляду або втручання, і підготовки до протезування. Однак, необхідні подальші дослідження

для стандартизації протоколів і підтвердження її клінічної достовірності ІЧТ.

ORCID ID та внесок авторів:

1. 0000-0001-5816-134X(E)
Larisa Kalashnikova
2. 0000-0001-8836-4658 (D, E, F)
Shlykov Vladyslav
3. 0000-0002-8692-6677 (F) Alexei Lebedev

A – концепція роботи та дизайн; B – аналіз інформації; C – написання статті; D – критичний огляд; E – остаточне схвалення статті; F – коригування та оформлення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Torbjörnsson E, Fagerdahl AM, Blomgren L, Boström L, Ottosson C, Malmstedt J. Risk factors for reamputations in patients amputated after revascularization for critical limb-threatening ischemia. *J Vasc Surg.* 2021;73(1): 258-66. doi: 10.1016/j.jvs.2020.03.055.
2. Souza Y.P., Santos A.Co, Albuquerque L.C. Characterization of amputees at a large hospital in Recife, PE, Brazil. *J Vasc Bras.* 2019;18:e20190064. doi: 10.1590/1677-5449.190064.
3. Ghassemi P, Pfefer TJ, Casamento JP, Simpson R, Wang Q, Quanzeng W. Best practices for standardized performance testing of infrared thermograph sintended for fever screening. *PLoS One.* 2018;13(9):e0203302. doi: 10.1371/journal.pone.0203302.
4. Полуниин, С. В. Метод определения зон повреждения, выбора уровня ампутации и объема некрэктомии / С. В. Полуниин, В. Е. Милуков // *Инфекции в хирургии.* – 2008. № 6. – Приложение 1. – С. 54.
5. Bharara M., Cobb J.E., Claremont D.J. 4. Thermography and thermometry in the assessment of diabetic neuropathic foot: a case for furthering the role of thermal techniques. *Int J Low Extrem Wounds* 2006; 5: 4: 250 – 60.
6. Isogai N. Application of medical thermography to the diagnosis of Freys syndrome. *Head Neck* 1997; 19: 2: 143 – 147.
7. Зеновко Г.И. Термография в хирургии. М: Медицина 1988; 168.
8. Colles C.M. Chronic forearm pain. Thermography is a sensitive adjunct to diagnosis. *BMS* 1997; 314: 5: 1041 – 1042.
9. Никулин, М. А. Диагностические возможности тепловидения при заболеваниях сосудов нижних конечностей / М. А. Никулин, М. А. Савельев // *Вестник хирургии.* – 1987. – Т. 138. – № 6. – С. 43–46.
10. Розенфельд, Л. Г. Способы активной термографии в медицине: состояние вопроса и перспективы / Л. Г. Розенфельд, Н. Н. Колотнлов // *Медицинская радиология.* – 1987. – Т. 32. – № 5. – С. 81–85
11. Торопов, Ю. Д. Применение инфракрасной термографии в диагностике и лечении заболеваний сосудов конечностей / Ю. Д. Торопов, В. Г. КащенкоБоган, В. И. Давыдов // *Клиническая хирургия.* – 1989. – № 7. – С. 46–48.
12. Михайлов, М. С. Значение термографии в выборе уровня ампутации при критической ишемии нижних

- конечностей / М. С. Михайлов, Г. В. Яровенко // *Матер. юбилейн. конф. «Прогресс и проблемы в лечении заболевания сердца и сосудов».* – СПб., 1997. – С. 131.
13. McCollum P.T. Antipyrine clearance from the skin of the foot and the lower leg in critical ischaemia: Clinical implications // in Spence VA, Sheldon CD (eds): *Practical Aspects of Skin Blood Flow Measurement.* – London, Biologic Engineering Society, 1985.
14. McCollum P.T., Spence V.A., Walker W.F. Amputation for peripheral vascular disease: The case for level selection // *British Journal of Surgery.* – 1988. – Vol. 75. – Issue 12. – P. 1193–1195.
15. Holstein P. Level selection in leg amputation for arterial occlusive disease: a comparison of clinical evaluation and skin perfusion pressure // *ActaOrthop Scand.* – 1982. – Vol. 53. – N 5. – P. 821–831.
16. Абышов, Н. С. «Большие ампутации» у больных с окклюзионными заболеваниями артерий нижних конечностей / Н. С. Абышов, Э. Д. Закирджав // *Хирургия. Журнал им. Н. И. Пирогова.* – 2005. – № 12. – С. 59–65.
17. Spence V.A., Walker W.F., Troup I.M., Murdoch G. Amputation of the ischaemic limb: selection of the optimum site by thermography // *Angiology.* – 1981. – Vol. 32. – P. 155–169.
18. Потехина Ю.П., Голованова М. В. Причины изменения локальной температуры тела. *Мед. альманах.* 2010; 2 (11): 297–298. [Potehina Yu. P., Golovanova M. V. The reasons of the change of local body temperature. *Med. Almanac.* 2010; 2 (11): 297–298].
19. Белаш В.О. Возможности применения локальной термометрии для объективизации остеопатического воздействия у пациентов с дорсопатией на шейно-грудном уровне. *Российский остеопатический журнал.* 2018; 3–4: 25–32. [Belash V. O. The possibilities of using local thermometry to objectify the effect of osteopathic correction in patients with dorsopathy at the cervicothoracic level. *Russian Osteopathic Journal.* 2018; 3–4: 25–32]. <https://doi.org/10.32885/2220-0975-2018-3-4-25-32>
20. Тарасова А.В., Потехина Ю.П., Белаш В.О., Классен Д. Я. Применение инфракрасной термографии для объективизации соматических дисфункций и результатов остеопатической коррекции. *Мануал. тер.* 2019; 4 (76): 35–41. [Tarasova A. V., Potekhina Yu. P., Belash V. O., Klassen D. Ya. The application of infrared thermography for the objectifi -cation of somatic dysfunctions and osteopathic correction results. *Manual Ther. J.* 2019; 4 (76): 35–41].
21. ŽIVČÁK J., HUDÁK R., TKÁČOVÁ M. *Termovízna diagnostika, Technická univerzita v Košiciach,* 2010, ISBN 978-80-553-05333-2
22. MICHEL C.C., GILLOTT H. Microvascular mechanisms in sta-sis and ischaemia. In: Bader DL, editor. *Pressure sores clinical practice and scientific approach.* London: MacMillan Press; 1990. p. 153-63
23. IVANITSKY G.R., KHIZHNYAKA E.P. and Deeva A.A. *Bio-physical Basis of Medical Thermovision, Biophysics,* ISSN 0006-3509, 2012, Vol. 57, No. 1, pp. 106–114
24. 24. LEE H.M., COHEN M.J. *Rehabilitation Medicine and Thermography, USA, Morrisville,* 2008, ISBN 978-0-6151-8721-1
25. KRISTEN H., LUKESCHITSCH G., PLATTNER F., SIGMUND R, RESCH P: Thermography as a means for quantitative assess-ment of stump and phantom pains. *Prosthet. Orthot. Int,* 1984, 8, 76-81

26. CUTTI A.G., PEREGO P., FUSCA M.C., SACCHETTI R., ANDRE-ONI G.: Assessment of lower limb prosthesis through wear-able sensors and thermography, *Sensors*, ISSN 1424-8220, 2014
27. ALAJ M., PALENČÁR R., CHUDÝ V., TIMA J. Metrological Characteristics of the Tactile Sensor Array. *Zborník z konferencie Strojné inžinierstvo 2000*, Bratislava, 2000, pp. 3-28
28. Živčák J., Radovan Hudák, Viktória Rajčúková. Biomechanical and Thermographic Analysis in the Transtibial Prosthesis Socket-Stump Interface, *Acta Mechanica Slovaca* 19 (2): 18 - 26, 2015, pp. 18-26
29. Gauthier-Gagnon et al. Augmented feedback in the early training of standing balance of below-knee amputees. *Physiother Canada* 1986; 38, 137-142.
30. Hagberg K, Brånemark R. Consequences of non-vascular trans-femoral amputation: a survey of quality of life, prosthetic use and problems. *Prosthet Orthot Int.* 2001; 25(3), pp. 186-194.
31. Schuch C.M. Transfemoral Amputation: Prosthetic Management, Chapter 20B - Atlas of Limb Prosthetics: Surgical, Prosthetic, and Rehabilitation Principles 2005.
32. Claim Y. *You Claim: Vibration White Finger*. Chirchester, 2007.
33. Emilia Mendes, António Silva, Rui Correia, Cristina Crisóstomo, Filipe Vaz, Joaquim Gabriel Thermography as an Alternative Tool to Determine Pressure Distribution on the Stump of Transfemoral Amputees. From Book of Proceedings of the 12th European Congress of Thermology, Appendix 1 to Number 3 (July), Volume 22 (2012), pp. 99-104.
34. Andrea Giovanni Cutti, Paolo Perego, Marcello C. Fusca, Rinaldo Sacchetti and Giuseppe Andreoni. Assessment of Lower Limb Prosthesis through Wearable Sensors and Thermography. *Sensors* 2014, 14, pp. 5041-5055
35. Andrea Giovanni Cutti, Federico Morosato, Cosimo Gentile, Francesca Gariboldi, Giovanni Hamoui, Maria Grazia Santi, Gregorio Teti and Emanuele Gruppioni. A Workflow for Studying the Stump-socket Interface in Persons with Transtibial Amputation through 3D Thermographic Mapping. *Sensors* No 23 (5035), 2023, 15 P.
36. Natali Olaya-Mira, Luz Marina Gómez-Hernández & Carolina Viloria-Barragán. Thermogram processing of transtibial amputees for applications in the field of prosthetics. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2025, 11 P. DOI: 10.1080/17686733.2025.2501366
37. Leonardo Martins Mota de Moraes, Cláudio Olavo Cordova, Esdras Marques Lins, Ana Paula de Lima Ferreira, Vittoria Melo Lettieri, Fernanda Appolonio Rocha, Emanuelle Tenório A. Godoi Berenguer de Barros Silva. Use of infrared thermography in patients undergoing primary amputation due to peripheral arterial obstructive disease. *Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgiões*, No 51:2024(3733), DOI: 10.1590/0100-6991e-20243733-en
38. Voloshin V. N., Mukhin A. S. Choice of level and way of ablation of lower limbs at patients with critical ischemia. *J. Siberian Med. Sci.* 2014; (4): 14.
39. Ring F., Jung A., Zuber J. New opportunities for infrared thermography in medicine. *Acta Bio-Optica Inform. Med.* 2009; 15 (1): 28–30.
40. Безсмертний Ю.О., Шевчук В.І. Місцевий больовий синдром ампутаційних кук нижніх кінцівок, Монографія. – Вінниця: ФОП Рогальська І.О. 2014. – 192 с.
41. Верещагин Ф.Ф., Берко В.Г., Берко В.В. Ампутації стегна у осіб похилого та старечого віку // Ортопедія, травматологія і протезування. – 2001. – № 4. – С. 15-17.
42. Герасимчук П.О. Можливості запобігання високої ампутації при нейропатично-інфікованій формі синдрому стопи діабетика // Шпитальна хірургія. – 2002. – № 2. – С. 38–40.
43. Melillo E., Nuti M., Bongiorno L., Golgini E., Balbarini A. Major and minor amputation rates and lower critical limb ischemia: the epidemiological data of western Tuscany // *Ital. Heart. J. Suppl.* – 2004. – Vol. 5, № 10. – P. 794–805.
44. Венгер Є.Ф. Застосування термографії в Україні / Є.Ф. Венгер, В.І. Гордієнко, В.І. Дунаєвський, В.Й. Котовський, В.П. Маслов // *Наука та інновації*. - 2015. - Т. 11, № 6. - С. 5-15.
45. Pinzur M.S. Amputations and prosthetics // *Chir. Narzadow. Ruchu Ortop. Pol.* – 1999. – Vol. 64, № 5. – P. 571–81.
46. Wutschert R., Bounameaux H. Determination of amputation level in ischemic limbs. Reappraisal of the measurement of TcPo₂ // *Diabetes Care.* – 1997. – Vol. 20, № 8. – P. 1315–8.
47. Безсмертний Ю.О. Ампутація та реампутація нижніх кінцівок при цукровому діабеті. Вінниця: Український державний науково-дослідний інститут реабілітації інвалідів, 2004. – 27 С.
48. Ковальський О.В., Мечев Д.С., Данилевич В.П. Радіологія. Променева терапія. Променева діагностика: підручник для студентів вищ. мед. навч. заклад. – Вінниця: Нова книга, 2013. 512 с.
49. Kanai S., Taniguchi N., Susuki R. Evaluation of Osteoarthropathy of Knee Monitored with Thermography. *Orthoped. Traumatol.* 1999; 48 (1): 348–350. <https://doi.org/10.5035/nishiseisai.48.348>
50. Смирнова Л.М. Инфракрасная термография в исследовании результатов остеопатической коррекции у пациентов с ампутационными, *Russian Osteopathic Journal* 2022; 4, pp. 70–82
51. Rodríguez-Morales Á.L. Designing a personalized thermo-mechanically optimized liner for transfemoral prosthetics, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2024. DOI: 10.1007/s10973-024-13448
52. Cagle J.C., Reinhall P.G., Hafner B.J., et al. Development of standardized material testing protocols for prosthetic liners. *J Biomech Eng.* 2017; 139(4):0450011–112
53. Meulenbelt H.E., Geertzen J.H., Jonkman M.F., et al. Determinants of skin problems of the stump in lower-limb amputees. *Arch Phys Med Rehabil.* 2009; 90(1):74–81.
54. Криса Б.В., Криса В.М. Дистанційна термографія при облітеруючих захворюваннях артерій нижніх кінцівок. Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference «Diversity and Inclusion in Scientific Area», Warsaw, Poland, 2024, с. 348-356.

UDC 616-78

USE OF THERMOGRAPHY FOR ASSESSING CIRCULATION AND INFLAMMATION IN THE RESIDUAL LIMB: CURRENT STATE, DIAGNOSTIC CAPABILITIES, AND PROSPECTS (LITERATURE REVIEW)

Vladyslav Shlykov

v.shlykov@kpi.ua

Larysa Kalashnikova

doc_hom2000@yahoo.com

Oleksiy Lebedev

biowelding@gmail.com

Department of Biomedical Engineering
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
Kyiv, Ukraine

Abstract – This paper examines the potential use of high-resolution infrared thermography systems in prosthetics to assess circulation and inflammation in the residual limb. Thermography (TG) is a non-invasive method of visualizing infrared radiation that makes it possible to evaluate changes in the body's surface temperature. In other words, TG is a graphical recording of an object's thermal emission. It serves as an auxiliary diagnostic method and should be interpreted together with clinical, laboratory, and medical history data. The main advantages of the method include complete safety, speed, high accuracy, suitability for pregnant women and children, and comprehensive visualization.

This systematic review aims to assess the clinical application of infrared thermography (IRT) in prosthetics, with particular attention to its potential as a non-invasive, cost-effective, and informative tool for diagnosis, monitoring, and treatment, contributing to improved patient outcomes. Inflammation in the residual limb is characterized by impaired circulation, accompanied by local tissue temperature changes and microcirculatory disturbances. Thermography, as a highly sensitive method of infrared radiation detection, can identify minimal temperature fluctuations (down to 0.1 °C), making it a valuable tool for analyzing inflammatory processes. Unlike radiological techniques or MRI, thermography does not involve radiation exposure, requires no physical contact, and allows simultaneous assessment of large body areas. For example, in rheumatology this method is used to detect inflammatory processes in joints and soft tissues, analyze microcirculation, and monitor the effectiveness of treatment in various diseases. This review summarizes current data on the use of thermography in prosthetics as well as in systemic connective tissue disorders, and discusses the advantages and limitations of the method.

The purpose of this review is to analyze the current state of thermography applications in prosthetics during and after amputation, helping surgeons determine the optimal amputation level, assess tissue viability, and subsequently monitor healing and preparation for prosthetic fitting. The article examines the potential of infrared thermography to detect areas with impaired blood flow or infection, and systemic connective tissue diseases based on skin temperature changes.

Conclusion: IRT has demonstrated significant potential as a non-invasive tool for diagnosing, monitoring, and assessing circulation and inflammation in the residual limb. Although its effectiveness varies depending on the viability of tissues remaining after amputation, IRT enables early detection of signs of inflammation (hyperthermia) or insufficient blood supply (hypothermia) during the postoperative healing period. During long-term monitoring of residual limb formation, IRT helps identify problematic areas requiring additional care or intervention and aids in preparation for prosthetic fitting. However, further research is needed to standardize protocols and confirm the clinical reliability of IRT.

Keywords: infrared thermography, hypothermia, stump, amputation, blood circulation, osteopathic correction