

Міністерство охорони здоров'я України
ДНП «Львівський національний медичний університет
імені Данила Галицького»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ФАРМАГА ТАРАС ІГОРОВИЧ

УДК: 616-001.17:355-079.4-004.8-089-037

ДИСЕРТАЦІЯ
ОПТИМІЗАЦІЯ ДІАГНОСТИКИ ТА ЛІКУВАННЯ РАН ОПШКОВОГО
ГЕНЕЗУ
СПЕЦІАЛЬНІСТЬ – 222. МЕДИЦИНА
ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ – 22. ОХОРОНА ЗДОРОВ'Я

Подається на здобуття ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Т.І. Фармага
підпис Ініціали та прізвище дисертанта

Науковий керівник: Лукавецький Олексій Васильович, доктор медичних наук,
професор
Чемерис Орест Мирославович, доктор медичних наук,
професор

Львів – 2025

АНОТАЦІЯ

Фармага Т. І. Оптимізація діагностики та лікування ран опікового генезу.
– Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 222. Медицина. – ДНП «Львівський Національний Медичний Університет імені Данила Галицького» МОЗ України, Львів, 2025.

Дисертаційна робота присвячена удосконаленню діагностики та підвищенню ефективності лікування хворих з ранами опікового генезу шляхом інтеграції цифрової планіметрії та термографії з використанням штучного інтелекту.

Опікова травма є однією з найпоширеніших і одночасно найскладніших форм травмування, що потребує висококваліфікованого підходу у діагностиці та лікуванні. Вона супроводжується не лише інтенсивним болем і високим ризиком ускладнень, але й значним соціально-економічним навантаженням через тривале перебування пацієнтів у стаціонарі та потребу у довготривалій реабілітації. Статистично найбільш схильними до опікових травм є молоді працездатні особи, проте опіки можуть виникати у будь-якій віковій групі та не залежать від статі. Особливо актуальним є лікування опікових ран у контексті бойових травм, де вони часто поєднуються з іншими тяжкими ушкодженнями.

Лікування таких пацієнтів залишається надзвичайно складним завданням через множинність ускладнень, тривалу госпіталізацію, необхідність проведення комплексного посттравматичного догляду, корекції рубцевих деформацій та підтримки психологічного стану пацієнтів. Ключовим аспектом успішного лікування вже на самому початку є диференціація некротизованих тканин від життєздатних, що визначає подальшу стратегію лікування та безпосередньо впливає на результати реконвалесценції. Площа та глибина опіку – це ті чинники, що визначають вибір хірургічної тактики, прогноз термінів загоєння та обсяг реконструктивних втручань.

У рандомізований спосіб у дослідження залучено 151 хворий з ранами опікового генезу, що отримували медичну допомогу в опіковому відділенні для дорослих Міського центру термічної травми та пластичної хірургії відокремленого підрозділу «Лікарня Святого Луки» Комунального некомерційного підприємства «Львівське територіальне медичне об'єднання «Багатопрофільна клінічна лікарня інтенсивних методів лікування та швидкої медичної допомоги». Серед обстежених пацієнтів переважали чоловіки (59,4 %) працездатного (42,4 % середнього та 35,1 % зрілого) віку, що отримали травму переважно внаслідок контакту з полум'ям (47,0 %). Площа ураження у третини обстежених перевищувала 20,0 % загальної площі тіла (39,7 %) з переважною локалізацією ран на функціональних та видимих ділянках шкіри – на кистях та/або передпліччях (27,6 %) і гомілкях та/або стопах (22,7 %).

Усіх хворих було обстежено відповідно до актуальних клінічних протоколів та Стандарту медичної допомоги «Опіки» (Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 09.10.2023 № 1767). Додатково, під час оцінки локального статусу було зроблено традиційне фото рани, а також додатково термофотографію за допомогою безконтактного термометра FLIR One, які в подальшому аналізувалися.

Розроблено програмне забезпечення «Аналізатор ран» для цифрової планіметричної вольнерометрії, що забезпечує об'єктивну та відтворювану оцінку площі уражень шкіри. Програма проста у використанні, сумісна з комп'ютерами лікувальних закладів та не потребує спеціальної підготовки медперсоналу. Програмне забезпечення реалізує повний цикл оцінки: отримання цифрового зображення рани, його обробку алгоритмами та збереження результатів у базі даних. Підтримується синхронізація через хмару, автоматичне обчислення площі ушкодження та масштабування даних у реальні одиниці, що усуває суб'єктивність оцінки. Інтерактивне нанесення контурів на багатошаровому зображенні дозволяє поєднати клінічну оцінку з комп'ютерним аналізом. Додаткові функції – це централізована база даних та

авторизація користувачів – роблять «Аналізатор ран» діагностичним та інформаційно-аналітичним інструментом сучасної медицини.

Апробація програми «Аналізатор ран» проведена на 23 пацієнтах із різними видами ран: глибокими та поверхневими опіками (16), післятравматичними (5) і кусаними (2). Визначали площу, периметр, довжину, ширину та радіус ураження. Порівняння цифрових даних із клінічними спостереженнями показало високу точність: ширина – $98,96 \pm 1,28\%$, довжина – $99,43 \pm 0,79\%$, радіус – $99,61 \pm 0,65\%$, периметр – $98,96 \pm 1,19\%$, площа – $99,52 \pm 0,67\%$.

Результати демонструють, що цифрова планіметрична вульнерометрія може ефективно замінити традиційну візуальну оцінку ран, мінімізуючи похибки людського фактора. Збереження даних у базі дозволяє моніторинг динаміки загоєння та побудову індивідуальних прогнозів для оптимальної терапії.

Методика концептуально подібна до існуючих підходів кількісної оцінки ран, проте відрізняється вищою інтеграцією та універсальністю. На відміну від фотографування із площинним еталоном, використання аналогових камер або мобільних застосунків, запропонована технологія має хмарну архітектуру, сумісна з будь-яким пристроєм, включно зі смартфоном, що значно підвищує її практичну ефективність у клінічних умовах.

Водночас для комплексного аналізу опіку постала необхідність оцінки і глибини рани, тому було проведено аналіз сучасних методик для оцінки глибини опікової рани та виявлено, що термографія є найбільш чутливою та водночас простою і доступною методикою, яка дозволяє виявити температурні відмінності між некротизованими та життєздатними тканинами. Інфрачервоне випромінювання безконтактно відображає стан мікроциркуляції та клітинного метаболізму, що дозволяє швидко оцінювати великі ділянки опіку в реальному часі.

Дослідження з портативним пристроєм FLIR One показало кореляцію температурних різниць із глибиною опіку і визначив конкретні значення

температури для поверхневого та глибокого опіку: температура здорової шкіри становила $34,7^{\circ}\text{C}$ ($34,4\text{--}35,1^{\circ}\text{C}$), поверхневого опіку – $35,8^{\circ}\text{C}$ ($35,5\text{--}36,2^{\circ}\text{C}$), глибокого опіку – $32,4^{\circ}\text{C}$ ($32,0\text{--}32,8^{\circ}\text{C}$), різниця температур між здоровою шкірою та поверхневим опіком склала $1,1^{\circ}\text{C}$ ($0,7\text{--}1,5^{\circ}\text{C}$), між здоровою шкірою та глибоким опіком – $2,3^{\circ}\text{C}$ ($2,2\text{--}2,4^{\circ}\text{C}$), а між поверхневим і глибоким опіками – $3,4^{\circ}\text{C}$ ($3,0\text{--}3,8^{\circ}\text{C}$).

Комбінація цифрової планіметричної вульнерометрії та термографії забезпечує об'єктивне визначення площі та глибини ураження, підвищує точність діагностики, оптимізує вибір лікувальної тактики. Методика має значний потенціал для впровадження у практичну охорону здоров'я, включно з військовою медициною, де швидкість і точність діагностики критично важливі.

На наступному етапі дослідження проведено об'єктивізацію клінічних ознак глибини опікових ран через їх зіставлення з термографічними даними. ROC-аналіз показав, що температурні параметри мають найвищу діагностичну інформативність ($\text{AUC} = 0,94\text{--}0,99$), тоді як серед клінічних маркерів найбільш прогностично значущим був капілярний рефіл ($\text{AUC} = 0,81$), а колір рани і характер пухирів мали меншу чутливість, але залишаються корисними додатковими критеріями.

На основі отриманих даних розроблено комплексну модель оцінки глибини опікових уражень, що поєднує клінічні ознаки, цифрову планіметрію та термографію з алгоритмами машинного навчання. Random Forest показав найвищу стабільність та точність ($\text{Accuracy} \approx 96,8\%$, $\text{F1-score} = 0,97$) і дозволив автоматично визначати належності опіку до поверхневого або глибокого класу, а також оцінювати важливість окремих ознак (мінімальна та максимальна температура, час капілярного рефілу).

Є можливість інтеграції моделі у програму «Аналізатор ран», що дасть можливість автоматизовано аналізувати термографічні дані: програма зможе розпізнавати мінімальні та максимальні температурні ділянки, прогнозувати ступінь опіку та візуалізувати межі поверхневих і глибоких зон. Система забезпечить стандартизовану, об'єктивну та швидку оцінку, мінімізувати

суб'єктивність лікаря та підвищувати точність діагностики, що особливо цінно для медицини катастроф і військової хірургії. Запропонований підхід є новаторським для України і відкриває можливості широкого впровадження штучного інтелекту та цифрових технологій у практику опікової медицини.

У межах дослідження обґрунтовано використання тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластиком, доповненого цифровою планіметрією та термографією для об'єктивної оцінки площі та глибини опікового ураження. Програма «Аналізатор ран» дозволяла точно визначати межі некротичних ділянок, а термографія (FLIR One) підвищувала точність оцінки життєздатності тканин, мінімізуючи ризик залишкового некрозу та надлишкової резекції.

Клінічні результати підтвердили ефективність методики у 52 пацієнтів. Дослідна група демонструвала суттєві покращення порівняно з контрольною: тривалість госпіталізації скоротилась майже вдвічі ($12,2 \pm 4,4$ проти $20,8 \pm 4,1$ діб, $p < 0,05$), кількість оперативних втручань і загальних знеболювань зменшилася, а число перев'язок на одну рану скоротилось з $11,5 \pm 2,3$ до $4,0 \pm 1,3$ ($p < 0,05$).

Тривалість епітелізації ран у дослідній групі становила $15,5 \pm 3,9$ діб проти $28,3 \pm 5,4$ діб у контрольній. Частота інфекційних ускладнень знизилась удвічі ($16,4\%$ проти $31,0\%$), а лізису трансплантатів – з $53,4\%$ до $25,4\%$ ($p < 0,05$). Через 3–6 місяців потреба у вторинних реконструктивних втручаннях становила лише $10,8\%$ у дослідній групі проти $37,5\%$ у контрольній.

Поєднане застосування термографії та цифрової планіметрії дозволяє мінімізувати видалення здорових тканин, покращити функціональний і косметичний результат, зменшити післяопераційні ускладнення, скоротити перебування у стаціонарі та знизити потребу у повторних операціях. Результати дослідження підтверджують практичну ефективність підходу та створюють основу для удосконалення стандартів комбустіологічної допомоги.

Ключові слова: опіки, опікові рани, площа поверхні опіку, глибина ураження, термометрія, діагностика, лікування, тангенціальне висічення, некретомія, дебрідмент, біль, рана, аутодерматопластика, мазки з опікових

ран, пластика дефектів м'яких тканин, дефект м'яких тканин, оперативні втручання, бойова травма, травма, штучний інтелект, прогнозування результатів лікування.

ABSTRACT

Farmaha T. I. Optimisation of diagnosis and treatment of burn wounds. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 222. Medicine. – DNP "Danylo Halytsky Lviv National Medical University" Ministry of Health of Ukraine, Lviv, 2025.

The dissertation is devoted to improving the diagnosis and increasing the effectiveness of treatment of patients with burn wounds by integrating digital planimetry and thermography using artificial intelligence.

Burn injury is one of the most common and at the same time most complex forms of injury, requiring a highly skilled approach to diagnosis and treatment. It is accompanied not only by intense pain and a high risk of complications, but also by a significant socio-economic burden due to the long hospitalisation of patients and the need for long-term rehabilitation. Statistically, young working-age people are most prone to burn injuries, but burns can occur in any age group and do not depend on gender. The treatment of burn wounds is particularly relevant in the context of combat injuries, where they are often combined with other serious injuries.

The treatment of such patients remains an extremely difficult task due to multiple complications, prolonged hospitalisation, the need for comprehensive post-traumatic care, correction of scar deformities and support for the psychological state of patients. A key aspect of successful treatment from the very beginning is the differentiation of necrotic tissue from viable tissue, which determines the further treatment strategy and directly affects the results of convalescence. The area and

depth of the burn are the factors that determine the choice of surgical tactics, the prognosis for healing time, and the extent of reconstructive interventions.

The study randomly enrolled 151 patients with burn wounds who received medical care at the burn unit for adults at the City Centre for Thermal Trauma and Plastic Surgery, a separate division of St. Luke's Hospital Municipal non-profit enterprise "Lviv Territorial Medical Association "Multidisciplinary Clinical Hospital of Intensive Care and Emergency Medical Care" . Among the patients examined, men (59.4%) of working age (42.4% middle-aged and 35.1% mature) predominated, who had suffered injuries mainly as a result of contact with flames (47.0%). The area of damage in one third of the examined patients exceeded 20.0% of the total body surface area (39.7%), with wounds predominantly located on functional and visible areas of the skin – on the hands and/or forearms (27.6%) and lower legs and/or feet (22.7%).

All patients were examined in accordance with current clinical protocols and the Medical Care Standard "Burns" (Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 1767 of 09.10.2023). In addition, during the assessment of the local status, a traditional photo of the wound was taken, as well as additional thermography using a FLIR One non-contact thermometer, which were subsequently analysed.

The "Wound Analyser" software has been developed for digital planimetric vulnometry, which provides an objective and reproducible assessment of the area of skin damage. The programme is easy to use, compatible with the computers of medical institutions and does not require special training of medical staff. The software implements a complete assessment cycle: obtaining a digital image of the wound, processing it with algorithms, and saving the results in a database. It supports cloud synchronisation, automatic calculation of the area of damage, and scaling of data to real units, which eliminates subjectivity in assessment. Interactive contouring on a multi-layered image allows clinical assessment to be combined with computer analysis. Additional features, such as a centralised database and user authorisation, make the Wound Analyser a diagnostic and information-analytical tool for modern medicine.

The Wound Analyser programme was tested on 23 patients with different types of wounds: deep and superficial burns (16), post-traumatic (5) and bite wounds (2). The area, perimeter, length, width and radius of the lesion were determined. A comparison of digital data with clinical observations showed high accuracy: width – $98.96 \pm 1.28\%$, length – $99.43 \pm 0.79\%$, radius – $99.61 \pm 0.65\%$, perimeter – $98.96 \pm 1.19\%$, area – $99.52 \pm 0.67\%$.

The results demonstrate that digital planimetric vulnometry can effectively replace traditional visual wound assessment, minimising human error. Storing data in a database allows monitoring of healing dynamics and the creation of individualised prognoses for optimal therapy.

The technique is conceptually similar to existing approaches to quantitative wound assessment, but differs in its higher integration and versatility. Unlike photography with a flat reference, the use of analogue cameras or mobile applications, the proposed technology has a cloud architecture that is compatible with any device, including smartphones, which significantly increases its practical effectiveness in clinical settings.

At the same time, for a comprehensive analysis of burns, it became necessary to assess the depth of the wound, so an analysis of modern methods for assessing the depth of burn wounds was carried out and it was found that thermography is the most sensitive and at the same time simple and accessible method that allows detecting temperature differences between necrotic and viable tissues. Infrared radiation non-contact reflects the state of microcirculation and cellular metabolism, allowing rapid assessment of large burn areas in real time.

Research using the FLIR One portable device showed a correlation between temperature differences and burn depth and determined specific temperature values for superficial and deep burns: the temperature of healthy skin was 34.7°C (34.4 – 35.1°C), superficial burns – 35.8°C (35.5 – 36.2°C), deep burns – 32.4°C (32.0 – 32.8°C), the temperature difference between healthy skin and superficial burns was 1.1°C (0.7 – 1.5°C), between healthy skin and deep burns – 2.3°C (2.2 – 2.4°C), and between superficial and deep burns – 3.4°C (3.0 – 3.8°C).

The combination of digital planimetric vulnometry and thermography provides an objective determination of the area and depth of the lesion, increases the accuracy of diagnosis, and optimises the choice of treatment tactics. The technique has significant potential for implementation in practical healthcare, including military medicine, where speed and accuracy of diagnosis are critically important.

In the next stage of the study, the clinical signs of burn wound depth were objectified by comparing them with thermographic data. ROC analysis showed that temperature parameters have the highest diagnostic informativeness (AUC = 0.94–0.99), while among clinical markers, capillary refill was the most prognostically significant (AUC = 0.81), and wound colour and blister characteristics had lower sensitivity but remain useful additional criteria.

Based on the obtained data, a comprehensive model for assessing burn depth was developed, combining clinical indicators, digital planimetry, and thermography with machine-learning algorithms. Random Forest demonstrated the highest stability and accuracy (Accuracy \approx 96.8%, F1-score = 0.97), enabling automated classification of burns as superficial or deep, as well as evaluation of feature importance (minimum and maximum temperature, capillary refill time).

There is an opportunity to integrate the model into the “Wound Analyzer” software, enabling automated processing of thermographic data. The program will be able to detect minimum and maximum temperature areas, predict burn depth, and visualize the boundaries of superficial and deep zones. The system will provide standardized, objective, and rapid assessment, minimizing clinician subjectivity and improving diagnostic accuracy — an advantage particularly valuable in disaster medicine and military surgery. The proposed approach is innovative for Ukraine and opens up opportunities for the widespread introduction of artificial intelligence and digital technologies into the practice of burn medicine.

The study substantiated the use of tangential excision with simultaneous autodermoplasty, supplemented by digital planimetry and thermography for objective assessment of the area and depth of burn damage. The Wound Analyser programme allowed for accurate determination of the boundaries of necrotic areas, while

thermography (FLIR One) increased the accuracy of tissue viability assessment, minimising the risk of residual necrosis and excessive resection.

Clinical results confirmed the effectiveness of the technique in 52 patients. The experimental group showed significant improvements compared to the control group: the length of hospitalisation was reduced by almost half (12.2 ± 4.4 vs. 20.8 ± 4.1 days, $p<0.05$), the number of surgical interventions and general anaesthesia decreased, and the number of dressings per wound decreased from 11.5 ± 2.3 to 4.0 ± 1.3 ($p<0.05$).

The duration of wound epithelialisation in the experimental group was 15.5 ± 3.9 days versus 28.3 ± 5.4 days in the control group. The frequency of infectious complications decreased by half (16.4% versus 31.0%), and graft lysis decreased from 53.4% to 25.4% ($p<0.05$). After 3–6 months, the need for secondary reconstructive interventions was only 10.8% in the experimental group compared to 37.5% in the control group.

The combined use of thermography and digital planimetry minimises the removal of healthy tissue, improves functional and cosmetic results, reduces postoperative complications, shortens hospital stays, and reduces the need for repeat operations. The results of the study confirm the practical effectiveness of the approach and provide a basis for improving standards of burn care.

Keywords: burns, burn wounds, burn surface area, depth of injury, thermometry, diagnosis, treatment, tangential excision, necrectomy, debridement, pain, wound, autodermoplasty, smears from burn wounds, plastic surgery of soft tissue defects, soft tissue defect, surgical interventions, combat trauma, trauma, artificial intelligence, prediction of treatment outcomes.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Лукавецький ОВ, Стояновський ІВ, **Фармага ТІ**. Комп'ютерна програма для вульнерометрії. Харківська хірургічна школа. 2017;1(82):145–147. URL: <https://surgical-school.com.ua/index.php/journal/issue/view/31/1-2017-pdf> (Особистий внесок: проведено обстеження хворих, проаналізовано та узагальнено результати та сформовано висновки, написано статтю, оформлено статтю до друку)
2. Farmaha I, **Farmaha T**, Banaś M, Savchyn V, Lukashchuk B. Wound image segmentation using clustering based algorithms. New Trends in Production Engineering. Warszawa: Sciendo; 2019. 2(1):570–578. (Особистий внесок: співавтор ідеї, проведено аналіз літератури, збір матеріалу, написання тез, оформлення тез до друку).
3. **Фармага ТІ**, Лукавецький ОВ, Чемерис М. Цифрова комп'ютерна планіметрія ранових дефектів різного генезу. Шпитальна хірургія. Журнал імені Л. Я. Ковальчука. 2022;3:42–45. <https://doi.org/10.11603/2414-4533.2022.3.13392> (Особистий внесок: проведено обстеження хворих, проаналізовано та узагальнено результати та сформовано висновки, написано статтю, оформлено статтю до друку)
4. **Фармага ТІ**, Лукавецький ОВ, Чемерис ОМ. Переваги тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластикомією для лікування опікових ран. Хірургія дитячого віку (Україна). 2023;2(79):23–27. <https://doi.org/10.15574/PS.2023.79.23> (Особистий внесок: проведено обстеження хворих, проаналізовано та узагальнено результати та сформовано висновки, написано статтю, оформлено статтю до друку).
5. **Фармага ТІ**, Лукавецький ОВ, Чемерис ОМ, Стояновський ІВ. Використання безконтактного термографа FLIR One для оцінювання глибини опікової рани. Хірургія дитячого віку (Україна). 2024;2(83):13–

18. <https://doi.org/10.15574/PS.2024.83.13> (Особистий внесок: проведено обстеження хворих, проаналізовано та узагальнено результати та сформовано висновки, написано статтю, оформлено статтю до друку).
6. **Фармага Т**, Лукавецький О, Чемерис О. Методи оцінювання розмірів та глибини опікової рани. Proceedings of the Shevchenko Scientific Society. Medical Sciences [Internet]. 2024;76(2):27. (Особистий внесок: співавтор ідеї, проведено аналіз літератури, збір матеріалу, написання статті, оформлення статті до друку).
7. **Фармага ТІ**, Лукавецький ОВ, Чемерис ОМ. Використання власної комп'ютерної програми для вульнерометрії та термографії у лікуванні опікових ран: опис власного клінічного випадку. Клінічна анатомія та оперативна хірургія. 2025;24(2):92–97. <https://doi.org/10.24061/1727-0847.24.2.2025.30> (Особистий внесок: проведено обстеження хворих, проаналізовано та узагальнено результати та сформовано висновки, написано статтю, оформлено статтю до друку).
8. Jaworski N, Farmaha I, **Farmaha Т**, Marikutsa U, Savchyn V. Implementation features of wounds visual comparison subsystem. In: XIV-th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH) [abstracts]. Lviv, 18–22 April 2018. p. 114–118. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2018.8365714> (Особистий внесок: співавтор ідеї, проведено аналіз літератури, збір матеріалу, написання статті, оформлення статті до друку).
9. **Фармага ТІ**, Лукавецький ОВ, Чемерис ОМ. Оцінка глибини опікових уражень за допомогою безконтактної термографії FLIR ONE. XX Конгрес Світової Федерації Українських Лікарських Товариств (СФУЛТ), 24–26 жовтня 2024 р. Українські медичні вісті. 2024;16(3–4 suppl):46–47. (Особистий внесок: спільно з науковими керівниками проведено обстеження хворих, клінічну частину, проаналізовано і узагальнено результати та сформовано висновки; статистичний аналіз, написання статті, оформлення статті до друку)

10. **Фармага Т. І.** Аналіз взаємозв'язків клінічними характеристиками та даних термографії з глибиною опікових ран // Матеріали 9-го Міжнародного наукового симпозиуму SMARTLION 2025 «Медична освіта та наукові дослідження в Україні під час війни» / за ред. проф. З. Масної ; Наукове товариство ім. Шевченка та ін. – Львів : ДНП «ЛНМУ імені Данила Галицького», 2025. – С. 72–74.

ЗМІСТ

ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ДІАГНОСТИКИ І ЛІКУВАННЯ ОПІКОВИХ РАН (огляд літератури).....	26
1.1. Сучасні методи діагностики шкірних дефектів, зокрема опікового генезу.....	26
1.2. Сучасні принципи лікування уражень шкіри опікового генезу.....	41
РОЗДІЛ 2. КЛІНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ХВОРИХ ТА МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	54
2.1. Загальна клінічна характеристика хворих	54
2.2. Методологічні принципи та методики дослідження.....	60
РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ ДІАГНОСТИКИ ОПІКОВИХ РАН.....	66
3.1. Цифрова комп'ютерна планіметрія ранових дефектів.....	66
3.2. Безконтактна термографія для оцінки глибини опікових ран із використанням пристрою FLIR ONE	87
РОЗДІЛ 4. КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ГЛИБИНИ ОПІКОВИХ РАН (ЦИФРОВА ПЛАНІМЕТРІЯ, ТЕРМОГРАФІЯ, КЛІНІЧНІ ПОКАЗНИКИ) ЯК ОСНОВА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ НЕКРОЗУ ТА ВИБОРУ ХІРУРГІЧНОЇ ТАКТИКИ.....	92
4.1. Аналіз взаємозв'язків клінічними характеристиками та даними термографії та глибини опікових ран.....	92
4.2. Розробка та апробація моделі штучного інтелекту оцінки глибини опікових ран за даними цифрової планіметрії, термографії та клінічних характеристик.....	111
РОЗДІЛ 5. ВПРОВАДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ МЕТОДИКИ ХІРУРГІЧНОГО ЛІКУВАННЯ ОПІКОВИХ РАН.....	118
АНАЛІЗ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	140
ВИСНОВКИ	155
ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ	157

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	158
Додатки	174

ВСТУП

Актуальність теми. Опікові ураження належать до найтяжчих видів травм із вираженими медичними, соціальними та економічними наслідками. Щороку у світі мільйони людей потребують лікування опіків, а сотні тисяч випадків завершуються летально [101]. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, опікова травма посідає четверте місце серед усіх видів травматизму після дорожньо-транспортних пригод, падінь і фізичного насильства [46]. Такі uszkodження є серйозною проблемою системи охорони здоров'я, оскільки вимагають тривалого лікування, спеціалізованої допомоги та, у багатьох випадках, реконструктивних оперативних втручань.

Опіки часто призводять до тривалих контрактур, деформацій і обмеження рухливості, що зумовлює втрату працездатності та необхідність тривалої реабілітації для відновлення функцій опорно-рухового апарату. Своєчасна й точна оцінка глибини та площі ураження, а також обґрунтований вибір лікувальної тактики є ключовими чинниками для запобігання ускладненням, збереження функціонування та профілактики інвалідизації [21].

Традиційні методи клінічної оцінки опіків, засновані переважно на візуальному огляді, мають значну частку суб'єктивності й обмежену точність. Ранні мікроструктурні зміни тканин не завжди можна визначити неозброєним оком, що призводить до помилок у діагностиці та виборі тактики лікування. Як надмірно раннє, так і запізнє хірургічне втручання підвищує ризик ускладнень, подовжує терміни госпіталізації та збільшує витрати на лікування. Водночас об'єктивна оцінка стану рани є критично важливою для прогнозування загоєння, визначення обсягу трансплантації шкіри та контролю ефективності терапії [27].

У зв'язку з цим зростає потреба у впровадженні об'єктивних, високоточних і неінвазивних методів діагностики, здатних оцінювати параметри опікових ран незалежно від людського фактора. Перспективними є

планіметричні та термографічні технології, що базуються на цифровій обробці зображень і аналізі теплового випромінювання тканин.

Планіметрія дозволяє точно визначати площу ураження та динаміку скорочення рани в процесі лікування, тоді як термографія — оцінювати стан мікроциркуляції й життєздатності тканин. Комплексне застосування цих методів сприяє ранньому й обґрунтованому прийняттю клінічних рішень, зменшує ризик ускладнень і покращує результати лікування.

В умовах воєнного часу тема набуває особливої актуальності, оскільки кількість постраждалих із комбінованими травмами, зокрема опіковими, істотно зростає. Ураження, отримані під час бойових дій, часто поєднуються з іншими пошкодженнями — вогнепальними ранами, переломами, ушкодженнями судин і нервів. Такі стани потребують мультидисциплінарного підходу та використання швидких, точних і стандартизованих методів оцінки стану тканин. Оптимізація діагностики у цьому контексті має не лише клінічне, а й стратегічне значення: вона дозволяє скоротити терміни лікування, раціонально використовувати ресурси та підвищити шанси на збереження життєздатних тканин.

Сучасна тенденція до цифровізації медицини підсилює актуальність створення електронних баз даних, що містять параметри ран, динаміку загоєння та результати лікування. Оцифровані результати планіметрії й термографії можуть бути інтегровані в такі бази для автоматизованого аналізу та формування доказової бази щодо ефективності різних методів терапії. Це сприятиме удосконаленню протоколів лікування, розвитку персоналізованого підходу та підвищенню якості медичної допомоги.

Отже, удосконалення методів діагностики та лікування ран верхніх і нижніх кінцівок опікового генезу є актуальним науково-практичним завданням сучасної хірургії. Його вирішення сприятиме підвищенню точності оцінки уражених тканин, оптимізації лікувальної тактики, скороченню тривалості госпіталізації, зниженню частоти ускладнень і поліпшенню якості життя пацієнтів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи затверджена Вченою радою Львівського національного медичного університету імені Данила Галицького (протокол № 2 від 24 жовтня 2022 р.) і уточнена Вченою радою Львівського національного медичного університету імені Данила Галицького (протокол № 6 від 12 березня 2025 р.). Дисертаційна робота є фрагментом науково-дослідної роботи кафедри хірургії № 1 ДНП «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького» «Дослідити ефективність застосування сучасних технологій в лікуванні пацієнтів із хірургічною патологією органів черевної порожнини, ендокринної системи та гнійно-септичними захворюваннями м'яких тканин та визначити критерії прогнозування ускладнень» (номер державної реєстрації 0120U002133), «Вдосконалення алгоритму діагностики та лікувальної тактики із застосуванням традиційних, малоінвазивних та реконструкційних втручань у пацієнтів із хірургічною патологією органів черевної порожнини, ендокринної системи, гнійно-септичними захворюваннями м'яких тканин та травмами, з метою попередження розвитку ускладнень та швидкого відновлення у післяопераційному періоді» (номер державної реєстрації 0125U000662), співвиконавцем яких є здобувач.

Мета і завдання дослідження. Покращити діагностику та підвищити ефективність лікування хворих з опіковими ранами шляхом інтеграції цифрової планіметрії та безконтактної термографії, розробки прогнозуючої моделі для обґрунтованого вибору хірургічної тактики та удосконалення методики хірургічного лікування.

Для досягнення мети нами поставлена низка **завдань**:

1. Розробити та валідувати комп'ютерну програму для цифрової планіметрії ранових дефектів та оцінити її точність шляхом порівняння з еталонними методами вимірювання та визначити можливість практичного застосування у клінічній хірургії.
2. Оцінити ефективність безконтактної термографії як неінвазивного інструменту диференціації поверхневих та глибоких опіків,

визначити температурні межі для різних ступенів ураження та проаналізувати діагностичну точність методу.

3. Дослідити взаємозв'язок між клінічними та термографічними показниками, визначити їх прогностичну цінність для об'єктивної оцінки глибини опікових ран.
4. Розробити та апробувати модель штучного інтелекту інтегрованої оцінки глибини опікових уражень на основі клінічних, термографічних даних для вибору оптимальної хірургічної тактики.
5. Впровадити удосконалену методику хірургічного лікування ран опікового генезу, доповнену цифровими технологіями оцінки глибини рани та термографічним контролем, і оцінити її ефективність

Об'єкт дослідження – опікові рани.

Предмет дослідження – комплексна оцінка стану опікових ран за клінічними, лабораторними та інструментальними показниками, зокрема цифровою планіметрією та безконтактною термографією, для оптимізації діагностики та вибору хірургічної тактики.

Методи дослідження: клінічні, лабораторні, інструментальні, математично-статистичні.

Наукова новизна отриманих результатів. Вперше розроблено та реалізовано комп'ютерну програму «Аналізатор рани», що забезпечує автоматизовану цифрову планіметрію ран на основі аналізу зображень із точністю, підтвердженою порівняльними вимірюваннями за методом R. W. Sessions (похибка не перевищує 1,5 %). На відміну від існуючих програмних рішень, створена система одночасно оцінює ширину, довжину, площу, периметр і радіус рани, зберігати та порівнювати динаміку загоєння, що робить її зручним і стандартизованим інструментом об'єктивного моніторингу у практичній хірургії.

Вперше вітчизняно доведено діагностичну ефективність безконтактною термографії для визначення глибини опікових уражень із чітким кількісним

розмежуванням між здоровою, поверхнево ураженою та глибоко некротизованою шкірою. Встановлені референтні температурні показники: для здорової шкіри – 34,7 °C (34,4–35,1 °C), для поверхневого опіку – 35,8 °C (35,5–36,2 °C), для глибокого – 32,4 °C (32,0–32,8 °C), що створює об'єктивну основу для термографічної стратифікації глибини ураження без необхідності інвазивного втручання.

Вперше проведено комплексну порівняльну оцінку клінічних і інструментальних предикторів глибини опікової рани з використанням ROC-аналізу, який продемонстрував високу прогностичну значущість температурних параметрів (Area Under the Curve (площа під кривою, AUC) = 0,94–0,99), помірну значущість капілярного рефілу (AUC = 0,81) та кольору рани (AUC = 0,70), а також нижчу – характеру пухирів (AUC = 0,63). Це дало змогу кількісно обґрунтувати вибір ключових діагностичних ознак для подальшого моделювання та стандартизації клінічної оцінки опіків.

Вперше створено та апробовано модель диференціації глибини опікової рани на основі моделей штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання, що інтегрує клінічні, термографічні та планіметричні дані. Модель, побудована на основі алгоритму Random Forest, продемонструвала високу точність (Accuracy \approx 96,8 %; F1-score = 0,97) та здатність автоматично визначати ступінь ураження з мінімальною участю лікаря. Найінформативнішими ознаками виявились термографічні параметри, що підтверджує їх ключову роль у прогнозуванні некрозу тканин. Для оцінки ефективності моделі застосовано показники AUC, розраховані за допомогою бібліотек Python, що забезпечило статистичну достовірність результатів і відтворюваність підходу.

Удосконалено методику хірургічного лікування опікових ран шляхом впровадження тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластиком під термографічним контролем. Запропонований підхід оптимізував визначення глибини висічення, мінімізував кількість повторних операцій, знизив частоту інфекційних та неінфекційних ускладнень і скоротив період загоєння ран більш ніж удвічі. Таким чином, доведено клінічну ефективність поєднання

термографії та цифрової планіметрії як об'єктивної системи підтримки хірургічних рішень.

Отримані результати створюють нову концепцію інтегрованої діагностики опікових уражень, яка поєднує аналітичні можливості штучного інтелекту з об'єктивними інструментальними методами (термографія, планіметрія) та формує науково обґрунтований підхід до персоналізованого вибору лікувальної тактики при опіках різного ступеня глибини.

Практична цінність отриманих результатів. Отримані результати мають вагомим прикладним значенням для вдосконалення діагностики, моніторингу та хірургічного лікування опікових уражень шкіри.

Розроблена комп'ютерна програма «Аналізатор рани» створює нові можливості для стандартизації процесу оцінки площі та динаміки загоєння ран у хірургічній практиці. Її впровадження дозволяє проводити точні, відтворювані та безконтактні вимірювання параметрів рани, автоматично зберігати результати у базі даних, що істотно підвищує об'єктивність клінічних спостережень, зменшує вплив людського фактора та забезпечує можливість цифрового моніторингу стану рани в динаміці. Це робить програму корисним інструментом для лікарів-хірургів, опікових центрів та реабілітаційних відділень.

Результати термографічних досліджень підтвердили доцільність застосування безконтактної термографії як методу для визначення глибини опікових уражень. Використання температурних характеристик тканин як діагностичного критерію дозволяє об'єктивно диференціювати поверхневі та глибокі опіки, скорочує час обстеження, а також мінімізує ймовірність діагностичних помилок. Методика може бути оперативно реалізована у відділеннях інтенсивної терапії, опікових та військово-польових шпиталях, де необхідна швидка оцінка ступеня пошкодження тканин.

На основі порівняльного аналізу клінічних та інструментальних показників сформовано оптимальний набір маркерів для стратифікації глибини опікової рани, який включає комбінацію клінічних (капілярний рефіл, колір

рани, характер пухирів) та інструментальних (температурні параметри) ознак. Такий підхід підвищує точність і достовірність діагностики, забезпечуючи доказову основу для прийняття хірургічного рішення та зменшуючи суб'єктивність клінічної оцінки.

Створена модель прогнозування глибини опікових уражень на основі штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання має значний потенціал для практичного використання як системи підтримки клінічних рішень. Вона інтегрує дані термографії, цифрової планіметрії та клінічних показників, забезпечуючи автоматичну диференціацію ступеня ураження з високою точністю (Accuracy \approx 96,8 %). Після включення моделі в програмне забезпечення «Аналізатор рани» дозволить лікарю швидко отримувати кількісну оцінку стану тканин, що особливо важливо у ситуаціях, коли доступ до досвідчених спеціалістів обмежений. Застосування штучного інтелекту сприятиме оптимізації хірургічної тактики та покращенню результатів лікування.

Запропонована й впроваджена методика тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластиком, доповнена термографічним контролем і цифровими технологіями оцінки глибини, має високу клінічну ефективність. Її використання дозволяє раціонально визначати межі некротизованих тканин, уникати надлишкового висічення, зменшувати кількість повторних операцій і частоту ускладнень, а також скорочувати терміни загоєння. Цей підхід може бути рекомендований для широкого застосування у клініках опікової хірургії як ефективна та стандартизована методика лікування.

Практична значущість роботи також полягає у створенні єдиного алгоритму комплексної оцінки стану опікової рани, який об'єднує клінічні, термографічні та цифрові методи. Рекомендовано включати результати планіметрії та термографії до електронної медичної документації пацієнтів, що сприятиме формуванню єдиної, уніфікованої інформаційної системи моніторингу ран, полегшить аналіз ефективності лікування, стандартизує

підходи до ведення пацієнтів і підвищить якість наукових досліджень у сфері опікової патології.

Отримані результати можуть бути використані в освітньому процесі при підготовці лікарів-хірургів, комбустіологів, пластичних хірургів, фахівців із медичної реабілітації, а також для створення протоколів і клінічних рекомендацій з об'єктивної оцінки глибини та прогнозу загоєння опікових ран.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у діагностично-лікувальний процес Міського центру термічної травми та пластичної хірургії відокремленого підрозділу «Лікарня Святого Луки» Комунального некомерційного підприємства «Львівське територіальне медичне об'єднання «Багатопрофільна клінічна лікарня інтенсивних методів лікування та швидкої медичної допомоги», відділення термічної травми та реконструктивної хірургії Комунального некомерційного підприємства Львівської обласної ради «Львівський обласний госпіталь ветеранів війн та репресованих ім. Ю. Липи», у педагогічний процес підготовки студентів медичного факультету ДНП «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького».

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно проаналізував сучасну літературу за темою дисертації, здійснив патентно-інформаційний пошук, обґрунтував актуальність теми дисертаційної роботи, визначив мету й сформулював завдання дослідження. Дисертант безпосередньо брав участь у клінічному обстеженні хворих та їх лікуванні, формував групи, самостійно провів статистичну обробку отриманих результатів, обґрунтував висновки, розробив практичні рекомендації, забезпечив їх впровадження у практику, підготував й опублікував у вигляді наукових статей результати досліджень, власноручно написав дисертацію. Запозичень ідей та розробок співавторів публікацій не було.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи оприлюднені на форумах: 2018 XIV-th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), м. Львів, Україна; XX Конгрес Світової Федерації Українських Лікарських Товариств

(СФУЛТ); 9-ий симпозиум SMART LION 2025: Медична освіта та наукові дослідження під час війни в Україні, м. Львів, Україна.

Дисертаційна робота апробована 15.12.2025 року на засіданні кафедри хірургії № 1 ДНП «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького».

Публікації. За темою дисертації опубліковано 10 праць, із яких 3 статей у фахових наукових виданнях ДАК МОН України, 3 статті у науковому видання, що індексується в Scopus (категорія А), 1 міжнародна публікація, 3 тез доповідей.

Обсяг та структура дисертації. Дисертація викладена на 181 сторінках комп'ютерного набору, з яких 138 сторінок займає основний зміст, і складається зі вступу, огляду літератури, опису методологічних принципів, методів досліджень та загальної клінічної характеристики хворих, трьох розділів власних досліджень, аналізу та узагальнення результатів досліджень, висновків, практичних рекомендацій, списку використаних джерел (148 найменувань, з яких 15 кирилицею, 133 – латиницею). Робота ілюстрована 10 таблицями і 51 рисунком.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ДІАГНОСТИКИ І ЛІКУВАННЯ ОПІКОВИХ РАН (огляд літератури)

1.1. Сучасні методи діагностики шкірних дефектів, зокрема опікового генезу

Згідно зі статистикою Всесвітньої організації охорони здоров'я, щороку близько 11 мільйонів людей у всьому світі страждають від опіків, і 180 тисяч із них помирають [101]. За статистикою опікова травма є четвертим за поширеністю видом травм після дорожньо-транспортних пригод, падінь і фізичного насильства [46]. Згідно з дослідженням [143] в 204 країнах лише у 2019 році було зареєстровано 8 378 122 нових випадків опіків.

Опік — це стан, при якому вплив тепла, хімічних речовин, електричного струму або інших факторів спричиняє пошкодження тканин. Найчастіше опіки вражають шкіру, але можуть також пошкоджувати глибші тканини, такі як м'язи та кістки. У результаті цього шкіра втрачає свої основні функції: захист від зовнішнього середовища та патогенів, регулювання теплообміну тощо.

Опіки є однією з найсерйозніших та найболучіших травм, які часто вражають дітей, людей з інвалідністю та осіб похилого віку [34, 92, 148]. Більшість випадків опіків спостерігалася у молодому віці, зокрема серед осіб віком від 10 до 19 років, а більшість випадків смерті від опіків – серед дітей віком від 1 до 4 років. У світі за 2019 рік найбільша кількість опіків була зареєстрована в Китаї та Індії [34]. Підвищений ризик опікової травми був серед груп із нижчим індексом соціально-демографічного розвитку, корелював із високим професійним ризиком та зловживанням алкоголем [31, 34].

Зважаючи на ці серйозні наслідки, опіки залишаються однією з найскладніших проблем сучасної клінічної медицини, а їх діагностика та лікування вимагають пошуку та впровадження новітніх ефективних методів. За останні десятиліття у світі було створено багато центрів лікування опіків, що

надають спеціалізовану допомогу та сприяють зниженню смертності [92]. Хоча досягнуто значного прогресу, лікування опіків залишається складним завданням через численні ускладнення та відносно тривале перебування хворого в стаціонарі. Крім того, із збільшенням кількості пацієнтів із важкими опіками виникають нові проблеми, такі як посттравматичний догляд, корегування рубців та психологічні проблеми пацієнтів [29, 31].

При виборі лікувальної тактики важливо враховувати розміри та глибину опіку [21, 27, 77]. Під час динамічного спостереження за пацієнтом необхідно оцінювати швидкість зменшення розмірів та глибини опікової рани, щоб своєчасно коригувати лікування та прогнозувати терміни одужання [60]. Об'єктивна оцінка рани також є необхідною у реконструктивній хірургії для точного визначення площі опіку і кількості донорської шкіри або величини шкірного клаптя для трансплантації. Таким чином, новітні підходи, що включають точну оцінку глибини та розмірів уражень із використанням передових технологій, здатні значно покращити результати лікування, знизити ризик ускладнень і підвищити якість життя пацієнтів [2, 53].

Однак не лише у практичній медицині важливими є вульнерологічні параметри. Сьогодні, коли увесь документообіг є цифровим, є необхідність у зберіганні інформації у базах даних пацієнтів як для рутинного використання лікарями, так і з науковою метою, наприклад, у клінічних дослідженнях.

Опікові рани характеризуються неоднорідністю і постійно динамічно змінюються, що ускладнює визначення їх тяжкості, а отже і вибору правильного лікування. Тим не менш, надійна та достовірна оцінка тяжкості опікової рани є тим фундаментом, на основі якого хірург приймає остаточне рішення щодо вибору оптимальної тактики лікування та термінів операції [82]. А, отже, в перспективі, це дозволяє скоротити час лікування у стаціонарі, що неабияк важливо.

Згідно проведеного ретроспективного аналізу публікацій, виокремлено дві великі групи вульнерологічних методик: перша, що стосується планіметричної оцінки ран і може бути використана, як для опікової рани, так і

для ран іншого генезу, та друга, що ґрунтується власне на оцінці глибини опікової рани, так як такий вид уражень має свої клінічні особливості.

Найбільш простими методами оцінки величини рани вважаються клінічні, які, окрім цього, найбільш часто використовуються на практиці. Клінічно рану оцінюють *ad oculus* на підставі рутинних клініко-морфологічних критеріїв: перифокального запалення, очищення рани, появи та виповнення рани грануляціями, контракція рани, крайова епітелізація [8, 49, 74]. Ці методики включають якісні характеристики і в їх основі лежить суб'єктивна оцінка, тому вони є малоефективними. Глибину рани також на практиці найбільш часто визначають візуально. Це пов'язано, передусім, з доступністю методики [115]. Візуальний метод базується на огляді рани та оцінці тактильних характеристик рани (зовнішній вигляд, капілярне наповнення та збереження чуття) [77]. Однак достовірність таких методик є обмеженою через оцінку лікарем лише поверхні рани, а також цей спосіб є суб'єктивним, адже він не підкріплений жодними чіткими ознаками [73, 98].

Окремо виділяють групу планіметричних методів, що ґрунтуються на контакті з ураженою шкірою. Відповідно, недоліком безпосереднього контакту вимірювального засобу зі шкірою пацієнта є необхідність додаткової стерилізації, дотримання правил поведіння з забрудненням біологічними рідинами та їх утилізації. До таких методів належить метод J. I. Kundin [67], який передбачає вимірювання найбільшої довжини та ширини рани таким чином, що б ці величини знаходилися на перпендикулярних осях. Розрахунок площі рани відбувається за формулою:

$$S=L \times W \times 0,785, \text{ де } S - \text{ площа рани, } L - \text{ довжина рани, } W - \text{ ширина рани.}$$

Аналогічним методу J. I. Kundin є метод V. Schubert [111], але у цьому методі коефіцієнт є дещо іншим:

$$S=L \times W \times 0,763.$$

Схожим на попередні є метод Н. N. Mayrovitz [83], де площа рани розраховується за наступною формулою:

$$S=L \times W \times 0,93 \times \pi/4.$$

Ці методи є недорогими і простими у використанні, але точними лише за умови ідеально прямокутних ран і не враховують те, що форма рани вкрай нерівномірна. Таким чином площу рани можна переоцінити на 41% згідно досліджень Rogers L.C. та співавт. [107] та на 29%-43% згідно Shetty R. та співавт. [119].

Наступна група методів, це методи, що ґрунтуються на зважуванні. До таких належить метод В. Hejda і J. Hejdova [51], де контури поверхні рани наносяться на папір, отриманий шаблон вирізають і зважують. Попередньо визначають масу квадрату цього ж паперу, але відомої площі. Невідома площа – це різниця між добутком маси шаблону на відому площу контрольного квадрату та маси контрольного квадрату. Таку ж методику має метод J. Ichimaru [55], де використовуються додатковий носій – подвійні прозорі листки, нижній з яких призначений для контамінації з раною, а верхній – для вирізання контурів рани з наступним виміром її маси.

Ручний підрахунок площі включає метод R. W. Sessions [114], що полягає у наступному: на рану накладають двошаровий листок, що має мітки на верхній частині та низку наскрізних перфорацій, обмальовують контур рани, далі цей листок кладеться на міліметровий папір і шляхом підрахунку квадратних міліметрів в середині контура визначається площа.

У великій кількості методів використовується автоматичний підрахунок. Методом J.-L. Richard [105] контур рани переноситься на прозору плівку і сканується. В подальшому за допомогою комп'ютерної програми розраховують площу рани. Метод О. О. Біляєвої [1], що аналогічний попередньому, проте контур рани отримують шляхом фіксації її відпечатку на папері. У способі «Mouseeyes» [126], контур рани, що зафіксований на прозорій плівці, розміщують на екран комп'ютера і за допомогою програмного забезпечення обчислюють площу рани. У методі S. Raab [100] для виміру координат використовують пристрій зв'язаний з комп'ютером, який має датчики положення. Оператор «малює» контури стінок рани і виставляє точки дна рани, після чого комп'ютерна програма створює трьохвимірне зображення рани.

Також площу рани вимірюють за допомогою планіметра [128] на спеціальному пристрої (наприклад, Planix 7 Tamaya Digital Planimeter).

До контактних методів належить метод «Visitrak», що передбачає використання двошарової прозорої плівки, яку накладається на рану. На верхньому шарі позначають контури рани за допомогою спеціального пера і програмне забезпечення обчислює площу рани [125].

Безконтактні методи – це велика група способів вимірювання розмірів рани, що передбачають дистанційне вимірювання параметрів дефектів за допомогою фото- чи відео обладнання або інших спеціальних пристроїв. Недоліками цих методів може бути їх значна вартість та можливі спотворення розмірів тривимірного зображення рани при переведенні в двовимірну форму.

Окремою групу складають методи із аналоговим фотографуванням. Спосіб L. Sees [25] передбачає фотографування рани в натуральну величину і при цьому використовують фотоапарат з миттєвим отриманням знімків. Особливістю методу Н. А. Thawer [127] є використання аналогової відеокамери, оцифрування зображення з використанням плати введення зображення (frame grabber) і автоматичним розрахунком параметрів рани з використанням спеціального програмного забезпечення (VeV Measurement Documentation Vista Medical).

Також для вимірювання площі рани використовують цифрове фотографування з еталоном площі, що полягає у фотографуванні рани за допомогою цифрового фотоапарату і умовного еталону площі біля неї. Отримані зображення переносять в комп'ютер. В цьому випадку площа дефекту шкіри визначається як відношення кількості точок в зображенні дефекту шкіри до кількості точок в зображенні умовного еталона площі, помножене на площу еталона [73, 116].

Схожий метод розробив Гюльмамедов Ф. І. [5]. розроблена ним комп'ютерна програма дозволяє виміряти площу рани за аналізом фотографії досліджуваної поверхні, зробленої під прямим кутом. Спочатку показник площі обчислюють у відносних одиницях виміру, які переводяться в абсолютні

шляхом аналізу пропорцій мітки, яка знаходиться на фотографії поряд з раною. Розміри мітки відомі заздалегідь.

Р. Foltynski, що спочатку працював над удосконаленням існуючих методик оцінки розміру рани за допомогою фотографування [39], згодом запропонував власний додаток для смартфона Planimator app, що є більш точним, ніж Visitrak [40]. Саме можливість вбудувати технологію візуалізації, обчислення, аналізу та зберігання в такий портативний пристрій, як смартфон, є основним завданням сьогодення [80].

Також розроблено метод двомірного сканування [54]. Створюють двомірну модель рани за допомогою двомірного лазерного сканера і розраховують планіметричні параметри рани.

Окремо виділяють вимірювання ран за допомогою 3D-технологій - стереобачення [96], фотограмметрії [137] і лазерної тріангуляції або тріангуляції білого світла [28, 118], оскільки вони дозволяють надійно вимірювати тривимірні поверхні, якою є шкіра.

Наступною групою методик є волюметричні, які включають в себе визначення всіх планіметричних параметрів, включно із глибиною дефекту, а також дозволяють створити тривимірну модель рани за допомогою комп'ютерного забезпечення. До таких методик належить метод тривимірного сканування [121], де створюється тривимірна модель рани за допомогою тривимірного лазерного сканера і, на основі отриманої інформації, за допомогою комп'ютерного забезпечення розраховують планіметричні і волюметричні параметри рани.

Відомий метод вимірювання об'єму рани за допомогою тривимірної лінійки (комп'ютерна програма "Woundgraph" Герич І. Д., Коршевнік Д. [3, 4]), який передбачає використання спеціально сконструйованого зонда з наступною комп'ютерною обробкою цифрових та графічних даних. Недоліком цього методу є те, що він дозволяє вимірювати рани виключно геометрично правильної форми.

Також розроблено метод «структурного підсвічування» (Structured lighting) [66], що полягає в проектуванні на рану променів лазерних діодів, що створюють на поверхні рани малюнок у вигляді сітки 16×16 елементів. Цифровим фотоапаратом фотографується ранова поверхня, далі на отриманій фотографії вручну відзначаються елементи сітки, що знаходяться на поверхні рани, і відсіваються ті елементи, що знаходяться на інтактній шкірі. Так проводиться розрахунок площі рани. Глибина розраховується за відхиленням елементів сітки від розташування, передбачуваного у випадку проектування сітки на поруч розташовану ділянку тіла, де відсутня рана.

Технологія Medphos [16] – це система, що складається з трьох синхронізованих фотокамер з конвергентними оптичними осями. У центрі кола, утвореного камерами, розташовується джерело світла. На досліджувану поверхню проектується масив точок, далі робиться синхронний знімок трьома камерами, і на комп'ютері з використанням спеціальних алгоритмів утворюється тривимірна модель рани.

Технологія Mavis [97] полягає у проектуванні на рану світлових смуг різних кольорів під кутом близько 45° . Цифровим фотоапаратом фотографується ранова поверхня. Виходячи з відомого розташування проектора і камери за місцем зміни напрямку світлових пучків в місцях вимірювання рельєфу поверхні, на комп'ютері створюється тривимірна модель рани і проводиться розрахунок планіметричних і волюметричних параметрів рани.

Отже, проведений нами аналіз методик планіметричного аналізу дефектів шкіри показав, що найбільш часто та найлегшими у використанні є найпростіші вимірювальні методики, які, проте, є найменш точними. Сучасні методики більш точні, є високоефективними, але потребують додаткового обладнання чи дороговартісного комп'ютерного забезпечення і у повсякденній практиці використовуються рідко.

Наступним етапом нашого дослідження було вивчення методів, що використовуються для оцінки глибини опікової рани, а отже і важкості опіку. Потреба у такому дослідженні передусім пов'язана з необхідністю

віддиференціювати тканини, що здатні до самовідновлення (поверхневий опік), та некрозу, який повинен бути видаленим (глибокий опік). Хоча «золотим стандартом» сьогодні вважається гістологічний аналіз тканин, отриманих шляхом пункційної біопсії з опікової рани, однак цей метод має низку недоліків, таких як відсутність стандартизованої гістологічної інтерпретації, високу частоту помилок у відборі зразків через неоднорідність опікової рани, ураження місця біопсії [60].

Через значну необхідність знайти легкий, доступний та водночас ефективний метод оцінювання глибини опікової рани описано низку методик, які себе зарекомендували як такі, що можуть використовуватися з цією метою.

Лазерна доплерівська флоуметрія використовується для оцінки перфузії крові в уражених тканинах. Вона заснована на ефекті Доплера, коли лазерний промінь відбивається від рухомих еритроцитів у крові. Ця методика дозволяє оцінити кровотік і, таким чином, непрямо визначити життєздатність тканин, а, отже, і глибину опіку, так як некротизована тканина має знижений кровоплин. Аналіз перфузії відбувається за кольоровою шкалою. Серед недоліків – необхідність безпосереднього контакту зі шкірою. А також можливість вимірювати параметри лише в одній конкретній точці на поверхні шкіри в певний момент часу. Це означає, що для отримання повного зображення рани потрібно буде проводити вимірювання в різних точках, і результати з кожної точки повинні бути проаналізовані окремо. Метод не дозволяє автоматично або безпосередньо отримувати інформацію про глибину опіку в декількох точках одночасно або в ширшій ділянці шкіри [19, 73]. На такому ж ефекті ґрунтується лазерна доплерівська візуалізація. Позитивом цієї методики є те, що вона не потребує безпосереднього контакту із шкірою хворого, може оцінити перфузію на більшій площі поверхні рани. Але недоліком є дороговартісність, чутливість до рухів пацієнта під час обстеження, потребує тривалого часу вимірювання і є пристрій-специфічною [30, 73, 98, 135].

Ще одним методом є термографія, що заснована на оцінці різниці температур. Метод допомагає визначити зони з порушеним кровообігом

(некротичні), які мають нижчу температуру та життєздатні тканини, які, як правило, мають вищу температуру через краще кровопостачання. Температура реєструється на основі інфрачервоного випромінювання, яке випромінює тканина і корелює з залишковою перфузією та/або втратою клітинного метаболізму в некротичній тканині. Не потребує контакту зі шкірою, а результат може бути отриманий негайно, наприклад, у вигляді теплових зображень. Таке обстеження вважається швидким методом, що дозволяє отримати інформацію про значну поверхню [32, 102, 142].

Фотоакустична візуалізація (мікроскопія) поєднує у собі ультразвук і оптичну візуалізацію для отримання зображень тканин з високою роздільною здатністю. Методика заснована на принципі, що об'єкти, які відбивають світлову енергію, вібрують, коли енергія перетворюється на тепло, випромінюючи звукові хвилі. Ці звукові хвилі можна вловити ультразвуковим датчиком. Суть методу ґрунтується на виявленні фотоакустичних сигналів, які походять з крові в неушкодженому шарі тканини, розташованому під пошкодженим шаром з кров'яним застоєм. Це дозволяє отримати висококонтрастні сигнали, що відображають глибину ушкодження за рахунок аналізу оптичних властивостей та зміни акустичних сигналів. Метод дозволяє як первинно оцінити глибину опіку, так і моніторити процес його загоєння. З недоліків вважаємо безпосередній контакт зі шкірою під час аналізу [56, 57, 130].

Спектрофотометричний внутрішньошкірний аналіз дозволяє вимірювати оптичні властивості шкіри, такі як поглинання і розсіювання світла та може допомогти в оцінці ступеня пошкодження, оскільки зміни в тканинах впливають на її спектральні характеристики. Аналіз базується на вимірюванні відбиття або передачі назад світла в діапазоні 400-1000 нм для отримання карт хромофорів, таких як гемоглобін і меланін. Цей метод дозволяє створити розраховані карти, які відображають вміст хромофорів в тканинах, не контактує зі шкірою і працює на відстані 30-50 см від поверхні опіку. Програмне забезпечення перетворює «сирі» дані в три видимі зображення: високоякісну

фотографію, карту перфузії і карту пігменту, які потребують якісної інтерпретації. Метод має низьку вартість і є легким у використанні, проте інтерпретація зображень може бути складною [23].

Метод відеоангіографії з використанням індокарбіну зеленого використовує нетоксичний барвник, що зв'язується з білками і затримується в судинах після внутрішньовенного введення. Барвник поглинає і флуоресцює в ближньому інфрачервоному спектрі, що дозволяє візуалізувати глибокі дермальні судини. Флуоресценція барвника може бути виявлена, кількісно оцінена та переведена в кольорові карти перфузії для легшого інтерпретування. До переваг методу належать швидке і макроскопічне сканування (подібне до доплер-лазерної візуалізації, на компактному і менш дорогому пристрої), можливість відрізнити глибокі і поверхневі опіки на ранніх стадіях, ефективно працювати навіть при наявності інших мікросудинних патологій. Недоліками є потреба внутрішньовенного введення барвника, що може викликати побічні ефекти – головний біль, свербіж або анафілактичну реакцію. А також безпека для дітей, вагітних та годуючих жінок недостатньо досліджена. Метод не дає можливість чітко оцінити різницю між нормальною, зниженою та підвищеною флуоресценцією. У випадках незначної різниці показників флуоресценції результат буде складним для інтерпретації [85].

Дерматоскопія зазвичай використовується для оцінки шкірних захворювань і пошкоджень. Хоча вона не є стандартним методом для оцінки опіків, дерматоскопія може бути корисною для візуалізації поверхневих змін шкіри. Для діагностики глибини опіку використовує невеликий ручний дерматоскоп, який застосовується через пластикову плівку для контакту зі шкірою. Метод дозволяє візуалізувати кольори та мікроструктури поверхневої тканини за допомогою неполяризованого та поляризованого світла. За допомогою збільшення дерматоскопія оцінює присутність мікроциркуляції та визначає дерматоскопічні ознаки, які можуть бути описані за допомогою системи оцінки цілісності капілярів. Хоча метод надає негайні результати і

дозволяє спостерігати глибші шари завдяки поляризованій дерматоскопії, є суб'єктивним, так як залежить від інтерпретації спостерігача [86].

Схожим є метод капілярної мікроскопії. Метод є відносно недорогим і потребує портативного обладнання, яке дозволяє візуалізувати капіляри на поверхні опіків. Основні переваги включають незалежність від кривизни шкіри та швидкість вимірювань, що не вимагає тривалого нерухомого стану пацієнта. Однак, метод має кілька недоліків: потребує прямого контакту з раною, може візуалізувати лише невелику частину рани одночасно, що підвищує ймовірність помилок при вибірці. Інтерпретація результатів є суб'єктивною і вимагає спеціальних знань. Крім того, існує недостатня кількість досліджень у сфері опіків, і немає чітких даних про точність методу після травми або впливу інфекцій і супутніх захворювань. Також не вивчено застосування методу для дітей до 13 років, також він не враховує регіональні відмінності в перфузії [84].

Метод ближньої інфрачервоної спектроскопії використовується для оцінки оксигенації і кровопостачання тканин. Метод використовує інфрачервоні промені, які освітлюють тканину, а відбите світло збирається волоконно-оптичними зондами. Це дозволяє отримати інформацію про структурні та хімічні компоненти тканини, такі як насиченість киснем, вміст гемоглобіну та води. Вимірювання насиченості киснем тканин в ділянці опіку в порівнянні з нормальними ділянками служить індикатором глибини опіку. Цей метод забезпечує швидке отримання даних та має контакт з шкірою через пластикову плівку, що робить його ефективним для оцінки глибини опікових ушкоджень [113].

Також була запропонована SWIR-візуалізація за допомогою SWAT, яка дозволяє об'єктивно оцінювати глибину опіків, аналізуючи відбиття світла в кількох інфрачервоних діапазонах. Методика забезпечує точніше розмежування поверхневих і глибоких уражень порівняно з клінічною оцінкою та може допомогти у визначенні потреби в оперативному лікуванні [91].

Відеомікроскопія – метод, що дозволяє візуалізувати капіляри дерми за допомогою зображень, отриманих у видимому спектрі світла волоконно-

оптичного джерела і збільшувальної лінзи. Метод забезпечує негайний контакт зі шкірою через пластикову плівку і дозволяє оцінювати наявність або відсутність відеомікроскопічних ознак некрозу тканин. Оцінка проводиться за допомогою градуйованої системи цілісності капілярів. Хоча метод надає якісну інформацію про мікроциркуляцію в зоні опіку, його аналіз є суб'єктивним і залежить від інтерпретації дослідника [60, 87].

Спектрометрія відбиття оцінює властивості поверхні шкіри через вимірювання спектра відбитого світла. Метод використовується для діагностики глибини опіку шляхом аналізу відбитого або переданого світла в діапазоні довжин хвиль від 400 до 1100 нм. Це дозволяє отримувати карти хромофорів, таких як гемоглобін і меланін, в опіковій зоні. Метод не потребує контакту зі шкірою. Зібрані спектри аналізуються комп'ютерною програмою з використанням штучної нейронної мережі для прогнозування часу загоєння. Хоча метод надає комплексні дані, він чутливий до фону освітлення і відстані зонда, а також забезпечує лише одиночні точкові вимірювання [94, 145].

Ультрасонографія. Для діагностики глибини опіку використовує ультразвукові хвилі частотою 5 МГц, які передаються через шкіру і відбиваються від кровотоку під раною. Метод забезпечує негайні результати без контакту зі шкірою, з вимірюванням на відстані 2.5 см від поверхні опіку. Отримані хвилі записуються як окремі А-лінії і перетворюються в зображення за допомогою комп'ютерної обробки, яке інтерпретується спостерігачем. Хоча цей метод має низьку вартість і забезпечує швидку інформацію, його аналіз є суб'єктивним [58, 71, 109].

Оптична когерентна томографія для діагностики глибини опіку використовує систему з центральною довжиною хвилі 850 нм для захоплення світла, яке розсіюється від тканини. Обробка сигналу або сирих спектральних даних проводиться за допомогою короткочасного перетворення Фур'є (short time Fourier transform) або методу подвійного вікна (dual window), а тканина класифікується як обпечена або здорова за допомогою параметрів, отриманих з моделей класифікації на основі степеневих або логістичних регресій. Метод

надає складний аналіз і забезпечує тільки одиночні точкові вимірювання [24, 76]. Описана також методика подвійного зображення, що поєднує оптичну когерентну томографію та візуалізацію пульсового спектру. Оптична когерентна томографія захоплює світло, розсіяне від тканини, для створення високоякісного зображення, яке дозволяє оцінити товщину шкіри за вертикальними зображеннями (В-сканами). Водночас відбувається аналіз коливання у спектр-патерні, що відповідають руху кров'яних клітин, при освітленні лазерним світлом з довжиною хвилі 785 нм. Методика дозволяє порівнювати середні значення перфузії, забезпечує вимірювання великої поверхні одночасно та кілька кадрів на секунду. Однак вона має обмежену глибину проникнення менше ніж 1,2 мм, чутлива до рухів пацієнта та вимагає складного аналізу [42, 131].

Методика просторового частотного зображення є вдосконаленням технологій ближньої інфрачервоної спектроскопії, що забезпечує детальний аналіз глибини опіку. Вона використовує "просторові частоти", що представляють різні патерни ближньоїінфрачервоного світла для освітлення тканини, що дозволяє визначати конкретні глибини проникнення світла і таким чином вимірювати абсорбцію світла на певних довжинах хвиль, таких як оксигемоглобін, деоксигемоглобін і вода, на різних глибинах, створюючи тривимірні карти перфузії і метаболічної активності тканини. Метод забезпечує кількісні просторові карти оптичних властивостей тканин та біохімічного складу, зокрема, хромофорів (загальний гемоглобін і насичення киснем). Методика не вимагає фізичного контакту з шкірою і може вимірювати великі площі (від 1 см² до понад 100 см²). Вона також дозволяє кількісно оцінювати зміни в розсіянні світла, що викликані денатурацією колагену. Дослідження на тваринах показали, що цей метод чітко розрізняє поверхневі та глибокі рани, і попередні результати досліджень на людях підтверджують ці висновки [62].

Методика волоконно-оптичної конфокальної візуалізації використовується для оцінки глибини опіку шляхом виявлення аутофлуоресценції, яка виникає через денатурацію колагену в тканинах, під

впливом лазерного освітлення. Для цього застосовується лазер з довжиною хвилі 488 нм для збудження флуоресценції, а детекція відбувається при довжині хвилі понад 505 нм. Метод забезпечує вимірювання товщини аутофлуоресцентного шару, оцінюючи відстань між найбільш поверхневими і найглибшими виявленими флуоресцентними зображеннями в площині XY. Хоча метод дозволяє отримувати точні дані про товщину аутофлуоресцентного шару, він має певні обмеження, зокрема здатен забезпечувати тільки одиночні точкові вимірювання [134].

Методика мультиспектрального зображення для діагностики глибини опіку використовує спектри абсорбції тканин для оцінки стану опіку. Вона здійснюється шляхом відбиття червоного, зеленого та ближньо інфрачервоного світла за допомогою оптичного зонда і електронного контрольного блоку. Дані отримуються без фізичного контакту з шкірою, і результати можна безпосередньо зчитувати з приладу та відображати в вигляді сітки для характеристик опіку. Однак метод чутливий до відбиття світла від шкіри, що може впливати на точність результатів [145]. Розроблено методику, яка використовує мультиспектральну візуалізацію в поєднанні зі штучним інтелектом для оцінки життєздатності тканин у рановому ложі під час видалення опікових уражень. Вона дозволяє автоматично визначати ділянки нежиттєздатної та життєздатної тканини, допомагаючи хірургам точніше виконувати ексцизію, зменшуючи надмірне видалення та підвищуючи ефективність і безпеку операції [146].

Існує також методика, яка використовує гіперспектральну візуалізацію для оцінки глибини термічних опіків. Вона дозволяє неінвазивно відстежувати зміни мікроциркуляції в ураженій шкірі протягом перших 72 годин після травми та прогнозувати потребу в шкірній трансплантації за допомогою HSI Burn Index з високою чутливістю та специфічністю, забезпечуючи об'єктивну та кількісну оцінку тяжкості опіку [112].

Представлено також методику, яка використовує глибоке навчання (Deep Learning) для комплексної оцінки опікових ран. Вона передбачає

автоматизовану сегментацію загальної площі опіку та виділення глибоких зон із порушеним кровопостачанням на цифрових зображеннях ран, що дозволяє точно визначати відсоток ураженої поверхні тіла та обчислювати необхідний об'єм рідини для ресусцитації. Система ґрунтується на кількох потужних DL-моделях (U-Net, PSPNet, DeeplabV3+, Mask R-CNN) і застосовує різні підходи до маркування даних для загальної та глибокої зони опіку, що підвищує точність сегментації та прогнозування. Завдяки цьому метод забезпечує об'єктивну, швидку та повторювану оцінку тяжкості опіків, зменшуючи залежність від клінічного досвіду лікаря і відкриваючи можливості для стандартизації діагностики та планування лікування у великих опікових центрах [26, 27]. Ця методика залишається експериментальною, не імплементованою в практичну медицину.

Були спроби використати телемедицину для аналізу глибини опікової рани, але чутливість такого способу не виправдав себе [116].

Провівши аналіз, ми встановили, що більшість методик є дорого вартісними, потребують додаткової техніки чи є складними у використанні, а прості методи залишаються суб'єктивними та не точними. Звертає на себе увагу метод термометрії, як доступний, простий та не дорогий, але його діагностична цінність потребує наступних досліджень.

Проаналізовані методики визначення планіметричних характеристик рани та оцінки глибини опікової рани виявляють певні недоліки, серед яких складність у використанні та висока вартість. Більшість з цих методик потребують значних витрат часу та ресурсів, що може обмежити їх практичне застосування у клінічних умовах.

Важливо підкреслити необхідність подальших досліджень та розробок у цьому напрямку для пошуку більш доступних, простих у використанні та економічних методів. Ідеальним рішенням було б впровадження нових технологій або вдосконалення існуючих методик, що дозволять одночасно точно оцінювати планіметричні характеристики рани та глибину опіку. Це

може суттєво покращити діагностику та лікування пацієнтів з опіками, забезпечуючи більш точне діагностування та ефективніше лікування їх стану.

Подальші дослідження повинні зосередитися на розробці і впровадженні методик, які не лише забезпечать високу якість вимірювань, але й будуть доступними для широкого застосування у клініці, будуть прості в експлуатації та мають можливість інтеграції в існуючі протоколи лікування. Це дозволить забезпечити оптимальне поєднання точності, доступності та ефективності в лікуванні пацієнтів з опіками.

1.2. Сучасні принципи лікування уражень шкіри опікового генезу

Лікування опіків має давню історію, яка починається ще з часів, коли людство навчилося користуватися вогнем. Відомо, що вже неандертальці застосовували рослинні екстракти для обробки опікових ран, що підтверджують археологічні знахідки наскельних малюнків [20]. Протягом тисячоліть різні культури використовували різноманітні засоби для лікування опіків. Наприклад, у Стародавньому Єгипті лікарі застосовували мазі з тваринних, рослинних та мінеральних продуктів та поєднували їх використання з релігійними обрядами, а також для лікування опікових ран використовували пов'язки, змочені молоком [95]. У Стародавньому Римі для обробки опіків застосовували суміші меду з висівками, кору та попіл [123]. Проте через відсутність наукових знань про патофізіологію опікової рани ефективність цих методів залишалася обмеженою.

Подібна ситуація склалася і з історією шкірної трансплантації. Протягом століть спроби пересадки шкіри не мали значних успіхів через недосконалі методи забору тканин, занадто товсті трансплантати та відсутність розуміння фізіологічних процесів, пов'язаних із трансплантацією. Лише у XIX столітті, завдяки значним медичним досягненням у сфері лікування опіків, швейцарський хірург Жак-Луї Реверден (1842–1929) та англійський хірург Джордж Поллок (1897–1917) успішно застосували методи шкірної

трансплантації для лікування опікових ран [17]. З розвитком медицини лікування ран опікового генезу еволюціонувало від його витоків, однак впродовж усієї історії людство все ж стикалося з культурними, релігійними чи псевдонауковими труднощами, які зупиняли розвиток медичної науки.

Сьогодні лікування пацієнтів з опіковими ранами включає як загальні заходи, так і специфічні місцеві, спрямовані на відновлення пошкоджених тканин. Загальні заходи включають боротьбу з опіковим шоком, корекцію терморегуляції, наводнення пацієнта, знеболення, боротьбу з контамінацією рани збудниками тощо. Місцеве ж лікування, на якому ми зосередимося, включає хірургічну обробку шкірного дефекту, яка може вимагати багаторазових змін пов'язок, оперативних втручань з висіченням ураженої шкіри, а також закриття дефектів тимчасовими чи постійними трансплантатами [41, 104]. Однак ці методи не є універсальними і потребують індивідуального підходу до кожного пацієнта. Зараз активно досліджуються нові способи лікування, спрямовані на покращення та прискорення процесу загоєння опікових ран і мінімізацію ризиків інфікування.

Стратегія, яку хірург обирає для лікування опікових ран залежить зокрема від глибини ураження. Однак першочерговим етапом місцевого лікування опікової рани є все ж її санація. Процес очищення починається з очищення навколишньої шкіри милом та антисептиком, гоління волосся, якщо необхідно. Потім рану промивають і очищають 0,1% розчином бензалконію хлориду або 0,05% хлоргексидину. Важливо ретельно видалити відшарований нежиттєздатний епітелій з пухирями [129]. Доведено, що санація рани у першу добу сприяє швидшому загоєнню шляхом зниження активності протеаз, які руйнують фактори росту, а також може зменшити інвазію збудників, особливо у дітей [33].

Опіки, які не проникають глибше епідермісу, класифікуються як опіки I ступеня і або не потребують втручання, або ж вимагають мінімального лікування, такого як знеболення та зволожуючий засіб. Наявність пухирів свідчить про ураження папілярного шару дерми і класифікуються як опіки II

ступеня. У цьому випадку великі пухирі можна дренувати, а маленькі – можна залишити недоторканими [129].

Шкірні дефекти, які потребують більше 2-3 тижнів для реепітелізації, мають високий ризик виникнення гіпертрофічних рубців. У таких випадках доцільно проводити хірургічне висічення ураженої тканини та трансплантацію шкіри, щоб зменшити ймовірність рубцювання. Основною метою лікування часткових пошкоджень шкіри є стимуляція реепітелізації. Для цього слід провести санацію дефекту, видалити некротичні тканини та пухирі, після чого нанести місцевий засіб для підтримання вологого середовища. Якщо використовуються антимікробні мазі, пов'язки потрібно змінювати один-два рази на день. Сьогодні можна застосовувати спеціальні пов'язки, які прилипають до рани, підтримують вологе середовище та відпадають, коли рана загоється. Ці пов'язки наносяться після очищення рани і можуть залишатися на місці протягом 5-10 днів, що є альтернативою щоденній зміні пов'язок. Однак незалежно від типу пов'язки, будь-яка рана, що залишається відкритою протягом 2 тижнів, повинна бути розглянута для визначення необхідності пересадки шкіри [129].

Опіки, які повністю уражають дерму і проникають до жирової тканини, класифікуються як опіки II ступеня. У такому випадку епітеліальна міграція обмежена базальними клітинами з країв рани, тому більша частина загоєння є результатом утворення та звуження рубця. Рани малого розміру на непомітних ділянках можуть скорочуватися без зайвих ускладнень, але більші опіки, особливо на функціональних ділянках, призводять до утворення контрактур. Опіки III ступеня поширюються на м'язи, кістки або сухожилля. Саме опіки II-III ступенів належать до глибоких і ключовим аспектом їх ефективного лікування є швидке очищення рани від некротизованих тканини. Це може бути досягнуто як хірургічними методами видалення чи консервативними методиками [82].

Окремо слід зупинитися на хірургічному видаленні некротизованих тканини та його аналогах. Лише в 1970-х роках раннє висічення та накладання

трансплантатів почали застосовувати як стандарт лікування опікових травм [22]. Раннє висічення опікових ран має очевидні переваги, серед яких підвищення виживання, зниження частоти інфекцій та скорочення терміну перебування хворого в лікарні. Раннє видалення ураженої тканини також знижує ризик гіпертрофічних рубців [129]. Операції можуть проводитися у перші 2-3 дні після травми до повного видалення ураженої тканини та закриття рани. Якщо всі шкірні дефекти не можливо закрити ауотрансплантатами, тоді доцільним є використання тимчасового покриття, наприклад, біологічних пов'язок, ало- чи ксенотрансплантатів до того часу, поки не будуть доступні аутогенні донорські ділянки.

Існують два види техніки: тангенціальне висічення та фасціальне висічення. Тангенціальне висічення передбачає поетапне видалення шарів обпалених і некротизованих тканин до досягнення життєздатної тканини. Це може призвести до втрати крові та труднощів з оцінкою життєздатності рани при видаленні великих ділянок. Фасціальне висічення видаляє обпечену шкіру та підшкірну тканину до фасції м'яза, видаляючи підшкірний жир, кровоносні судини та нерви, забезпечуючи кращий гемостаз. У деяких випадках вени можуть бути збережені для підтримки венозного повернення. Для глибоких опіків, що охоплюють м'язи, висічення повинно досягати здорової тканини з активною кровотечею та скороченням м'язів. Проте це може призвести до випадкового видалення життєздатних тканин та спричинити деформацію контурів і лімфостаз у зонах висічення.

Варто зазначити, що згідно попередніх спостережних та рандомізованих досліджень висічення та накладання шкірних трансплантатів краще проводити в межах 24–72 годин після травми [70], так як відкладене хірургічне втручання призводить до більшої контамінації ран, інвазії збудників, сепсису і пов'язане з більш тривалим перебуванням хворого у лікарні. Недоліками хірургічного видалення некротів є збільшення площі рани, потреба у спеціалізованій техніці та внутрішньовенному знеболенні [141].

Обговорюються і інші методи видалення некротизованих тканин, такі як гідрохірургія, лікування медичними п'явками, лазерна терапія, спеціальні системи для припікання тощо [47].

Наприклад, такий сучасний метод як лазерна абляція базується на випаровуванні пошкоджених тканин під впливом лазерного променя. Найчастіше застосовують вуглекислі та ербієві лазери, з акцентом на їхню здатність до прецизійної обробки. Пульсуючі вуглекислі лазери дозволяють безконтактно висікати уражені ділянки шкіри, що робить їх ефективними у лікуванні важких опіків. Ербієві лазери, завдяки мінімальному коагуляційному впливу, мають менший термічний ефект, що зменшує зону ураження оточуючих тканин [44].

Плазмово-опосередкована радіочастотна абляція є інноваційним методом, який широко використовується у щелепно-лицевій хірургії. Вона базується на формуванні високоенергетичного поля, що руйнує некротичні тканини при низьких температурах. Цей метод знижує бактеріальне навантаження та не провокує аерозольного поширення бактерій [79]. Однак, він не може видалити сухий струп, тому потребує доповнення іншими техніками.

Ультразвукова кавітація демонструє значні результати при лікуванні глибоких опіків, особливо при видаленні залишків некротичних тканин перед аутодермопластиком. Перевагами є зниження бактеріального навантаження та менша крововтрата порівняно зі стандартною некретомією. Проте використання цієї методики вимагає додаткових захисних заходів через ризик аерозольного забруднення [72].

Гідрохірургія є ще одним перспективним методом, що дозволяє зберегти життєздатні шари дерми під час видалення некротизованих ділянок. Ця методика мінімізує поширення інфекції, однак, має свої обмеження, зокрема неможливість адекватної обробки ділянок щільного струпа [43].

Цікавим методом нехірургічного очищення опікових ран є мінімально інвазивне ензимне видалення некротичних тканин за допомогою протеолітичних ферментів [147]. Для місцевого очищення зазвичай

використовують такі ферменти, як колагеназа і папаїн. У літературі описано небагато ферментних препаратів, зокрема ферменти бактеріального (*S. histolyticum*, *B. subtilis*) та рослинного походження (папаїн, бромелаїн) [64]. Ферментний очищувач Nexobrid®, на основі бромелаїну, отриманого з стебел ананаса, використовується для нехірургічного видалення опікових струпів [65, 78]. До переваг методики автори дослідження [65] відносять селективність у визначенні зон ураження опіками та уникнення вторинних операцій, а також зменшення кількості реконструктивних операцій через контрактури рубців.

Після очищення рани та гемостазу ключовим є закриття шкірного дефекту. Серед можливих трансплантатів пріоритетом виступають ауто трансплантати, так як забезпечують постійне закриття дефекту [148]. Місце донорської ділянки, порядок та пріоритет закриття шкірних дефектів зазвичай визначається візуально хірургом [18]. Аутогенна трансплантація вимагає свіжого та неконтамінованого ложа рани, в іншому випадку рану необхідно тимчасово закрити, наприклад, алотрансплантатом. Враховуючи це, процедуру закриття ауто трансплантантом найкраще проводити зразу після первинної некректомії.

Шкірні трансплантати класифікуються за товщиною: повної товщини, тонкошкірні цілісні, тобто отримані за допомогою дерматому, та тонкошкірні розщеплені, тобто після отримання дерматолом додатково перфоровані спеціальними пристроями для збільшення їх площі [129].

Невеликі рани можна покрити трансплантатами повної товщини (забір шкіри на всю товщину), що є більш ефективно та має менші шанси утворення рубців [18]. Повношаровий шкірний трансплантат включає епідерміс і всю дерму. Завдяки наявності еластичних волокон первинне скорочення більше за вторинне скорочення, тому його часто використовують для покриття ран на обличчі та руках через добрий косметичний ефект.

Тонкошаровий (листовий) шкірний ауто трансплантат, отриманий за допомогою дерматому, рекомендується для функціональних зон – на ділянки суглобів, та для закриття невеликого або середнього розміру ран на більш

помітних частинах тіла, таких як обличчя, шия або руки. Оскільки такі трансплантанти мають найкращий косметичний результат [148].

Сітчастий шкірний ауто трансплантат можна використовувати при відносно великих опіках, що охоплюють понад 60% загальної площі поверхні тіла, коли доступність трансплантатів обмежена, але це може призвести до нерівномірного вигляду та гірших функціональних результатів [129]. Сітчасті ауто трансплантанти можуть бути виконані в різних співвідношеннях (до 6:1), хоча поширеним є співвідношення 2:1. Головною їх перевагою є забезпечення відтоку рідини, зводячи до мінімуму ускладнення, такі як серома та гематома. У випадку великих шкірних дефектів, покрити рану необхідно більшою частиною власної шкіри пацієнта з широкими сітками, а додатково можна використовувати алотрансплантати або дермальні замітники як тимчасове покриття.

Листовий та сітчастий шкірні трансплантати включають епідерміс і частково дерму і вважаються золотим стандартом для досягнення міцного та постійного закриття [41].

Для закріплення шкірних трансплантатів до ложа рани можна використовувати різні техніки. Скоби переважно використовуються для великих ділянок, тоді як шви є кращим варіантом у дітей, оскільки абсорбуючі шви усувають необхідність у видаленні [129].

Вростання трансплантата — це процес реваскуляризації, під час якого трансплантат отримує поживні речовини шляхом дифузії з ложа рани, оскільки він не має судинного зв'язку з тканиною. Реваскуляризація починається приблизно через 48 годин після розміщення трансплантата і включає неоваскуляризацію та інокуляцію, тобто прямий зв'язок судин реципієнта з трансплантатом. Паралельно з реваскуляризацією проходить фаза організації, під час якої трансплантат інтегрується з ложем рани [129].

Культивований епітеліальний ауто трансплантат – відносно новий метод отримання матеріалу для покриття рани, передбачає культивування зразка шкіри пацієнта в лабораторії для отримання епітеліальних клітин, які потім

наносяться для покриття рани. Використання цих методик може зменшити кількість донорської шкіри, необхідної для лікування великих опіків, а також до значного скорочення часу загоєння як донорської ділянки, так і ділянки опіку. Крім того, ці методики можуть підвищити загальний успіх трансплантації та покращити якість рубця [41]. Однак така методика має ряд недоліків, зокрема підвищену сприйнятливість до інфекцій, відсутність дермального шару, що робить «нову» шкіру більш тендітною, процес наростання покриву є повільним, а сама ця методика дороговартісною [140]. Також через таку структуру трансплантату можливе повторне відкриття загоєних ран. Культивовані епідермальні алотрансплантати рекомендуються для застосування під час лікування глибоких опікових ран у пацієнтів з високим відсотком ураженої шкіри [140].

Для тимчасового закриття можливе використання заміників шкіри, що є групою матеріалів, призначених для закриття рани, її механічного захисту та захисту від бактеріальної колонізації. Такий матеріал має бути вільним від алергенів, стерильним, забезпечувати належну гнучкість, міцність і здатність інтегруватися з тканинами пацієнта. Шкірні замітники можуть бути тимчасовими пов'язками для прискорення загоєння опіків або передовими біотехнологічними продуктами, які загоюють рану назавжди. Шкірні замітники зазвичай містять носій/матрицю, через яку постачаються поживні речовини, фактори росту та клітини шкіри, наприклад, епітеліальні клітини, фібробласти, меланоцити тощо. Метою такої пов'язки є інтеграція з підкладкою та створення нової аутологічної шкіри [99].

Найбільш поширеними заміниками шкіри є біологічні, що включають матеріали, отримані від осіб іншого виду (ксенотрансплантати) або від іншої людини (алотрансплантати). Останні можуть бути отримані від живих донорів або трупів [93]. Ало- чи ксенотрансплантанти застосовуються з метою тимчасового закриття, коли наявне ураження великого відсотка площі тіла або отримання достатньої кількості аутоотрансплантантів є неможливим [124]. Вважається, що алогенна шкіра є хорошим варіантом тимчасової біологічної

пов'язки, яку утилізують через 1–2 тижні або інфекцію. В деяких випадках алотрансплантати з людськими лейкоцитарними антигенами можуть не відторгатися і навіть зберігатися постійно [103]. У світовій практиці існує таке поняття як банки шкіри, де шкіра може зберігатися в рідкому азоті до п'яти років.

Серед ксенотрансплантантів найкращими вважаються безклітинні шкірні трансплантати з риби [81, 99]. Шкіра риби показала кращі результати з швидшою інтеграцією і реепітелізацією, без підвищення скорочення. Крім того, вона не несе ризику передачі захворювань, таких як спонгіформна енцефалопатія великої рогатої худоби та варіант хвороби Кройцфельда-Якоба [81]. На ринку зараз представлений єдиний сертифікований ксенотрансплантант з шкіри риби, який комерційно доступний, це Kerecis® Omega3, який виготовляється компанією Kerecis, Ісафйорду, Ісландія [81, 144]. Загалом, риб'яча шкіра вважається перспективним терапевтичним варіантом для покращеного закриття ран у випадках глибоких опіків [81].

Поширеними є також продукти, отримані зі свинячої шкіри, що проходять дезепітелізацію та зберігаються при низьких температурах для збереження адгезивних властивостей. Вони застосовуються для покриття чистих ран різної глибини. Новими представниками цієї групи є Permacol і Oasis Wound Matrix, які використовуються для регенерації м'язів і шкіри відповідно [63].

Плацента також може використовуватися як тимчасова пов'язка [89]. Вона діє як біологічний бар'єр, зменшуючи біль, а також здатна проявляти противірусні та бактеріостатичні властивості завдяки виділенню амніотичною мембраною факторів та її імуномодулюючим і протизапальним властивостям. Окремо слід відзначити здатність такого покриття попередити рубцювання та сприяти місцевому ангіогенезу [110].

Біосинтетичні пов'язки стали популярними завдяки здатності прискорювати загоєння ран, зменшувати біль, мінімізувати рубцювання та забезпечувати біоактивні властивості, схожі на дерму [122]. Вони зазвичай

використовуються до повного загоєння рани. Неправильним є використання біосинтетичних пов'язок при глибоких частковошарових опіках, що може призвести до підвищення частоти інфекцій. Серед сучасних постійних шкірних замінників виділяються «Epicel», «Apligraf» і «AlloDerm». Наприклад, «Epicel» представляє собою багатошаровий пласт культивованих аутокератиноцитів, а «Apligraf» — матрицю, насичену колагеном та клітинами для лікування глибоких ран [133].

Інші замінники шкіри, такі як «Integra» і «BTM», створені для довготривалого застосування. «Integra» включає дермальний матрикс з колагену і силіконовий епідерміс, що забезпечують васкуляризацію та регенерацію тканин, а «BTM» базується на поліуретановій структурі, що сприяє загоєнню через інтеграцію з власними тканинами пацієнта [68, 133].

Також активно застосовуються синтетичні матеріали, як-от Suprathel, який показує зниження больового синдрому, та Biobrane, що використовується при поверхневих опіках другого ступеня для зменшення втрат рідини та болю при зміні пов'язок [35].

Гідрогелі є відносно новою групою перев'язувальних матеріалів [139], мають високо гідрофільні макромолекулярні мережі та мають багатоцільовий ефект: їх можна наносити на практично всі ділянки тіла, охолоджують і покривають рану, випускаються в різних розмірах і здатні видаляти додаткове тепло з рани шляхом конвекції та випаровування [45]. Крім того, деякі продукти також збагачені засобами з анестезуючими, живильними або протизапальними властивостями. Такі пов'язки забезпечують вологе середовище ранам, однак воно ж може становити потенційний ризик інфікування мікроорганізмами, що значно впливають на процес загоєння [90].

Також зустрічається низка публікацій про ефективність пов'язок на основі меду. Мед — це густий сироп, багатий на вуглеводи, який використовували в традиційній медицині з давніх часів. Він складається з фруктози, глюкози та фруктолігосахаридів [36]. Склад меду значною мірою залежить від рослин, якими живиться комаха. Основними інгредієнтами

натурального меду є флавоноїди, фенольні кислоти, аскорбінова кислота, токоферолі, каталаза, супероксиддисмутаза, відновлений глутатіон і пептиди [88]. Використання меду в процесі лікування опіків має перевагу у створенні вологого середовища, збереженні цілісності опікової поверхні, оскільки він не прилипає безпосередньо до неї, і забезпеченні бактеріального бар'єру, який запобігає потенційному перехресному зараженню [38]. Проте такий підхід до лікування опікових ран потребує ще вивчення, оскільки дослідження були проведені лише на тваринах.

Хітин і хітозан — це поширені та недорогі біоматеріали, отримані з клітинних стінок грибів, екзоскелетів комах та скелетів безхребетних. Вони є біосумісними, біорозкладними, нетоксичними та антибактеріальними [52]. Хітозан сприяє швидкому згортанню крові, проліферації фібробластів і підтримує стерильне середовище в рані, оптимізуючи умови загоєння та запобігаючи утворенню рубців [132]. Його ефективність підтверджена науковими дослідженнями та клінічними випробуваннями за останні 40 років [120]. Хітин і хітозан використовуються у вигляді волокон, порошків, гранул, губок та композитів, що скорочує час лікування і мінімізує утворення рубців [69]. Приклади таких перев'язок: Dibucell (Celther Polska) і Beschitin (Unika) [69].

Крім шкірних замінників та синтетичних пов'язок, були розроблені спеціальні пристрої, такі як ReCell для розпилення суспензії клітин, що знаходяться в шкірі, RenovaCare для доставки клітин шкіри або стовбурових клітин, і 3D-принтер, який друкує матрицю зі структурою шкіри та епідермісу з аутологічних клітин [50].

Лікування ран опікового походження є комплексним і включає як загальні, так і місцеві заходи, на останніх і був зосереджений наш огляд літератури. Незважаючи на технологічний прогрес останніх років, який підвищив ефективність лікування опіків та знизив рівень смертності, досі не створено ідеального біоматеріалу, здатного повністю імітувати структуру шкіри та відновлювати її функції, пігментацію, шкірні придатки, судини та

нерви. Найкращим трансплантатом залишається власна шкіра пацієнта, однак її кількість обмежена. Крім того, немає чітких критеріїв для вибору між хірургічним втручанням і консервативним лікуванням; це рішення часто приймається суб'єктивно і залежить від клінічного досвіду хірурга. Обравши хірургічну стратегію також хірург самостійно без чітких критеріїв обирає її варіант. Це підкреслює необхідність подальших досліджень для розробки стандартизованих підходів у лікуванні опіків, що допоможуть покращити клінічні результати для пацієнтів.

Висновки. На основі проведеного аналізу, було виявлено, що існуючі методи оцінки планіметричних характеристик та глибини опікових ран мають певні недоліки, зокрема, високу вартість і складність у використанні. Більшість із цих методів потребують значних витрат часу та ресурсів, що обмежує їхнє застосування в клінічних умовах. Це підкреслює необхідність подальших досліджень і розробок, спрямованих на створення більш доступних, простих у використанні та економічно вигідних методів, які б дозволяли точно визначати як площу, так і глибину опіку. Незважаючи на технологічний прогрес у лікуванні опіків, включаючи зниження рівня смертності, досі відсутні чіткі критерії для вибору між хірургічним та консервативним лікуванням, що залишає багато рішень на розсуд хірурга, а, отже, залежить від його клінічного досвіду.

Таким чином, для покращення діагностики та лікування пацієнтів з опіками необхідно розробити нові підходи та вдосконалити існуючі методики. Такі зусилля можуть суттєво покращити стандарти лікування та клінічні результати для пацієнтів з опіками, забезпечуючи краще управління їх станом і покращення якості їх життя.

Результати, подані у розділі 1, опубліковані наукових працях:

Фармага Т, Лукавецький О, Чемерис О. Методи оцінювання розмірів та глибини опікової рани. Proceedings of the Shevchenko Scientific Society. Medical Sciences [Internet]. 2024;76(2):27. [9]

РОЗДІЛ 2

КЛІНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ХВОРИХ ТА МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Загальна клінічна характеристика хворих

Робота виконана в опіковому відділенні для дорослих Міського центру термічної травми та пластичної хірургії відокремленого підрозділу «Лікарня Святого Луки» Комунального некомерційного підприємства «Львівське територіальне медичне об'єднання «Багатопрофільна клінічна лікарня інтенсивних методів лікування та швидкої медичної допомоги».

До дослідження було залучено 151 пацієнти з ранами опікового генезу. Ці хворі створили дослідну групу. Хворі перебували на стаціонарному лікуванні в 2019-2024 рр. Перед початком дослідження від усіх пацієнтів отримано письмову згоду на проведення обстеження відповідно до принципів Гельсінкської декларації прав людини, Конвенції Ради Європи про права людини і біомедицину, відповідних законів України та міжнародних актів.

Критерії залучення до дослідження: вік 18-65 років, відсутність тяжкої супутньої патології, зокрема цукрового діабету, наявність глибокого опіку (ІІб-ІІІ ступенів).

Критерії невключення у дослідження: важкі хронічні супутні хвороби; імунодефіцитні стани; хронічні рани верхніх та нижніх кінцівок; відмова підписання інформаційної згоди.

Отримано висновок комісії з питань етики Львівського національного медичного університету імені Данила Галицького (витяг № 6 від 29 жовтня 2022 року) про те, що дане дослідження відповідає чинним етичним та моральним нормам.

Аналізуючи гендерні особливості обстежених нами хворих (табл. 2.1.1, рис. 2.1.1), ми виявили значне переважання чоловіків (90 осіб, 59,6 %) над жінками (61 осіб, 40,4 %).

Таблиця 2.1.1 – Характеристика хворих з опіковими ранами залежно від статі

№ за/п	Стать	N	%
1	Чоловіки	90	59,6
2	Жінки	61	40,4
3	Усього	151	100,0

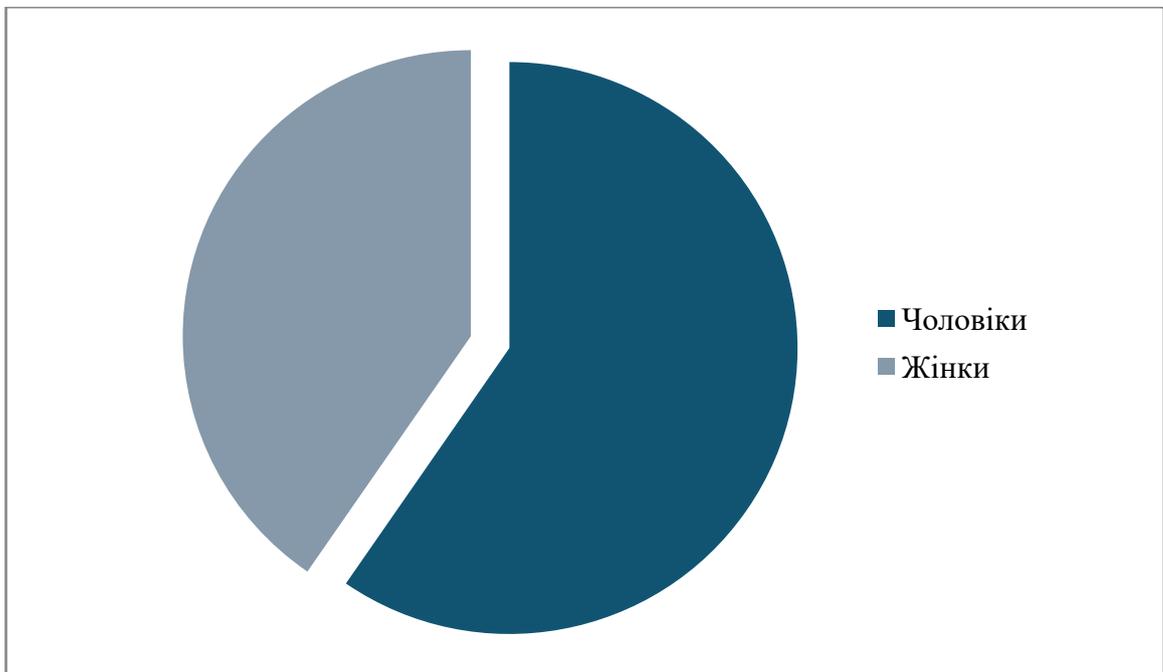


Рисунок 2.1.1 – Характеристика хворих з опіковими ранами залежно від статі

Для характеристики обстежених нами пацієнтів за віком, ми використали другу класифікацію Всесвітньої організації охорони здоров'я, згідно з якою визначено такі вікові межі: 18–29 років – молодий вік, 30–44 років – зрілий, 45–59 років – середній, 60–74 років – похилий, 75–89 років – старечий, 90 років і більше – довгожителі.

Як бачимо з таблиці 2.1.2 та рисунку 2.1.2, серед хворих переважали особи середнього віку (64 особи, 42,4 %). Ми виявили 53 особи зрілого віку (35,1 %), 31 – молодого віку (20,5 %) та 3 хворих похилого віку (2,0 %).

Таблиця 2.1.2 – Характеристика хворих з опіковими ранами залежно від віку на момент огляду

№ за/п	Вік на час огляду, роки	N	%
1	Молодий (18–29 років)	31	20,5
2	Зрілий (30–44 років)	53	35,1
3	Середній (45–59 років)	64	42,4
4	Похилий (60–74 років)	3	2,0
5	Усього	151	100,0

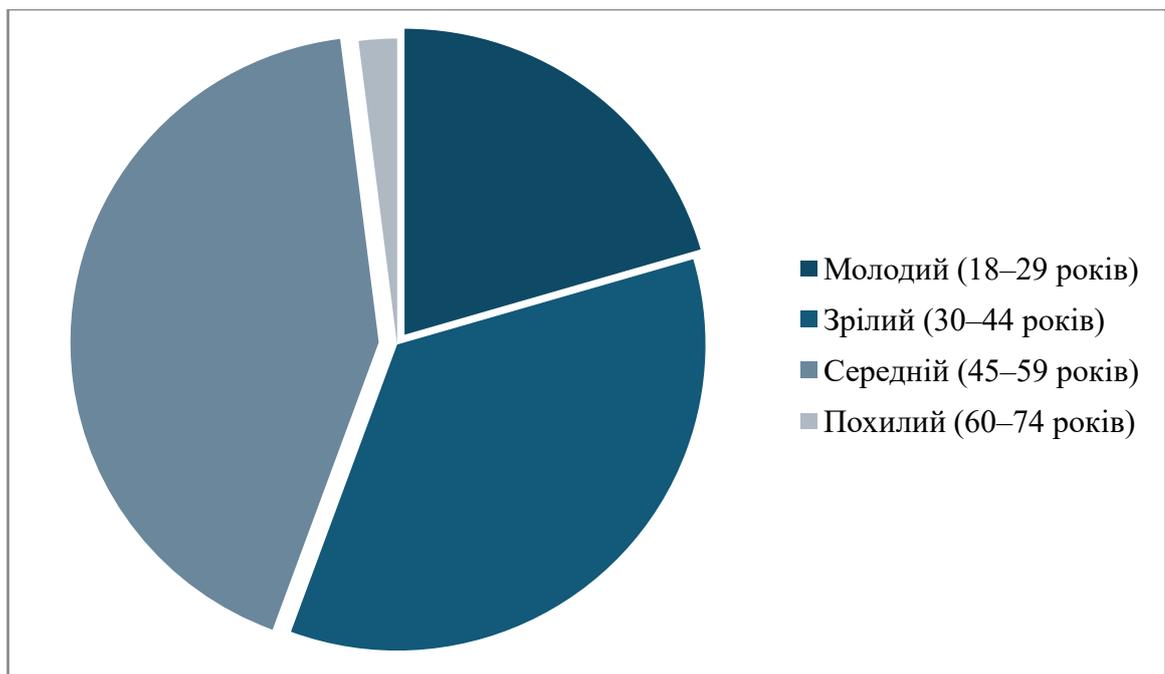


Рисунок 2.1.2 – Характеристика хворих з опіковими ранами залежно від віку на момент огляду

Серед обстежених нами хворих були пацієнти, що отримали опіки різного генезу. Через контакт з полум'ям опіки були у 71 хворий (47,0 %), контакт з

окропом привів до травмування 58 пацієнтів (38,4 %), а контакт із розжареним предметом – до ран у 22 хворих (14,6 %) (див. табл. 2.1.3, рис. 2.1.3).

Таблиця 2.1.3 – Характеристика хворих з опіковими ранами залежно від генезу отриманої травми

№ за/п	Генез опікової травми	N	%
1	Полум'я	71	47,0
2	Окріп	58	38,4
3	Розжарений предмет	22	14,6
4	Усього	151	100,0

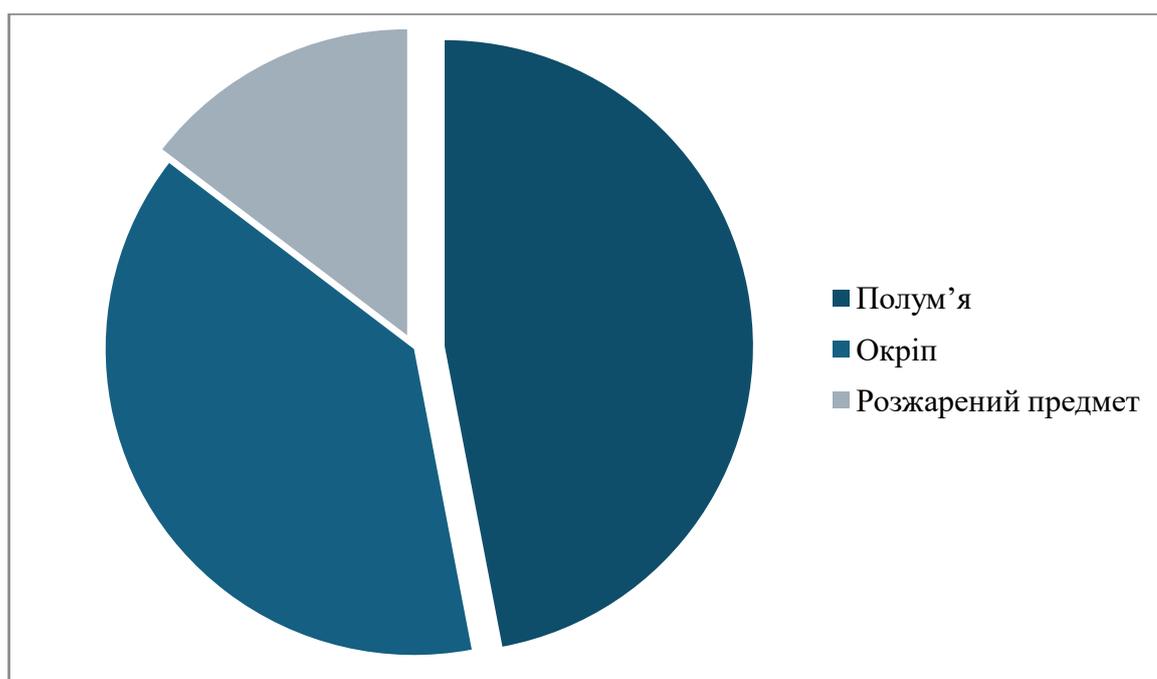


Рисунок 2.1.3 – Характеристика хворих з опіковими ранами залежно від генезу отриманої травми

Оцінивши загальну площу ураження кожного пацієнта, ми встановили, що у 34 пацієнтів (22,5 %) були обмежена площа опіків (1-9,9 %), у 57 хворих (37,7 %) – розповсюджені опіки (10-19,9 %), а у 60 хворих (39,7 %) – великі (обширні) опікові рани. Результати наведено у таблиці 2.1.4 та на рисунку 2.1.4.

Таблиця 2.1.4 – Характеристика хворих з опіковими ранами залежно від загальної площі ураження

№ за/п	Загальна площа ураження	N	%
1	Обмежена площа опіків (1-9,9 %)	34	22,5
2	Поширені опіки (10-19,9 %)	57	37,7
3	Великі (обширні) (20-29,9 %)	60	39,7
4	Усього	104	100,0

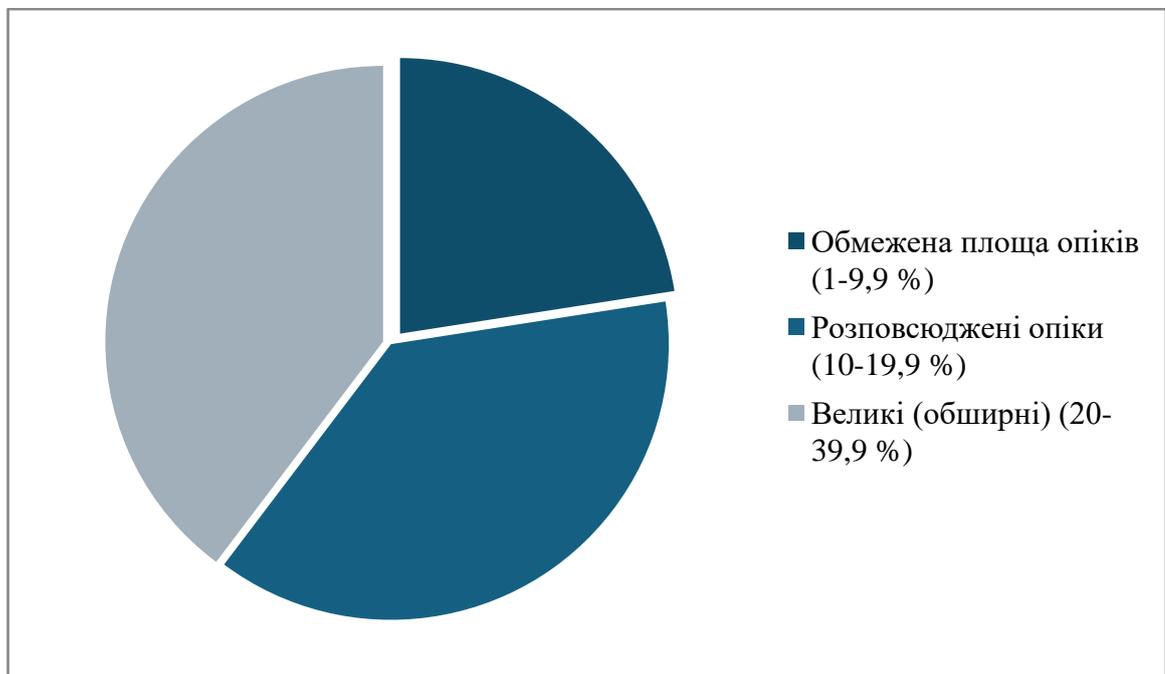


Рисунок 2.1.4 – Характеристика хворих з опіковими ранами залежно від загальної площі ураження

Локалізацію оцінювали окремо для кожної рани. Усього обстежені нами пацієнти мали 384 дефекти шкірного покриву. Розподіл за локалізацією ураження наведено у таблиці 2.1.5 та на рисунку 2.1.5. Найбільш часто зустрічалися опікові рани рук (106 ран, 27,6 %). Стопи та/або гомілки уражалися дещо рідше (87 ран, 22,7 %). Ми виявили 76 ран стегон (19,8 %) та 56 опікових ран тулуба (14,6 %). Було діагностовано 38 ран плечей (9,9 %) та 21 рану голови та/або шиї (5,5 %) серед обстежених нами пацієнтів.

Таблиця 2.1.5 – Характеристика опікових ран залежно від їх локалізації

№ за/п	Загальна площа ураження	N	%
1	Голова та/або шия	21	5,5
2	Тулуб	56	14,6
3	Плече	38	9,9
4	Кисть та/або передпліччя	106	27,6
5	Стегно	76	19,8
6	Гомілка та/або стопа	87	22,7
7	Усього	384	100,0

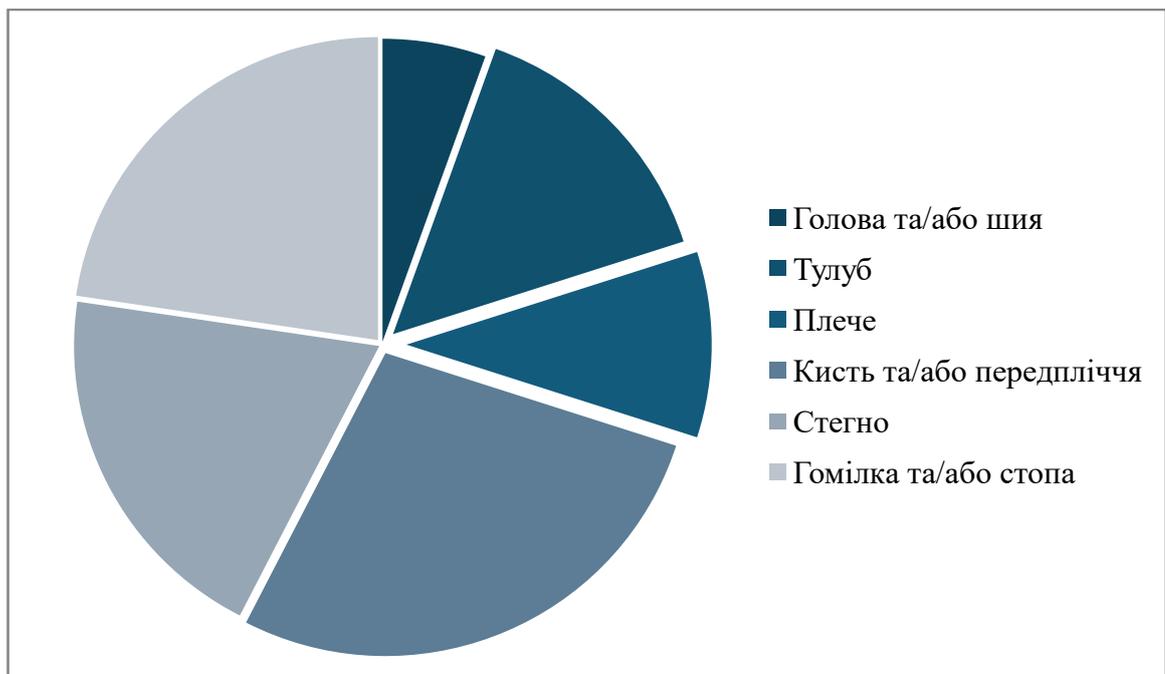


Рисунок 2.1.5 – Характеристика опікових ран залежно від їх локалізації

Глибину ураження ми не оцінювали стосовно кожного окремого випадку, так як кожна опікова рана є неоднорідною та містить частини поверхневого і глибокого опіку.

Для апробації запропонованого способу цифрової планіметричної вольнерометрії (розділ 3.1) було рандомізовано додатково 5 пацієнтів з післятравматичними ранами та 2 пацієнти з кусаними ранами.

Для визначення ефективності та переваг запропонованого нами способу лікування хворих з опіковими ранами (розділ 5) було в рандомізований спосіб розподілено на дві групи: дослідну (28 хворих) і контрольну (24 хворих), що були репрезентативними за статтю, віком, генезом, площею ураження та його локалізацією.

Отже, серед обстежених пацієнтів з опіковими ранами переважали чоловіки (59,4 %) працездатного (42,4 % середнього та 35,1 % зрілого) віку, що отримали травму переважно внаслідок контакту з полум'ям (47,0 %). Площа ураження у третини обстежених перевищувала 20,0 % загальної площі тіла (39,7 %) з переважною локалізацією ран на функціональних та видимих ділянках шкіри – на кистях та/або передпліччях (27,6 %) і гомілкях та/або стопах (22,7 %). Усе це свідчить про актуальність проблеми удосконалення діагностики та лікування ран опікового генезу, розв'язання якої має не лише медичне, але й соціальне значення.

2.2. Методологічні принципи та методики дослідження

Під час стаціонарного лікування усі пацієнти отримували медичну допомогу відповідно до актуальних клінічних протоколів та Стандарту медичної допомоги «Опіки» (Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 09.10.2023 № 1767). А саме хворим було проведено загальноклінічне обстеження, що полягало у зборі скарг, анамнезу хвороби та життя, наявності супутніх хвороб. Під час об'єктивного огляду було оцінено стан хворого в загальному – колір шкірних покривів, слизових оболонок, оцінювали функціональний стан дихальної, серцево-судинної, травної, сечовидільної системи систем, наявність неврологічної патології та хвороб м'язово-суглобової системи. Місцевий статус було обстежено детально з визначенням глибини та розмірів зони ураження.

Загально-лабораторні та біохімічні дослідження проводили у сертифікованій лабораторії відокремленого підрозділу «Лікарня Святого Луки»

Комунального некомерційного підприємства «Львівське територіальне медичне об'єднання «Багатопрофільна клінічна лікарня інтенсивних методів лікування та швидкої медичної допомоги».

Клінічний діагноз пацієнтів містив інформацію про генез опікової травми, глибину та площу ураження, а також його локалізацію.

Інформацію про етіологічний чинник (полум'ям, окріп, розжарений предмет тощо) було отримано із анамнезу хвороби від пацієнта чи осіб, що його супроводжували.

За глибиною ураження та змін, які виникають при дії термічних факторів опіки було стратифіковано за ступенями: I – поверхневі, IIa – поверхневі часткові, IIб – глибокі часткові, III – глибокі поверхневі. Клінічно опік I ступеня вважали за умови кольору зони ураження від рожевого до червоного, без пухирів, що супроводжувалися помірними больовими відчуттями у пацієнта. Опік IIa ступеня містив червоні пухирі, бліднів при натисканні, однак у місці ураження епідермальні придатки були неушкоджені. Хворі скаржилися на сильні больові відчуття. Опік IIб ступеня характеризувався незначними больовими відчуттями, шкіра під час огляду була суха, під час натискання не блідла. Глибокий опік III ступеня не супроводжувався болем, візуально шкіра була суха, біла або червона з поверхневим тромбозом судин.

Для об'єктивного визначення глибини опікового ураження використовували метод термографії. Термографію виконували за допомогою безконтактного термометра FLIR One (FLIR® Systems, Inc., Wilsonville, OR, USA) впродовж перших 48 годин після травми перед санацією рани та під час неї. За допомогою пристрою FLIR One, який під'єднали до планшету iOS (iPad 9, Apple, Inc., Купертіно, Каліфорнія, США), отримували теплові зображення. Зображення були зроблені двома камерами: тепловим датчиком Lepton™ (160x120 пікселів) і видимою камерою VGA (640x480 пікселів). Відповідно, було отримано два зображення, які об'єднуються за допомогою технології Multi Spectral Dynamic Imaging в одне теплове зображення з роздільною здатністю 640x480 пікселів. Камера FLIR One має температурний діапазон від -20°C до

+120°C і здатна виявляти різницю температур до 0,1°C. Під час отримання зображення пристрій знаходився паралельно поверхні тіла на відстані 30,0-40,0 см над опіковою раною з обов'язковим вимкненням нагрівальних ламп та інших зовнішніх джерел тепла для попередження помилок під час вимірювання. Усі вимірювання проводилися в операційній, де додатково також фіксувалася температура повітря кімнатним термометром (середня температура становила 23,6°C (діапазон 21,4-27,4°C)).

Аналіз зображень проводився у додатку FLIR One з фіксацією у одного пацієнта трьох температурних точок – температура здорової шкіри (на відстані ≥ 3 см проксимальніше опікової рани), температура поверхневого опіку (ділянки, що загоїлася самостійно), температура глибокого опіку (ділянки, що вимагала висічення), а також оцінювали різницю температур між ділянками, що було виражена як ΔT (°C).

Площу опіку оцінювали за допомогою правила «долоні», «дев'яток», комп'ютерної програми для цифрової планіметричної вульнерометрії «Аналізатор рани» та, у випадку оцінки точності результатів планіметрії за допомогою комп'ютерної програми, контактним методом R. W. Sessions [5].

Правило «долоні» базується на принципі, що всі частини тіла та органи в організмі людини співвідносяться між собою. А саме площа шкіри, яка вкриває долоню (без урахування пальців), складає приблизно один відсоток від загальної площі шкірного покриву організму. Таким чином, приклавши долоню над опіком можна встановити приблизний відсоток ураженої області.

Відповідно до того ж принципу співвідношення частин тіла між собою відомо, що площа шкірного покриву різних частин тіла складає близько 9% чи кратна цьому числу. Розподіл цих відсотків виглядає наступним чином:

- 9% – голова і шия (по 4,5% на передню і задню проекції).
- 2 x 9% – руки (по 4,5% на передню і задню проекції).
- 18% – груди/спина (вище діафрагми) (по 9% на передню і задню проекції)

- 18% – живіт/поперек і сідниці (нижче діафрагми) (по 9% на передню і задню проекції)
- 2 x 18% – ноги (по 9% на передню і задню проекції)

Для визначення розмірів та морфометричних характеристик ран у дослідженні застосовувалася спеціалізована комп'ютерна програма «Аналізатор рани», створена для аналізу цифрових зображень. Використання програмного забезпечення дозволяло стандартизувати процес вимірювання площі та периметру ранової поверхні, мінімізувати похибки, пов'язані з суб'єктивними оцінками, та забезпечити збереження результатів у цифровому форматі.

Зображення ран отримувалися двома методами:

- 1) Безконтактний метод. Фотографування проводили цифровим апаратом, розташованим перпендикулярно до поверхні рани. Для забезпечення точності вимірювань у кадр обов'язково включали шкалу-лінійку, що дозволяла здійснити подальше калібрування. Ділянку рани зосереджували в центральній частині знімка, так щоб вона займала не більше 50 % площі кадру.
- 2) Контактний метод. У випадках, коли ранова поверхня була нерівною або мала складний рельєф, контур рани переносили на стерильну прозору плівку (наприклад, «Foliodrape», «Visitrak grid»). Отримані плівки сканували або фотографували разом із шкалою-еталоном. Це дозволяло відтворити форму рани з високою точністю навіть за умов складної топографії.

Отримані зображення завантажувалися у програму у стандартних графічних форматах (*.bmp, *.jpg, *.jpeg, *.png, *.tif, *.tiff). Першим етапом роботи було калібрування одиниць вимірювання (у мм або см) за шкалою, що була присутня на зображенні. Далі здійснювалося нанесення контуру рани у вигляді полігональної лінії, що повторювала її межі. Після завершення цього

етапу програма автоматично виконувала математичні розрахунки та виводила на екран значення площі та периметру.

Програмне забезпечення також забезпечувало збереження кожного результату у базі даних. Це дозволяло не тільки фіксувати окремі параметри, але й формувати серії вимірювань для конкретного пацієнта з можливістю відстеження динаміки загоєння упродовж усього періоду лікування. Завдяки архіву цифрових даних можна було здійснювати повторний аналіз результатів, формувати масиви для статистичної обробки, а також будувати графічні залежності перебігу процесу загоєння.

У дослідженні програмне забезпечення використовувалося як метод кількісної оцінки, що доповнював клінічне обстеження. Окрім основних морфометричних характеристик, у програмі передбачалася можливість фіксації додаткових даних (наприклад, цитологічних або мікробіологічних характеристик, кислотності, характеру виділень, особливостей місцевого лікування). Завдяки цьому забезпечувалося формування уніфікованого протоколу спостереження, який міг бути долучений до медичної документації.

Таким чином, використання комп'ютерної програми «Аналізатор рани» у даному дослідженні виступало одним з основних інструментів об'єктивної оцінки перебігу ранового процесу та дозволяло отримати кількісні дані, необхідні для подальшої статистичної обробки.

Фактичний матеріал опрацьовано на персональному комп'ютері з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel, де застосовано методи описової статистики, t-критерій Стьюдента, z-критерій для порівняння двох часток, методи лінійної регресії та визначення показників діагностичної і прогностичної цінності. Діагностичну точність методу оцінювали за допомогою програми SPSS.

Побудову ROC-кривих і розрахунок площі під кривою (AUC) виконували безпосередньо у середовищі Python, що забезпечило більш точне числове визначення діагностичної ефективності моделей. Для підвищення точності

диференційної діагностики глибини опікових уражень додатково застосовано моделі машинного навчання — Random Forest та Logistic Regression, реалізовані у середовищі Python із використанням бібліотек scikit-learn, pandas та numpy. Моделі навчалися на основі клінічних і термографічних параметрів, зокрема мінімальної та максимальної температури в рані, різниці температур зі здоровою шкірою, часу капілярного рефілу, кольору рани та наявності пухирів. Оцінювання якості класифікації здійснювали за допомогою показників Confusion Matrix, Precision, Recall, F1-score та Accuracy. Для визначення внеску окремих ознак у кінцевий результат диференціації проведено аналіз feature importance, що дозволило виділити найбільш інформативні параметри для прогнозування глибини ураження.

Отримані результати наведено у вигляді $M \pm m$ або $M (p_1; p_2)$, де M — середнє арифметичне, m — стандартне відхилення, n — кількість обстежених пацієнтів у групі, p_1 — нижня межа 95%-го довірчого інтервалу середнього арифметичного, p_2 — верхня межа 95%-го довірчого інтервалу середнього арифметичного, \max — максимальне значення, \min — мінімальне значення, med — медіана. Статистично достовірною вважали різницю, якщо $p < 0,05$.

РОЗДІЛ 3

ОПТИМІЗАЦІЯ ДІАГНОСТИКИ ОПІКОВИХ РАН

3.1. Цифрова комп'ютерна планіметрія ранових дефектів

Під час вибору лікувальної тактики у хворих з опіками не залежно від походження дефекту шкірного покриву, особливу увагу слід приділяти визначенню розмірів рани. При динамічному спостереженні за пацієнтом важливо також отримати інформацію про швидкість зменшення розмірів дефекту, яка б дала змогу правильно корегувати лікування та передбачити ймовірні терміни остаточного одужання хворих. Необхідність об'єктивної оцінки розміру рани виникає і в комбустіології та реконструктивній хірургії, коли потрібно точно знати площу рани, щоб вирахувати кількість донорської шкіри чи величину шкірного клаптя для трансплантації. Ці дані потрібно отримати швидко та безпосередньо перед або під час операційного втручання [8, 74].

Під час створення інструменту для клінічної практики ми врахували потреби медичного закладу, лікуючого персоналу та самого пацієнта. Основними критеріями стали простота у використанні, надійність та доступність технології для практикуючого лікаря, незалежно від його технічної підготовки.

У результаті нами був розроблений програмне забезпечення під назвою «Аналізатор ран», що дозволяє швидко та об'єктивно визначати площу ураження. Система створена так, щоб її можна було застосовувати на звичайних робочих комп'ютерах у лікувальному закладі. Використання відбувається через зручний інтерфейс, що не потребує складних налаштувань, а введення даних здійснюється у зрозумілій для лікаря формі. Додатково передбачена авторизація користувачів, що гарантує безпеку персональних даних пацієнтів.

Для подальшого розвитку ми передбачили можливість інтеграції «Аналізатора ран» з іншими інформаційними системами лікарні та використання сучасних хмарних технологій. Це забезпечує масштабованість, доступ до даних з різних робочих місць і відповідає сучасним нормативним вимогам у сфері охорони здоров'я, включаючи положення Закону України «Про хмарні послуги» [6].

Таким чином, створений нами інструмент пропонує лікарю зручний і швидкий спосіб отримання клінічно значущих даних про розмір ушкодження. Його структура включає робочі комп'ютери користувачів, локальну мережу медичного закладу, серверну базу даних і хмарну інфраструктуру, яка дозволяє масштабувати систему та інтегрувати її в існуюче медичне середовище (див. рис. 3.1.1).

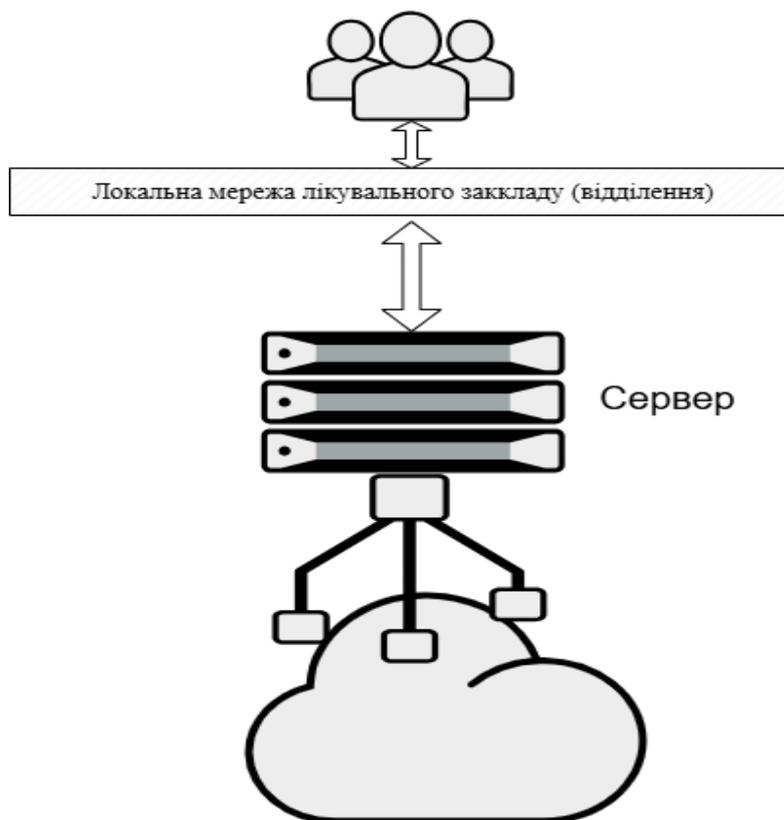


Рисунок 3.1.1 (а) – Структура технічного забезпечення для цифрової комп'ютерної планіметрії ранових дефектів - використання власного сервера з інформаційним інтерфейсом до хмарної інфраструктури

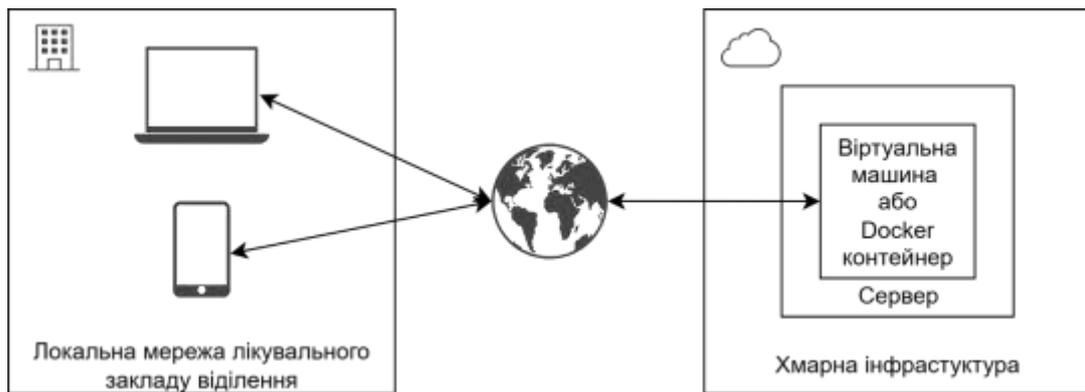


Рисунок 3.1.1 (б) – Структура технічного забезпечення для цифрової комп’ютерної планіметрії ранових дефектів - використання віртуалізації для інтегрування в хмарне середовище

Один із можливих варіантів архітектури передбачає розгортання програмного забезпечення у вигляді образу віртуальної машини. Такий образ може бути встановлений як на сервері медичного закладу, так і на орендованому хмарному ресурсі. Подібний підхід до побудови програмно-серверної системи значно підвищує гнучкість та масштабованість рішення, а також забезпечує стабільний доступ до програми. Крім того, ізоляція додатка від базової операційної системи гарантує більшу надійність та безпеку роботи.

Розподілена структура дозволяє користуватися програмним забезпеченням з будь-якої платформи — Windows, Android, Linux, iOS та інших. Це дає можливість декільком лікарям одночасно працювати у віддаленому режимі, навіть перебуваючи в різних лікувальних установах чи містах, що значно розширює функціональність інструменту та полегшує міждисциплінарну взаємодію.

З урахуванням цих вимог розроблена програма «Аналізатор ран» дозволяє швидко та об’єктивно оцінювати планіметричні характеристики ушкодження, проводити моніторинг динаміки загоєння та зберігати дані для подальшого використання. Основні переваги розробки:

- 1) простота у використанні як для лікаря, так і для пацієнта;
- 2) можливість отримувати результати у режимі реального часу;
- 3) відсутність потреби у спеціальному додатковому обладнанні;
- 4) наявність єдиної бази даних установи для зберігання інформації про пацієнтів;
- 5) висока точність вимірювань;
- 6) універсальність використання в різних клінічних умовах;
- 7) можливість організації дистанційних консультацій.

Запропонований спосіб цифрової планіметричної вульнерометрії є аналогом відомих методів [114] і включає три послідовні етапи: отримання зображення рани у цифровому форматі, його обробка спеціальними алгоритмами та збереження результатів в базі даних. На першому етапі використовують звичайний цифровий фотоапарат або смартфон, зображення з якого синхронізується через хмарне середовище (наприклад, One Drive) із комп'ютером користувача.

Для програмної реалізації було використано сучасні інструменти, що забезпечують стабільну роботу та високу точність аналізу. Основою стала об'єктно-орієнтована мова програмування **C++11**, для створення зручного інтерфейсу застосовано високорівневий інструментарій **Qt**, для зберігання медичних даних — систему керування реляційними базами даних **MySQL**, а для обробки зображень — бібліотеку **OpenCV**, яка дозволяє застосовувати алгоритми комп'ютерного зору.

Оброблення зображення полягає в автоматичному визначенні площі ушкодженої ділянки після попереднього ручного окреслення її контурів. Для цього лікар або користувач у зручному інтерактивному режимі наносить на зображення низку точок, які утворюють замкнений полігон, що відображає межі ушкодження (функція **contourArea**). Площа цього полігона автоматично розраховується програмою за допомогою вбудованого алгоритму. Додатково на зображенні позначається контрольний відрізок («лінійка»), довжина якого у пікселях використовується як масштаб для переведення отриманої площі з

квадратних пікселів у реальні одиниці вимірювання — квадратні сантиметри чи метри.

Щоб зробити процес максимально зручним, використовується багатошаровий підхід: полігон із виділеною раною накладається на вихідне зображення, і лікар отримує сумарне зображення з чітко позначеними межами дефекту та числовими результатами. Це дозволяє поєднати об'єктивність комп'ютерних розрахунків із клінічним баченням спеціаліста.

Алгоритм роботи програми:

- 1) Завантажити зображення з ураженням — з бази даних або безпосередньо з носія (диску, камери смартфона) за допомогою функції **imread**.
- 2) Виділити контур рани — користувач окреслює межі, після чого програма автоматично розраховує площу полігону, що їх утворює (з допомогою функції **contourArea**).
- 3) Визначити масштаб — для цього використовується «лінійка», нанесена на зображення. Її довжина у пікселях дозволяє перевести площу з умовних одиниць (квадратних пікселів) у квадратні сантиметри або метри.

Примітка: якщо на фото відсутня лінійка, масштаб можна задати за допомогою об'єкта з відомими розмірами. У нашій роботі ми застосовували ширину нігтя, яка становить 10 мм.

- 4) Зберегти результати — дані автоматично записуються у базу або на диск, що дозволяє зберігати історію спостережень.

У подальшому ми детально розглянемо наведені етапи алгоритму та проілюструємо їх графічними прикладами.

Для реалізації інформаційного забезпечення програмного модуля «Аналізатор ран» використано систему керування базами даних **MySQL**, що забезпечує надійне збереження та обробку медичних зображень. Вибір цієї системи зумовлений її доступністю та широкими можливостями для інтеграції з клінічними інформаційними ресурсами. У створеній базі даних зберігаються

цифрові зображення ран пацієнтів, що дозволяє формувати єдиний масив даних для подальшого клінічного аналізу, оцінки динаміки загоєння та стандартизованого порівняння результатів лікування. Структура бази даних організована таким чином, щоб відповідати принципам третьої нормальної форми, що мінімізує дублювання інформації та підвищує достовірність і відтворюваність результатів (див. рис. 3.1.2).

Name	Type	Length	Decimals	Allow Null	
▶ ID	int	11	0	<input type="checkbox"/>	
WoundID	int	11	0	<input type="checkbox"/>	
SurveyDate	datetime	0	0	<input type="checkbox"/>	
Notes	varchar	1024	0	<input checked="" type="checkbox"/>	
Image	longblob	0	0	<input type="checkbox"/>	
Polygons	blob	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	
RulerPoints	blob	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	
RulerFactor	double	11	4	<input checked="" type="checkbox"/>	

Рисунок 3.1.2 – Структура таблиці оброблених зображень ушкоджень
(Surveys)

Як видно на рисунку 3.1.2, структура таблиці оброблених зображень ушкоджень включає:

- ID – ідентифікатор зображення (ключове поле);
- WoundID – ідентифікатор ушкодження, якому належить дане зображення;
- SurveyDate – дата створення зображення;
- Notes – деякі текстові примітки, які може залишити користувач для цього зображення;
- Image – набір байтів, необроблене зображення ушкодження в форматі *.jpg;
- Polygons – набір байтів, вектор полігонів;
- RulerPoints – набір байтів, вектор точок лінійки;
- RulerFactor – дійсне число, коефіцієнт при множенні на довжину лінійки.

Для забезпечення можливості точного відтворення та збереження контурів ушкоджень (полігонів) у базі даних застосовано спеціальні алгоритми

перетворення графічної інформації у цифровий формат, що дозволяє уникнути втрати даних. Для цього використовується процедура **QByteArray packPolygons()**.

У масив **QByteArray** спочатку записуються розміри в байтах базових типів **int** та **double**, оскільки для різних компіляторів згідно стандартом вони можуть відрізнятися. Після цього записується кількість полігонів та для кожного полігона всі його точки.

У подальшому ці контури можуть бути відновлені у первинному вигляді для клінічного аналізу. Аналогічний принцип використовується при роботі з вимірювальними інструментами (лінійками), що дає можливість стандартизовано фіксувати розміри ушкоджень.

Для збереження та завантаження цифрових зображень використано бібліотеку **OpenCV**, що дозволяє швидко і без втрати якості кодувати та декодувати фотоматеріали. Це забезпечує лікарям доступ до необроблених зображень ушкоджень у будь-який момент спостереження.

Метод візуального співставлення ушкоджень розроблено як інструмент для клініцистів з метою об'єктивного відстеження перебігу ранового процесу. Використання цього підходу дозволяє аргументовано робити висновки щодо позитивної динаміки загоєння чи, навпаки, прогресування патологічного процесу.

Наявність структурованої бази даних цифрових зображень та описових характеристик ушкоджень відкриває можливості не лише для рутинного клінічного моніторингу, а й для подальших наукових досліджень, статистичного аналізу та демонстрації ефективності застосованих методик лікування.

Модель даних підсистеми аналізу ушкоджень включає стандартизовані медичні документи з відповідними полями для введення клінічної інформації. Дані можуть вводитися лікарем вручну або обиратися з запропонованих довідників, що мінімізує ймовірність помилок. Гнучкість моделі дозволяє адаптувати систему під потреби конкретного клінічного відділення,

розширювати перелік полів, редагувати їх відповідно до вимог медичної практики. Таким чином, створюється уніфікований алгоритм опрацювання клінічної інформації, який забезпечує відтворюваність, стандартизацію та високу якість медичних даних.

Нижче огляд послідовності дій, необхідних для реалізації основних функцій програмного комплексу «Аналізатор ран».

На початковому етапі проводиться підготовка робочого середовища. Вибір технічної платформи (персональний комп'ютер, ноутбук, планшет чи мобільний пристрій) визначається умовами клінічної практики та доступністю ресурсів у медичному закладі. Основною вимогою для коректної роботи є наявність сучасного веб-браузера, що забезпечує швидке та безпечне функціонування системи. Найбільш зручним для повсякденного використання вважається стаціонарний комп'ютер або ноутбук, проте можливість роботи з планшета чи смартфона дозволяє лікарю здійснювати моніторинг навіть поза межами клініки.

З урахуванням обраних характеристик середовища формується виконувальний модуль програми та створюється база даних відповідно до розробленої концептуальної моделі (рис. 3.1.3). При необхідності передбачена міграція даних із попередніх технічних платформ за допомогою стандартних інструментів адміністрування **MySQL**, що дозволяє зберегти цілісність та безперервність клінічної інформації.

Важливим етапом є реєстрація користувачів у системі. Для лікаря створюється індивідуальний обліковий запис із паролем доступу. Передбачена можливість входу під одним іменем декількох користувачів, що дає змогу асистентам чи колегам лікаря отримувати доступ до тих самих клінічних даних пацієнта, забезпечуючи командну роботу та безперервність процесу лікування. Такий підхід сприяє більшій інтеграції медичного персоналу та підвищує ефективність спостереження за пацієнтом.

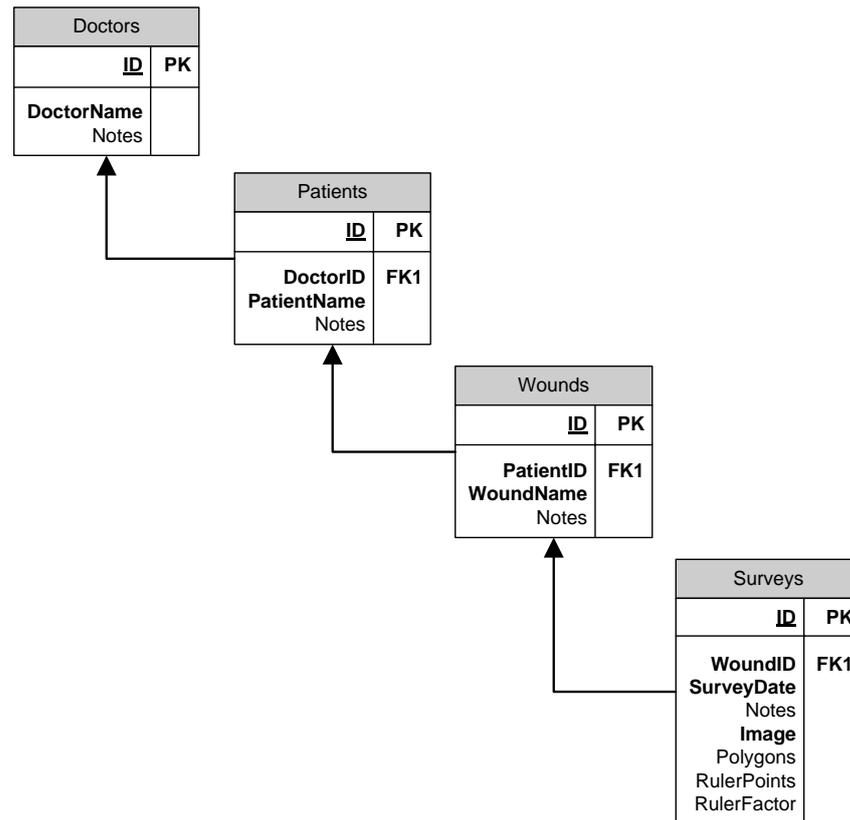


Рисунок 3.1.3 – Структура концептуальної моделі даних оброблення зображень ушкоджень

Додатково виконується налаштування мережевого середовища (локальна та глобальна мережа) з урахуванням вимог безпеки та конфіденційності медичних даних. Для кожного користувача визначаються рівні доступу та права роботи з інформацією, що забезпечує відповідність нормативним вимогам і захист персональних даних пацієнтів.

Таким чином, підготовчий етап є критично важливим для подальшої роботи програми «Аналізатор ран», оскільки саме він визначає стабільність функціонування програмного комплексу, зручність доступу для лікарів та асистентів, а також надійність збереження медичної інформації.

Розпочинаючи роботу з програмним забезпеченням «Аналізатор ран», першочергово потрібно перевірити чи є в переліку процесів нашого комп'ютера програма (ім'я – **WoundAnalyzerOnline.exe**) (див. рис. 3.1.4).

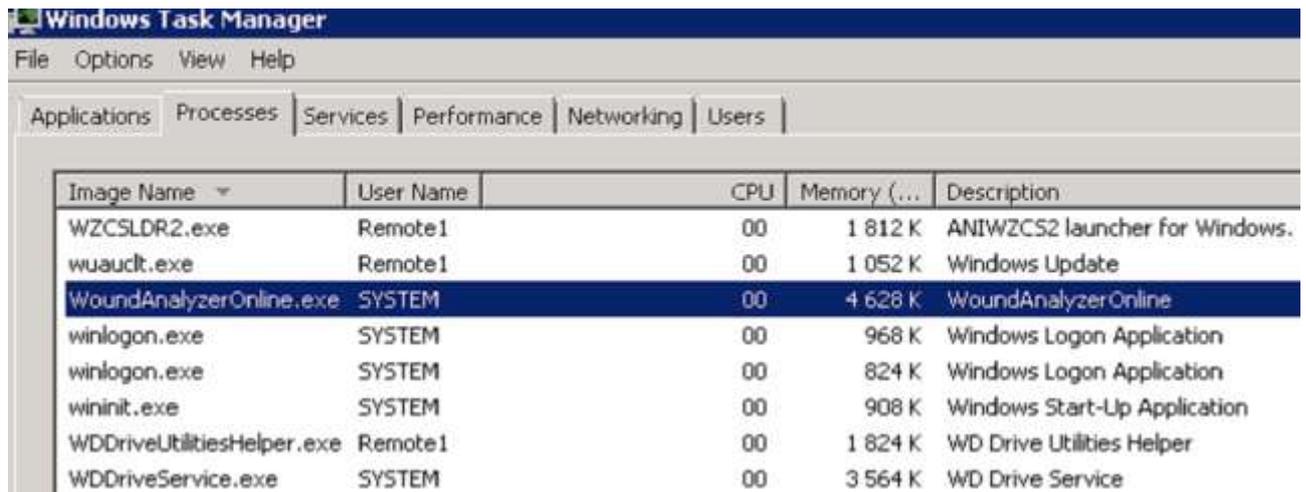


Рисунок 3.1.4 – Перевірка наявності програмного модуля WoundAnalyzerOnline.exe в операційному середовищі сервера

Наступним кроком є запуск програми «Аналізатор ран». У браузері користувачького комп'ютера необхідно вказати IP адресу сервера та номер порта, які призначив системний адміністратор. У відповідь повинно з'явитись вікно програми (див. рис. 3.1.5).



Рисунок 3.1.5 – Вікно програми «Аналізатор рани»

Після появи вікна необхідно натиснути кнопку **Log in**, вказати ім'я користувача і пароль (див. рис. 3.1.6).

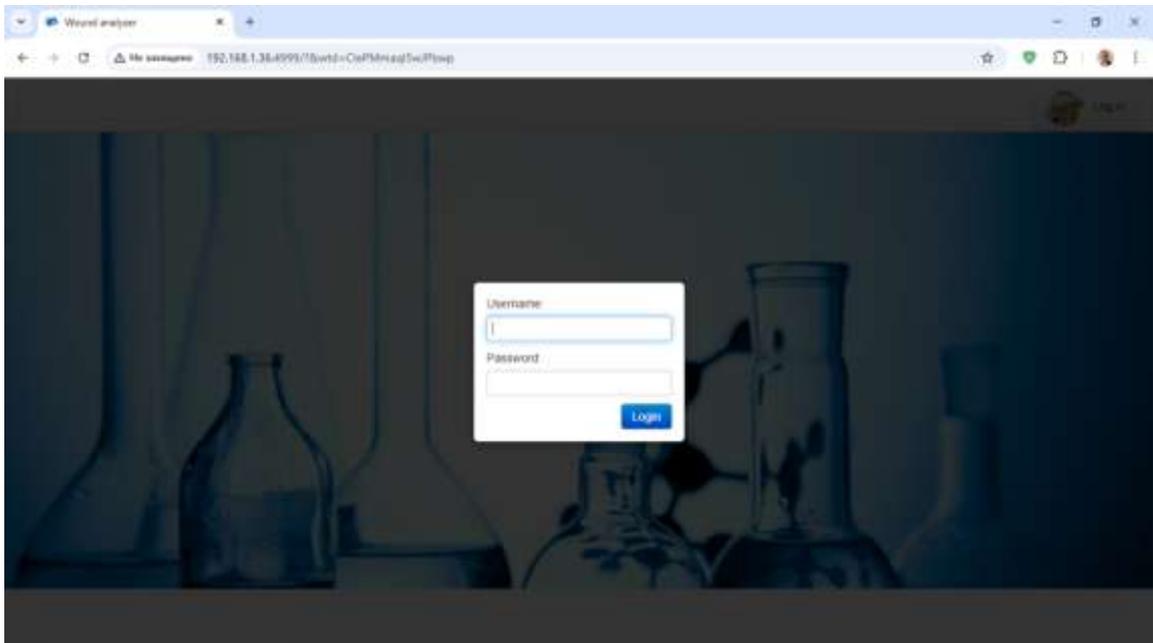


Рисунок 3.1.6 – Вікно програми «Аналізатор рани» для введення ім'я користувача та паролю

У відповідь з'являється головне вікно програми (див. рис. 3.1.7).

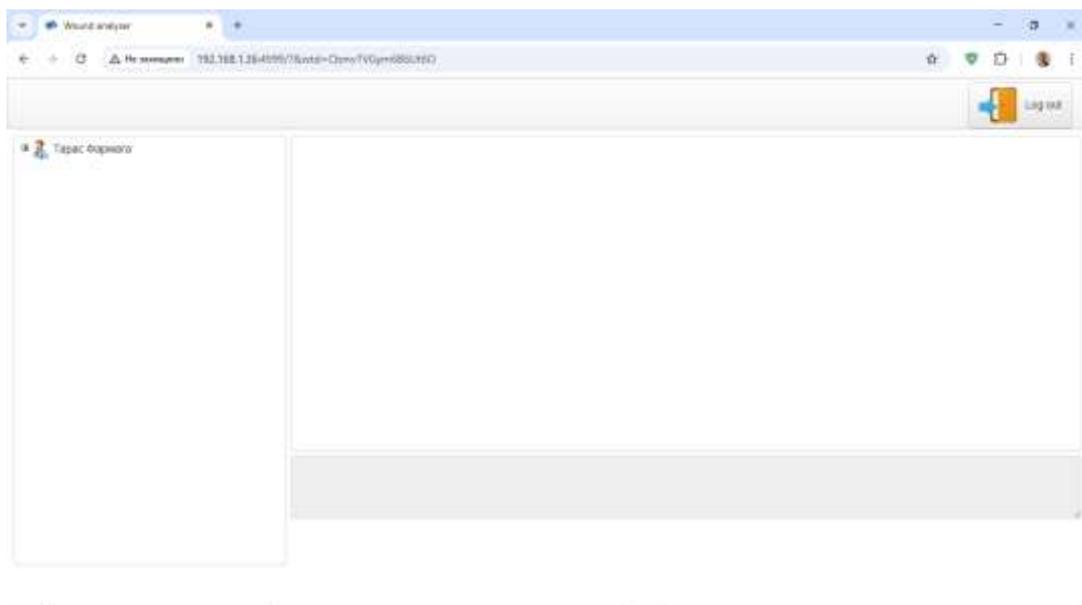


Рисунок 3.1.7 – Головне вікно програми «Аналізатор рани»

На рисунку 3.1.8 вказано вікно користувача – лікаря Тараса Фармаги. Є можливість за допомогою інструментів **Edit doctor** вказувати дані про лікаря. Можна описати колектив, який працює під заданим іменем. За допомогою інструменту **Add patient** додається пацієнт. Дерево даних для лікаря має такий вигляд, що на рисунку 3.1.8.

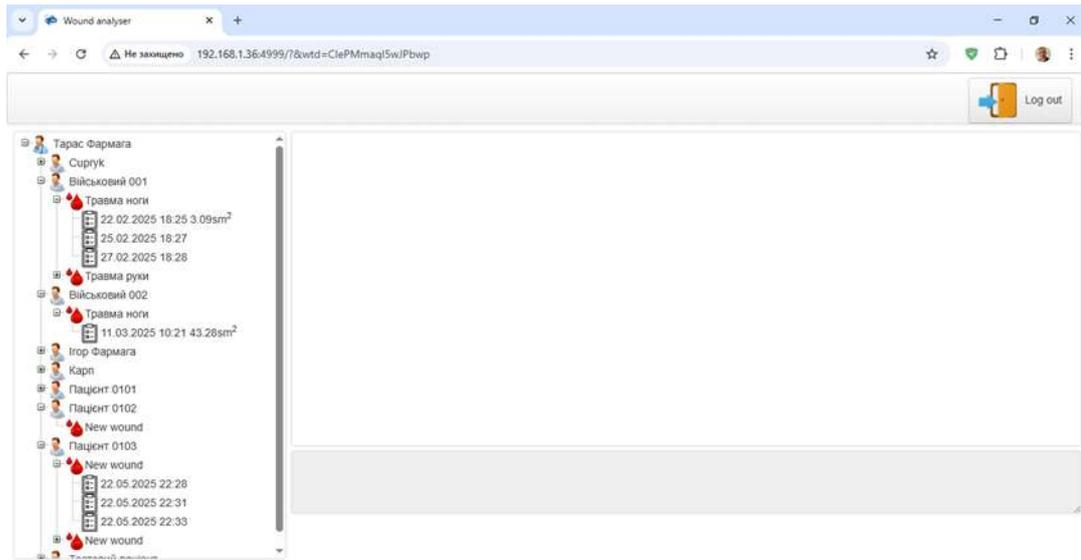


Рисунок 3.1.8 – Дерево даних програми «Аналізатор рани» користувача – лікаря Тараса Фармаги

Для кожного пацієнта передбачена можливість додавати цифрові зображення ушкоджень за допомогою функції **Add wound**. Редагування персональних даних пацієнта та описів проведеного лікування здійснюється через функцію **Edit patient**, а у випадку необхідності пацієнта можна видалити за допомогою **Delete patient**. Інтерфейс програми розроблений як простий та інтуїтивно зрозумілий, що дозволяє медичному персоналу швидко оволодіти навичками роботи з ним без потреби у спеціальній технічній підготовці. Використання системи не потребує складних інструкцій чи тривалого навчання, а всі основні функції доступні у декілька кліків. Завдяки цьому лікар може зосередитися на клінічному аналізі та ухваленні рішень, а не на технічних аспектах роботи з програмним забезпеченням (див. рис. 3.1.9)

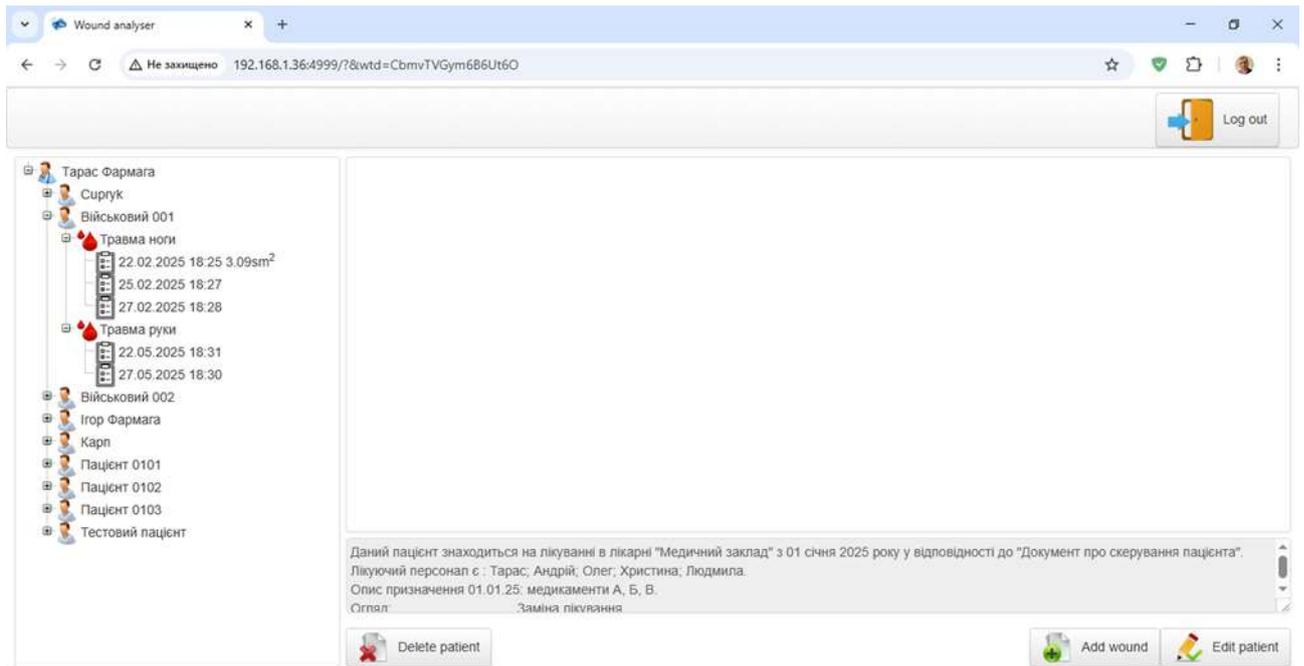


Рисунок 3.1.9 – Робоче вікно програмного комплексу «Аналізатор ран»

Одним із ключових етапів роботи в системі «Аналізатор ран» є відкриття та редагування цифрових зображень ушкоджень, що описано нижче. Для початку лікар створює нового пацієнта (**Add patient**) або обирає вже існуючого з переліку (навігація здійснюється за допомогою дерева пацієнтів). Для конкретного пацієнта можна додати інформацію про ушкодження (**Add wound**), вказавши його назву (наприклад, «Травма правої нижньої кінцівки», «Вогнищеве обширне пошкодження з тканинним дефектом на правій верхній кінцівці» або «Рана лівої гомілки») та додатковий опис. Цей опис у подальшому може бути використаний іншими лікарями під час мультидисциплінарних консультацій. За потреби назву та опис рани можливо змінити за допомогою функції **Edit wound**.

Для кожного ушкодження лікар може прикріпити кілька варіантів зображень, що відповідають різним етапам спостереження (**Add survey**). Відкриття існуючих зображень здійснюється через команду **Open** або за допомогою відповідної піктограми у вигляді папки, що викликає діалогове вікно вибору файлів.

Система підтримує найбільш поширені формати медичних зображень: ***.bmp, *.jpg, *.jpeg, *.png, *.tif, *.tiff**. Це забезпечує сумісність з цифровими фотоапаратами та камерами смартфонів, які можуть бути синхронізовані з комп'ютером користувача через хмарні сервіси (наприклад, **OneDrive**).

Приклад наведено на рисунку 3.1.10, де показано відкривання файлів із папки, що містить оригінальні зображення ушкоджень, отримані в процесі клінічного спостереження за пацієнтом.

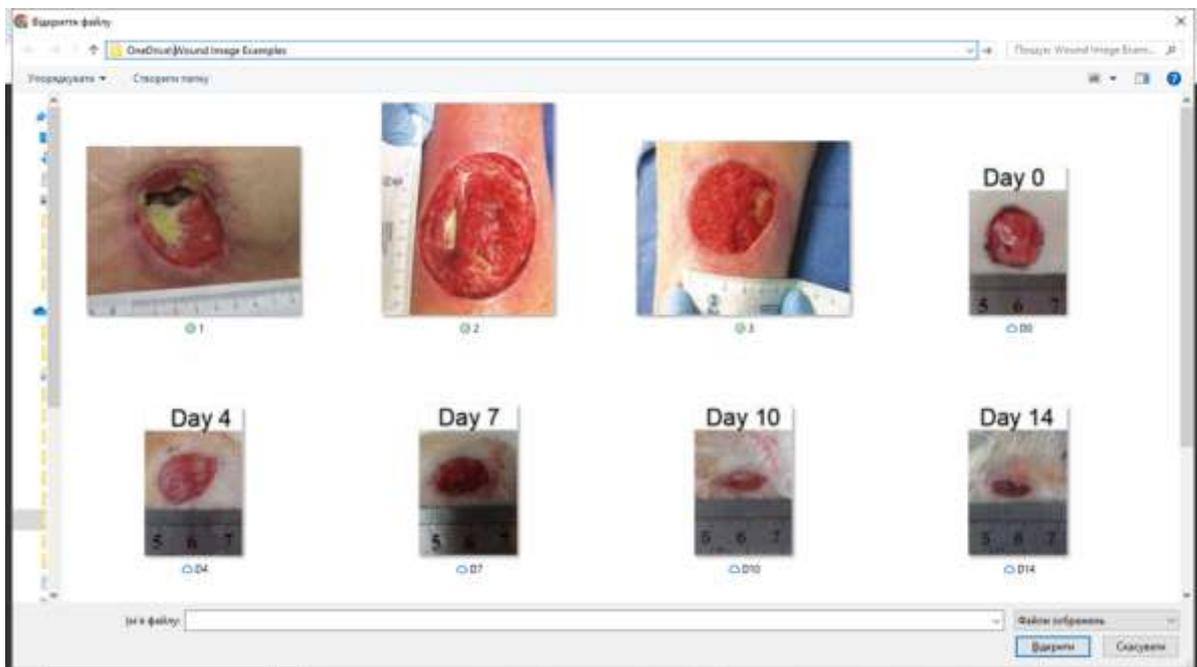


Рисунок 3.1.10 – Вигляд папки з оригінальними зображеннями під час завантаження їх у програму «Аналізатор рани»

У розділі опису рани та клінічних спостережень передбачена можливість додавання посилань на зображення, що зберігаються у хмарному середовищі (наприклад, **Wound Image Examples**). Такий підхід дозволяє лікарю швидко отримувати доступ до повного архіву фотоматеріалів, незалежно від місця його збереження, а також спрощує колективний доступ для консилиумів чи дистанційних консультацій.

Для збереження доданого зображення у базі даних використовується кнопка підтвердження **Accept**, що гарантує фіксацію змін. У випадку відмови

від дії або помилкового завантаження передбачена можливість скасування операції за допомогою кнопки **Cancel**. Це забезпечує контрольованість та безпомилковість процесу внесення медичних даних у систему.

Коли зображення вже додане у програму можна переходити до наступного етапу – позначення контурів ураження. На завантаженому зображенні для визначення меж ураження обираємо команду **Edit Survey**, а далі команду **Polygon** або відповідну піктограму під час додавання чи редагування зображення. Тоді програма переходить у режим **Polygon mode** – підтвердження цього можна побачити на панелі стану внизу головного вікна.

Для позначення контурів ураженої ділянки встановлюємо опорні точки, послідовно клацаючи лівою кнопкою миші по зображенню, як це видно на рисунку 3.1.11.



Рисунок 3.1.11 – Встановлення опорних точок на зображенні ушкодження у програмі «Аналізатор рани»

За потреби можна створити кілька контурів ураження. Для цього вмикаємо режим **Polygon mode** командою **Polygon**, а потім знову його вмикаємо. Попередній контур зберігається, а нові клацання мишею формують наступний полігон.

Якщо була допущена помилка, зображення очищується командою **Clear** або відповідною піктограмою.

Для редагування вже нанесених контурів необхідно вимкнути **Polygon mode**. Програма переходить у режим **Edit mode** (це видно на панелі стану внизу вікна). При наведенні курсору на опорні точки чи лінії вони

підсвічуються для зручності корекції. Кожна встановлена опорна точка може бути зміщена, як це показано на рисунку 3.1.12.

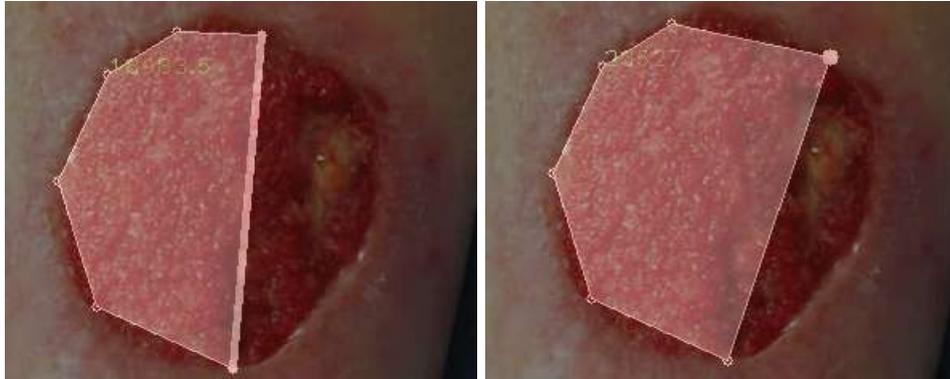


Рисунок 3.1.12 – Зміна положення опорної точки під час редагування контуру зображення у програмі «Аналізатор рани»

Якщо є потреба, кожна опорна точка може бути видалена. Для цього потрібно натиснути праву кнопку миші по ньому (див. рис. 3.1.13).

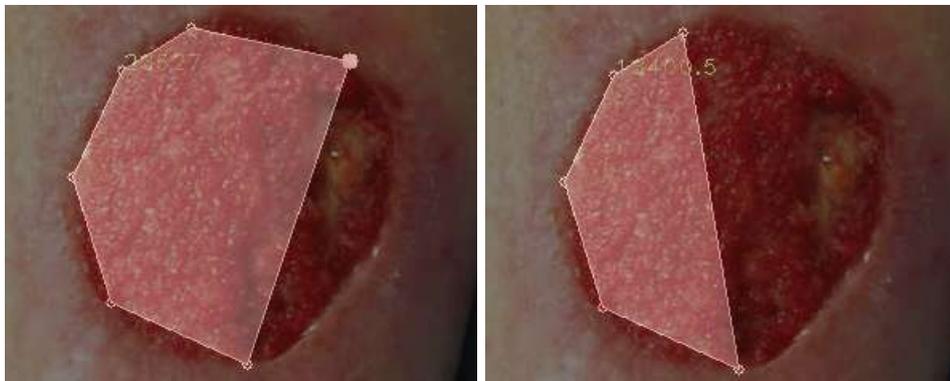


Рисунок 3.1.13 – Видалення попередньо встановленої опорної точки під час редагування контуру зображення у програмі «Аналізатор рани»

Також під час редагування контуру зображення, кожна грань може бути розділена натисканням правої кнопки миші по ній на менші грані для більш детального та чіткого охоплення контурів ушкодження на зображенні (див. рис. 3.1.14).

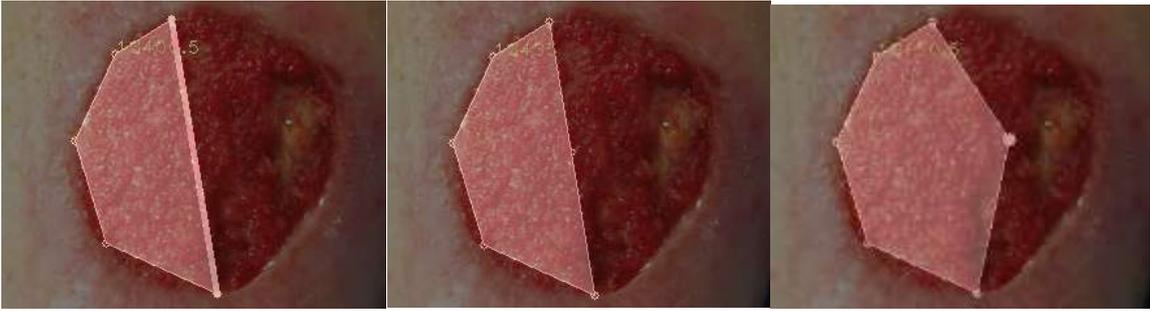


Рисунок 3.1.14 – Розділення грані додатковою опорною точкою під час редагування контуру ушкодження у програмі «Аналізатор рани»

На рисунку 3.1.15 представлено фінальний вигляд зображення з виділеним контуром ушкодження.

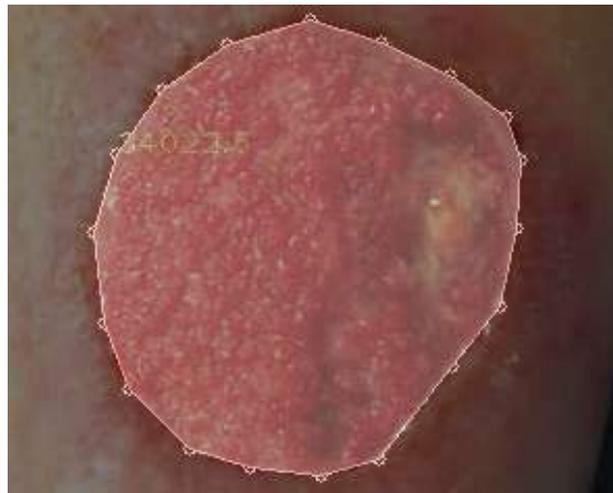


Рисунок 3.1.15 – Виділене контуром ушкодження у програмі «Аналізатор рани»

Для визначення розмірів ушкодження в конкретних одиницях вимірюванням потрібно перейти до наступного кроку – масштабування розмірів ушкодження за допомогою лінійки.

Для визначення розміру ураження використовується команда **Ruler** або відповідна піктограма. Після цього програма переходить у режим **Ruler mode** (інформація про режим відображається на панелі стану внизу вікна). Щоб провести вимірювання, потрібно встановити опорні точки лінійки на зображенні, послідовно клацаючи лівою кнопкою миші (див. рис. 3.1.16).

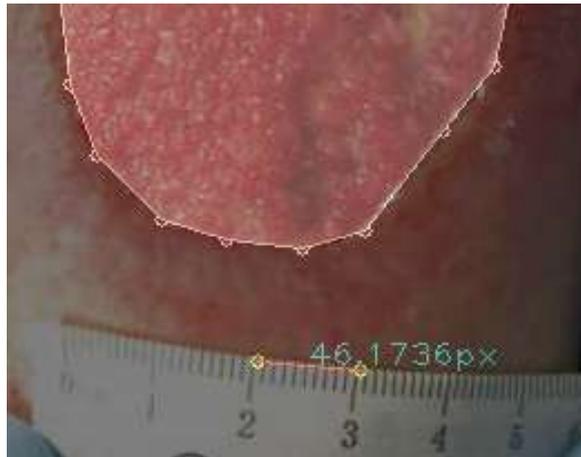


Рисунок 3.1.16 – Встановленні опорних точок на лінійці під час масштабування розмірів ушкодження у програмі «Аналізатор рани»

Побудовану лінійку можна редагувати. Для цього необхідно вимкнути режим **Ruler mode** командою **Ruler**. Програма переходить у режим **Edit mode** (це відображається на панелі стану внизу вікна). При наведенні курсору на опорні точки вони підсвічуються, що дозволяє зручно коригувати їх положення. Кожна опорна точка може бути переміщена.

Для збереження отриманих результатів у базі даних необхідно виконати команду **Accept**. У підсумку зображення збережеться саме в тому вигляді, в якому воно відображається у головному вікні програми. Також на зображенні буде обчислено результат вимірювання (див. рис. 3.1.17).



Рисунок 3.1.17 – Кінцевий вигляд зображення з встановленим контуром ушкодження та визначеним його розміром у програмі «Аналізатор рани»

Для збереження звіту у документації пацієнта потрібно виконати команду **Export PDF**, або натискаємо відповідну піктограму. Вигляд сформованого документу наведено на рисунку 3.1.18.

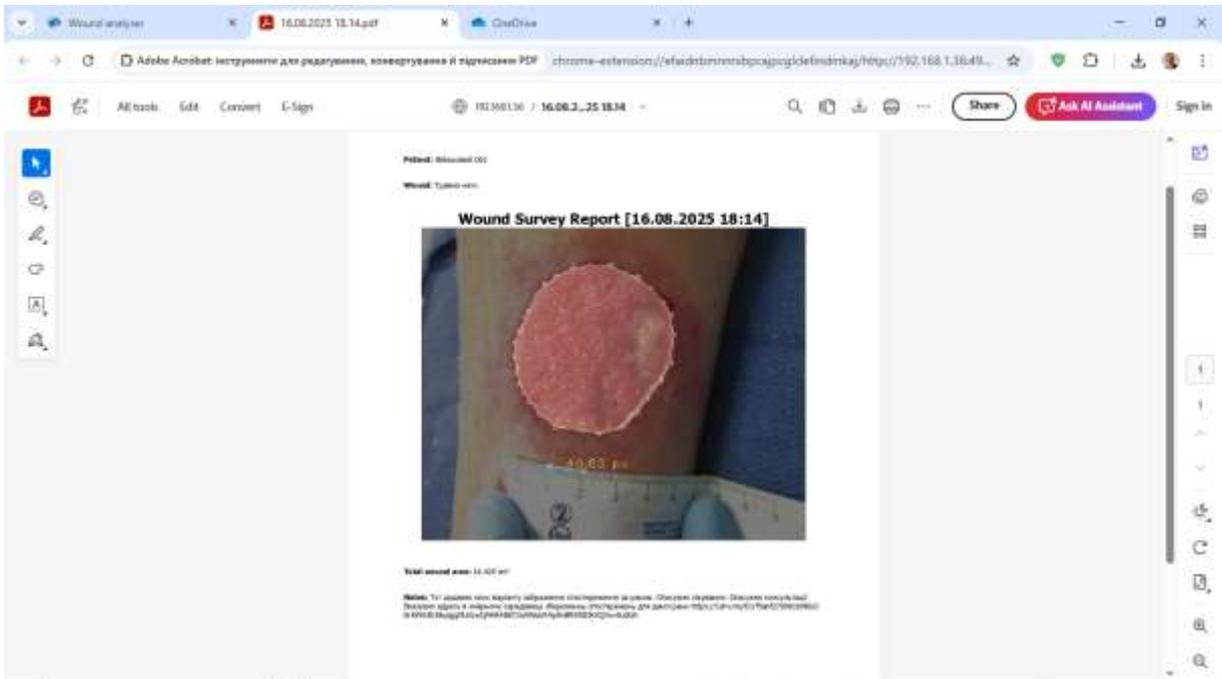


Рисунок 3.1.19 – Документ з визначеним розміром ушкодження у програмі «Аналізатор рани»

Документ з результатом формується у форматі **PDF** і відкривається в новій вкладці браузера. Формат **PDF** зручний тим, що зображення зберігається без спотворень, його легко переглядати на будь-якому пристрої, роздруковувати чи додавати до медичної документації.

Вибравши певну рану для конкретного пацієнта, ми отримуємо графік її загоєння. Така динаміка є надзвичайно важливою для лікаря, оскільки дозволяє оцінювати ефективність обраного лікування та вчасно коригувати рішення. Візуально відстежити зміни ураження складно, особливо при невеликих, поступових покращеннях або погіршеннях, що не завжди помітні неозброєним оком. Графік дозволяє побачити тенденції, визначити швидкість загоєння та виявити потенційні ускладнення на ранніх стадіях. Це також допомагає порівнювати результати між різними ранами або пацієнтами та оцінювати загальну ефективність лікування. Крім того, наявність структурованої

інформації підвищує точність клінічних висновків і полегшує комунікацію між лікарями. Такі дані можуть стати підґрунтям для планування наступних процедур, вибору методів догляду або застосування додаткових терапевтичних засобів. Важливо, що графік дозволяє лікарю ухвалювати рішення на основі об'єктивної інформації, а не лише на підставі суб'єктивних спостережень. У підсумку, систематичне відстеження загоєння рани підвищує безпеку пацієнта та ефективність лікування. Графік загоєння рани конкретного пацієнта наведено на рисунку 3.1.20.

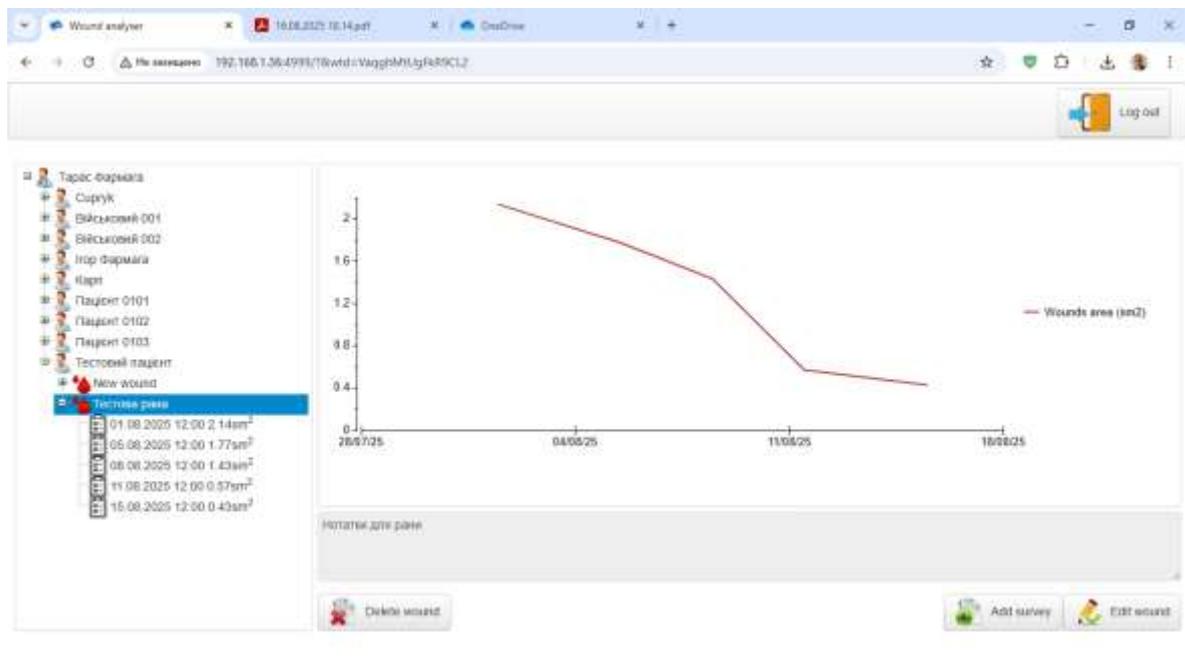


Рисунок 3.1.20 – Графік загоєння рани пацієнта Г.А. у програмі «Аналізатор рани»

Щоб об'єктивно оцінити ефективність запропонованого підходу та продемонструвати його практичну цінність, ми вирішили провести апробацію методу цифрової планіметричної вольнерометрії за допомогою розробленої нами програми «Аналізатор рани». Для цього визначали площу, периметр, радіус, довжину та ширину ран різного походження. Зокрема, дослідження включало глибокі та поверхневі опіки у 16 пацієнтів, післятравматичні рани у 5 пацієнтів та кусані рани у 2 пацієнтів. Апробація дозволила перевірити, наскільки метод точно відтворює зміни ураженої ділянки, і наскільки зручно

відстежувати динаміку загоєння. Це дало можливість порівняти отримані цифрові дані з клінічними спостереженнями та визначити корисність методу для прийняття лікувальних рішень. Крім того, дослідження допомогло виявити переваги систематичного вимірювання ран у порівнянні з оцінкою «на око».

Точність методу цифрової вольнерометрії за допомогою комп'ютерної програми «Аналізатор рани» становила:

- для оцінки ширини рани – $98,96\% \pm 1,28\%$;
- для оцінки довжини рани – $99,43\% \pm 0,79\%$;
- для оцінки радіусу рани – $99,61\% \pm 0,65\%$;
- для оцінки периметру рани – $98,96\% \pm 1,19\%$;
- для оцінки площі рани – $99,52\% \pm 0,67\%$.

Як видно з отриманих даних, використання програми «Аналізатор рани» підвищує точність клінічної інформації, зменшує суб'єктивність оцінки та забезпечує лікарю надійні дані для планування подальшого лікування. Результати апробації підтвердили, що цифрова планіметрична вольнерометрія програмою «Аналізатор рани» може стати ефективним інструментом у щоденній клінічній практиці.

Крім визначення розмірів рани, цифрова вольнерометрія виявилася придатною для окремих етапів при плануванні реконструктивних операцій.

Отже, запропонована нами методика комп'ютерної вольнерометрії забезпечує всі потреби сьогодення, а саме дозволяє швидко визначити розміри рани з фотографії, аналізувати динаміку їх зміни, зберігати отриману інформацію у базах даних, а, головне, володіє достовірною точністю.

Розроблений спосіб вольнерометрії дає змогу здійснювати швидко, точно й, за потреби, безконтактне вимірювання площі рани, зберігати і опрацьовувати отриману інформацію і може широко використовуватися у різних напрямках практичної хірургії для об'єктивного контролю за параметрами загоєння рани та володіє підтвердженою точністю.

3.2. Безконтактна термографія для оцінки глибини опікових ран із використанням пристрою FLIR ONE

Наслідки опікових травм можуть характеризуватися формуванням рубців та інвалідацією пацієнта, для попередження яких найефективнішим є раннє видалення мертвих тканин і відновлення шкірного покриву [117]. Однак під час лікування таких пацієнтів не завжди вдається швидко та якісно діагностувати ті ділянки, що потребують негайної некректомії та закриття рани (глибокий опік), і ті, що здатні до самозагоєння без патологічних наслідків (поверхневий опік) [117]. Саме з цією метою важливою є диференціація глибоких уражень від поверхневих у перші години прибуття пацієнта до стаціонару.

Постійно ведеться пошук нових надійних неінвазивних і не дороговартісних методик, що швидко й якісно в реальному часі змогли б оцінити глибину ураження. Саме такими критеріями володіє безконтактна термографія з інфрачервоною камерою за допомогою портативного пристрою FLIR One [142]. Цей прилад зарекомендував себе як економічно ефективний, універсальний і цінний інструмент для допомоги клініцистам в оцінюванні глибини термічного ураження не лише в опікових центрах, але й у відділеннях невідкладної допомоги [59, 142]. Враховуючи такі характеристики приладу, вивчено його надійність і діагностичну цінність для оцінювання глибини термічного ураження.

Оцінено 22 опікові рани. Температура тіла здорової шкіри становила $34,7^{\circ}\text{C}$ ($34,4$; $35,1$) $^{\circ}\text{C}$, що була достовірно нижчою за температуру поверхневого опіку - $35,8^{\circ}\text{C}$ ($35,5$; $36,2$) $^{\circ}\text{C}$ і достовірно вищою за температуру глибокого опіку - $32,4^{\circ}\text{C}$ ($32,0$; $32,8$) $^{\circ}\text{C}$. Зафіксоване нами максимальне значення температури здорової шкіри становило $35,8^{\circ}\text{C}$, що також було нижчим за максимальне значення температури поверхневого опіку ($37,5^{\circ}\text{C}$) та вищим за максимальну температуру глибокого опіку ($33,8^{\circ}\text{C}$). Найнижче температурне значення серед вимірювань температури здорової шкіри становило $33,6^{\circ}\text{C}$, що менше за найнижче значення температури поверхневих опіків ($34,6^{\circ}\text{C}$) та вище

за найнижче значення вимірювань глибоких опіків (31,2°C). Додатково також визначено медіану - статистичну величину, розташовану посередині ранжованого ряду вибірки. Медіана значень температури здорової шкіри дорівнювала 34,8°C, що була нижчою за медіану вимірювань температур поверхневого опіку (35,9°C) і вищою за медіану вимірювань температур глибокого опіку (32,5°C). Результати наведено в таблиці 3.2.1 та на рисунку 3.2.1.

Таблиця 3.2.1 - Результати вимірювання безконтактним термометром FLIR One температури здорової шкіри, поверхневого та глибокого опіків

Показник	Температура, °C		
	здорової шкіри	поверхневого опіку	глибокого опіку
M (d ₁ ; d ₂)	34,7 (34,4; 35,1)	35,8 (35,5; 36,2)*	32,4 (32,0; 32,8)*,#
Max	35,8	37,5	33,8
Min	33,6	34,6	31,2
Med	34,8	35,9	32,5

Примітки: * - $p < 0,05$ за t-критерієм Стьюдента порівняно з показниками температури здорової шкіри; # - $p < 0,05$ за t-критерієм Стьюдента порівняно з показниками температури поверхневого опіку.

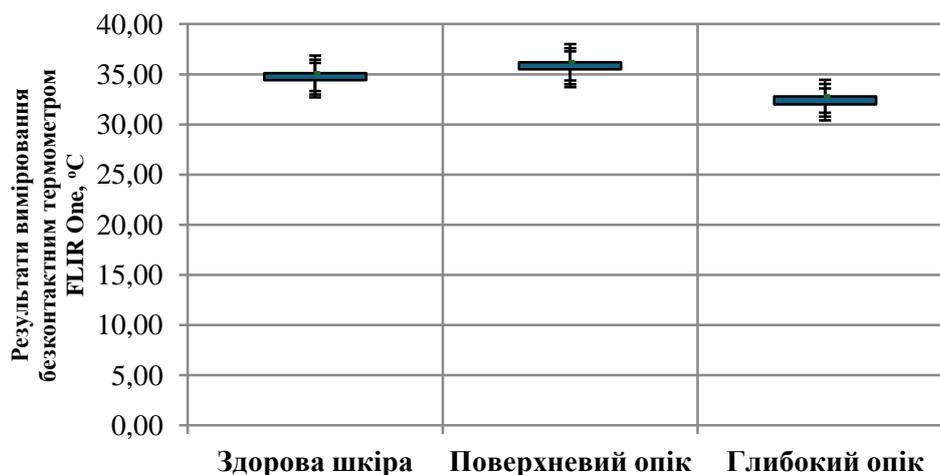


Рисунок 3.2.1 - Результати вимірювання безконтактним термометром FLIR One температури здорової шкіри, поверхневого та глибокого опіків

Наступним етапом обчислено різницю температур (ΔT) між ділянками шкіри. Різницю обчислено самостійно лікарем. Відповідно до отриманих результатів (табл. 3.2.2 та рис. 3.2.2) встановлено, що ΔT між температурою здорової шкіри та поверхневого опіку становила $1,1^{\circ}\text{C}$ ($0,7^{\circ}\text{C}$; $1,5^{\circ}\text{C}$). При цьому найбільша різниця температур дорівнювала $2,9^{\circ}\text{C}$, а найменша різниця температур становила $-0,7^{\circ}\text{C}$, а отже, були такі випадки, коли температура здорової шкіри перевищувала температуру поверхневого опіку. Середнє (медіальне) значення ΔT між здоровою шкірою та поверхневим опіком становило $1,1^{\circ}\text{C}$. ΔT між температурами здорової шкіри та глибокого опіку дорівнювала $2,3^{\circ}\text{C}$ ($2,2^{\circ}\text{C}$; $2,4^{\circ}\text{C}$), максимальна різниця становила $3,1^{\circ}\text{C}$, а мінімальна - $1,9^{\circ}\text{C}$. Медіана ΔT між здоровою шкірою та поверхневим опіком дорівнювала $2,2^{\circ}\text{C}$. ΔT між температурою поверхневого та глибокого опіків була найбільшою і становила $3,4^{\circ}\text{C}$ ($3,0^{\circ}\text{C}$; $3,8^{\circ}\text{C}$), максимальна різниця дорівнювала $5,2^{\circ}\text{C}$, мінімальна - $1,6^{\circ}\text{C}$, медіальне значення - $3,2^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 3.2.2 - Різниця температур здорової шкіри, поверхневого та глибокого опіків

Показник	Різниця температур (ΔT), $^{\circ}\text{C}$		
	здорової шкіри та поверхневого опіку	здорової шкіри та глибокого опіку	поверхневого опіку та глибокого опіку
M (d_1 ; d_2)	1,1 (0,7; 1,5)	2,3 (2,2; 2,4)	3,4 (3,0; 3,8)
Max	2,9	3,1	5,2
Min	-0,7	1,9	1,6
Med	1,1	2,2	3,2

За результатами термографії, температура здорової шкіри становить $34,7^{\circ}\text{C}$ ($34,4-35,1^{\circ}\text{C}$), що є значно нижчою за температуру поверхневого опіку ($35,8^{\circ}\text{C}$ ($35,5-36,2^{\circ}\text{C}$)) і значно вищою за температуру глибокого опіку ($32,4^{\circ}\text{C}$ ($32,0-32,8^{\circ}\text{C}$)). Різниця температур між здоровою шкірою та поверхневим

опіком становить $1,1^{\circ}\text{C}$ ($0,7-1,5^{\circ}\text{C}$), між здоровою шкірою та глибоким опіком - $2,3^{\circ}\text{C}$ ($2,2-2,4^{\circ}\text{C}$), а між поверхневим і глибоким опіками - $3,4^{\circ}\text{C}$ ($3,0-3,8^{\circ}\text{C}$).

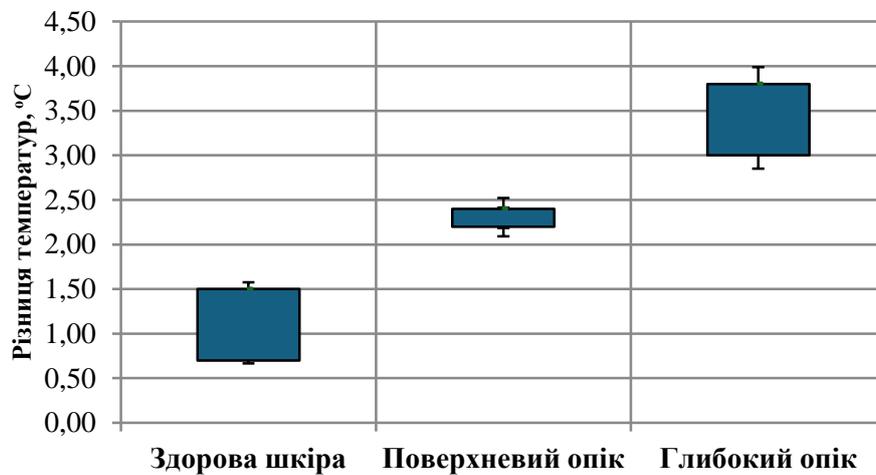


Рисунок 3.2.2 - Різниця температур здорової шкіри, поверхневого та глибокого опіків

Висновок. Запропонована методика комп'ютерної вольнерометрії та термографія з використанням FLIR One є ефективними та достовірними інструментами для діагностики та моніторингу ран опікового генезу у практичній медицині. Комп'ютерна вольнерометрія дозволяє швидко й точно вимірювати площу рани, аналізувати динаміку її змін і зберігати дані в базах, що є важливим для об'єктивного контролю за процесом загоєння. З іншого боку, термографія з використанням FLIR One забезпечує надійний аналіз глибини опікових уражень завдяки точному визначенню температури різних ділянок шкіри, що дозволяє своєчасно діагностувати глибоке термічне ураження. Обидві методики можуть бути широко застосовані в різних напрямках практичної хірургії, зокрема комбустіології, та лікуванні пацієнтів з термічними травмами, надаючи медичному персоналу ефективні інструменти для підвищення точності та швидкості діагностики.

Результати, подані у розділі 3, опубліковані у наукових працях:

- Лукавецький О. В., Стояновський І. В., Фармага Т. І. Комп'ютерна програма для вільнерометрії. Харківська хірургічна школа. 2017;1(82):145–147. [7]
- Farmaha I, Farmaha T, Banaś M, Savchyn V, Lukashchuk B. Wound image segmentation using clustering based algorithms. *New Trends in Production Engineering*. Warszawa: Sciendo; 2019. 2(1):570–578. [37]
- Фармага Т. І., Лукавецький О. В., Чемерис О. М. Цифрова комп'ютерна планіметрія ранових дефектів різного генезу. *Шпитальна хірургія. Журнал імені Л. Я. Ковальчука*. 2022;3:42–45. <https://doi.org/10.11603/2414-4533.2022.3.13392> [14]
- Фармага Т. І., Лукавецький О. В., Чемерис О. М., Стояновський І. В. Використання безконтактного термографа FLIR One для оцінювання глибини опікової рани. *Хірургія дитячого віку (Україна)*. 2024;2(83):13–18. <https://doi.org/10.15574/PS.2024.83.13> [10]
- Jaworski N, Farmaha I, Farmaha T, Marikutsa U, Savchyn V. Implementation features of wounds visual comparison subsystem. In: *XIV-th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH) [abstracts]*. Lviv, 18–22 April 2018. p. 114–118. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2018.8365714> [61]
- Фармага Т. І., Лукавецький О. В., Чемерис О. М. Оцінка глибини опікових уражень за допомогою безконтактної термографії FLIR ONE. XX Конгрес Світової Федерації Українських Лікарських Товариств (СФУЛТ), 24–26 жовтня 2024 р. *Українські медичні вісті*. 2024;16(3–4 suppl):46–47. [12]

РОЗДІЛ 4

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ГЛИБИНИ ОПІКОВИХ РАН (ЦИФРОВА ПЛАНІМЕТРІЯ, ТЕРМОГРАФІЯ, КЛІНІЧНІ ПОКАЗНИКИ) ЯК ОСНОВА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ НЕКРОЗУ ТА ВИБОРУ ХІРУРГІЧНОЇ ТАКТИКИ

4.1. Аналіз взаємозв'язків клінічними характеристиками та даними термографії та глибини опікових ран.

Одним із ключових завдань сучасної комбустіології є своєчасна та об'єктивна оцінка глибини опікових уражень. Від точності цього етапу залежить не лише правильність вибору тактики лікування, але й своєчасність проведення хірургічних втручань, що безпосередньо впливає на прогноз перебігу ранового процесу. Традиційні клінічні методи (оцінка кольору шкіри, наявності пухирів, капілярного рефілу тощо) є доступними, проте характеризуються суб'єктивністю та значною міждослідницькою варіабельністю. Тому актуальним завданням є поєднання клінічних характеристик із сучасними інструментальними підходами, зокрема цифровою планіметрією та термографією, а також об'єктивізація клінічних методик — визначення конкретних критеріїв, за якими опікова рана класифікується як глибока і потребує хірургічного лікування.

Нами було визначено прогностичну цінність окремих клінічних маркерів у диференціації поверхневих та глибоких опікових ран із формуванням некрозу. З цією метою проведено ROC-аналіз із розрахунком площі під кривою (AUC). Як предиктори розглядалися капілярний рефіл, колір опікової рани, наявність пухирів та температура ураженої ділянки. Еталонним критерієм для диференціації глибини опікових ран було клініко-хірургічне підтвердження за результатами лікування: рани, що загоїлися самостійно шляхом епітелізації, вважалися поверхневими, тоді як формування некрозу та необхідність хірургічного втручання свідчили про глибоке ураження.

Побудовані ROC-криві відобразили залежність між True Positive Rate (чутливість, TPR) та False Positive Rate (FPR, 1–специфічність) для кожного маркера. Цей підхід дозволив кількісно оцінити діагностичні можливості окремих предикторів і визначити оптимальні порогові значення, що забезпечують найкращий баланс між чутливістю та специфічністю.

Капілярний рефіл оцінювався безпосередньо на поверхні опікової рани та класифікувався за трьома категоріями:

- Нормальний капілярний рефіл (1–2 с): після легкого стискання тканини колір швидко відновлюється, що свідчить про збережений периферійний кровообіг і низький ризик глибокого ураження.
- Сповільнений капілярний рефіл (>2 с): вказує на порушення мікроциркуляції та підвищений ризик некрозу тканин.
- Прискорений капілярний рефіл (<1 с): спостерігається рідко, може відображати локальну гіперемію або запальний процес.

У проведеному ROC-аналізі час капілярного рефілу продемонстрував високу діагностичну інформативність у прогнозуванні глибини опікових уражень (див. рис. 4.1).

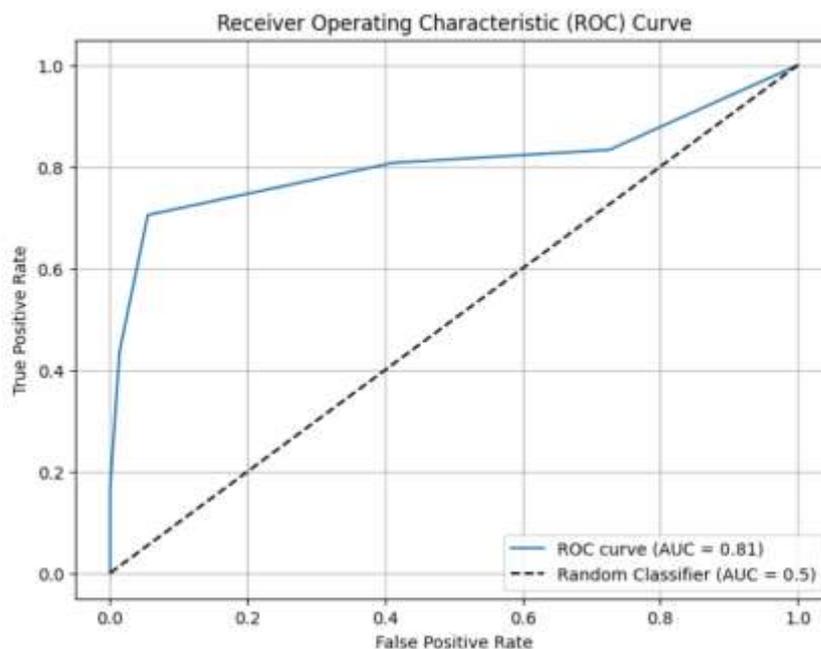
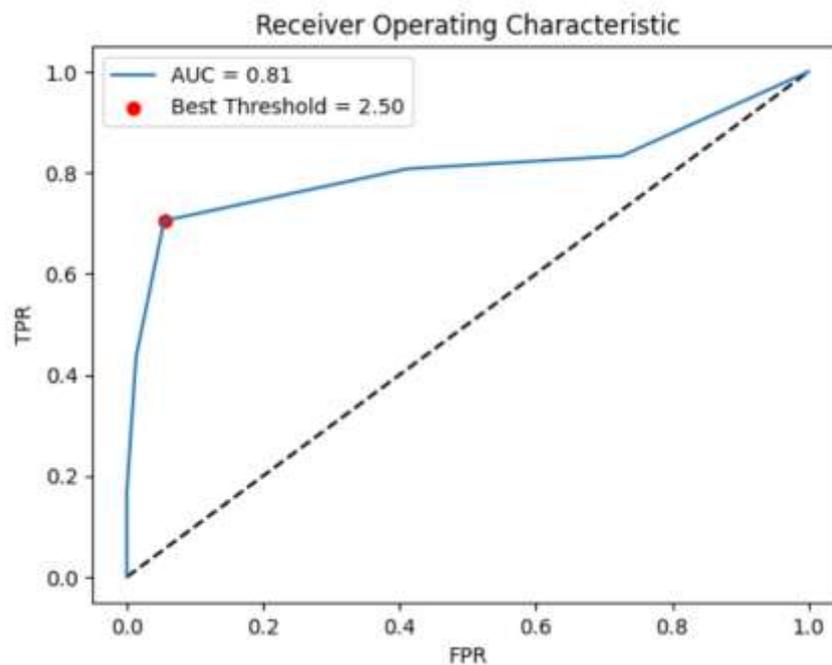


Рисунок 4.1 - ROC-крива для оцінки діагностичної цінності капілярного рефілу у прогнозуванні глибини опікових ран

Площа під ROC-кривою (AUC) становила 0,81, що свідчить про добрий рівень дискримінаційної здатності між поверхневими та глибокими опіками. Оптимальне порогове значення для часу капілярного рефілу становило 2,5 с, при перевищенні якого істотно зростала ймовірність формування некрозу (рис. 4.2). Таким чином, рефіл $\leq 2,5$ с можна розцінювати як нормальний або прискорений (характерний для поверхневих уражень), а $>2,5$ с — як патологічний, асоційований з ішемією тканин і глибиною ураження.



Рисунк 4.2 - ROC-крива капілярного рефілу з визначенням оптимального порогового значення (cut-off point)

Додатково було побудовано графік залежності TPR і FPR від порогових значень (рис. 4.3). Отримані криві візуалізували, як зміна точки відсікання впливає на співвідношення чутливості та частоти хибнопозитивних результатів. При нижчих порогах спостерігалось підвищення чутливості за рахунок зниження специфічності, тоді як при вищих порогах — навпаки, зростала специфічність із ризиком втрати частини істинно позитивних випадків. Тому cut-off на рівні 2,5 с був обґрунтовано визначений як оптимальний баланс між цими показниками.

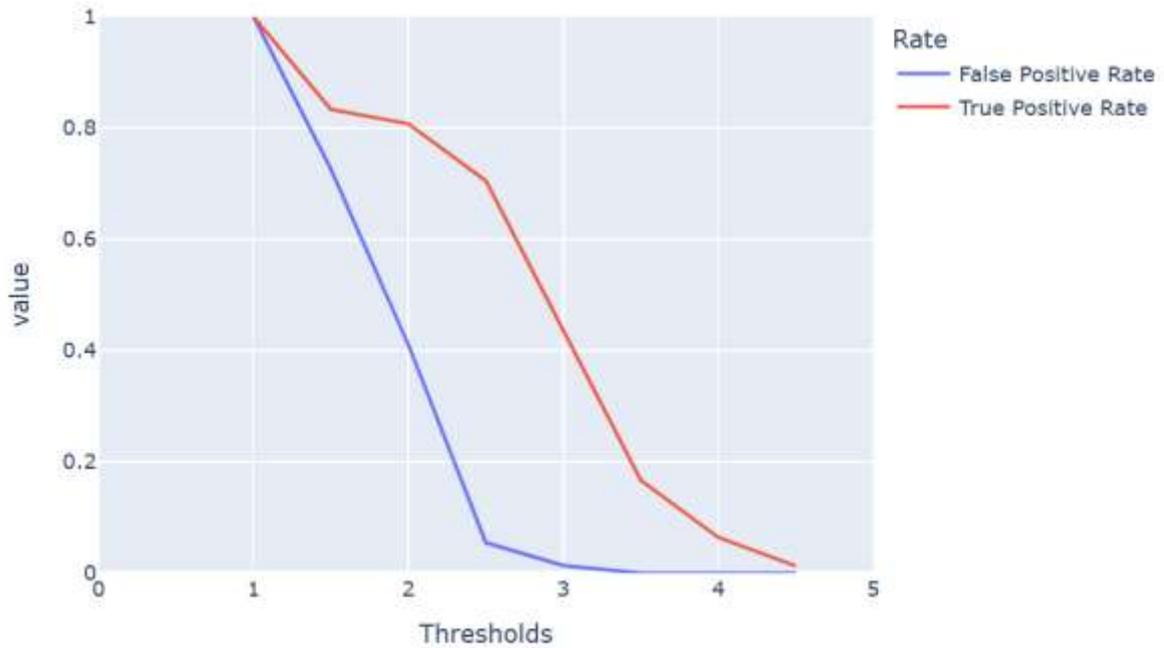


Рисунок 4.3 - Криві чутливості та хибнопозитивної частоти для різних порогів капілярного рефілу

Отримані результати узгоджуються з патофізіологічними механізмами: при поверхневих опіках зберігається мікроциркуляція у дермі, що забезпечує швидке наповнення капілярного русла, тоді як при глибоких ураженнях спостерігається руйнування судин і стійка ішемія, що подовжує час капілярного рефілу.

Таким чином, капілярний рефіл тривалістю понад 2,5 с є об'єктивним клінічним маркером, здатним підвищити точність диференціації поверхневих та глибоких опіків на ранньому етапі. Однак його самостійне використання для оцінки глибини рани обмежене через вплив численних зовнішніх і внутрішніх факторів, що можуть спотворювати результати. На тривалість капілярного рефілу впливають температура навколишнього середовища, системна гемодинаміка пацієнта, наявність шоку, анемії або судинних порушень, а також набряк і локальна ішемія тканин у зоні опіку. Крім того, суб'єктивність оцінки та міждослідницька варіабельність знижують відтворюваність методу. Тому капілярний рефіл доцільно використовувати як допоміжний критерій у

поєднанні з іншими клінічними та інструментальними методами діагностики глибини опікових ран.

Отже, вимірювання часу капілярного рефілу може бути застосоване як додатковий швидкий клінічний тест для попереднього прогнозування глибини опікових уражень.

Серед клінічних характеристик одним із найбільш інформативних маркерів виявився колір опікової рани. Побудований ROC-аналіз засвідчив достатню діагностичну цінність цього показника: $AUC = 0,70$ (див. рис 4.4).

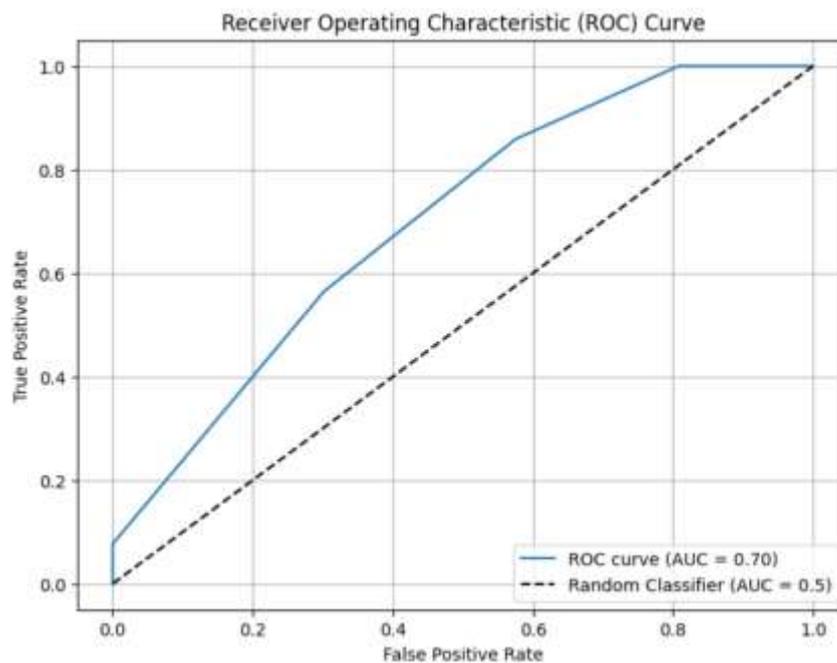


Рисунок 4.4 - ROC-крива для оцінки діагностичної цінності кольору опікової рани у прогнозуванні глибини ураження

Для статистичного аналізу колір рани було категоризовано за градаціями:

- червона (0),
- рожевий (1),
- бліда (2),
- сіра (3),
- чорна (4).

Встановлено чітку залежність: чим темніший або менш васкуляризований вигляд мала рана, тим вищим був факт некрозу. Навпаки, червоний чи рожевий колір відображали достатню перфузію тканин і асоціювалися з поверхневими ураженнями та сприятливим перебігом загоєння.

Оптимальна точка відсікання (cut-off point), визначена на основі ROC-кривої, становила 3 (див. рис. 4.5). Це означає, що рани з кольором «сіра» чи «чорна» мали високий ризик некрозу та відносилися до глибоких уражень, тоді як «червона», «рожевий» та «бліда» залишалися у межах поверхневих.

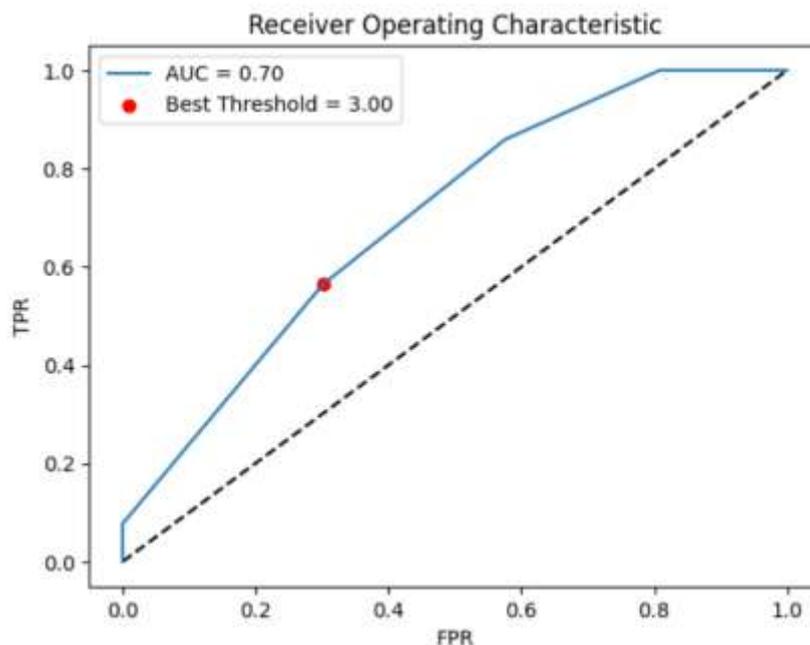


Рисунок 4.5 - ROC-крива кольору рани з визначенням оптимального порогового значення (cut-off point)

Додатковий аналіз співвідношення TPR і FPR підтвердив, що вибір порогового значення в умовну цифру – 3 – забезпечує оптимальний баланс між чутливістю та специфічністю (див. рис. 4.6).

Отримані результати свідчать, що колір опікової рани може виступати діагностичним маркером, який добре корелює зі ступенем ураження дерми. Це пояснюється тим, що втрата рожевого або червоного відтінку відображає

прогресуючу ішемію тканин та руйнування мікросудинного русла, характерні для глибоких опіків.

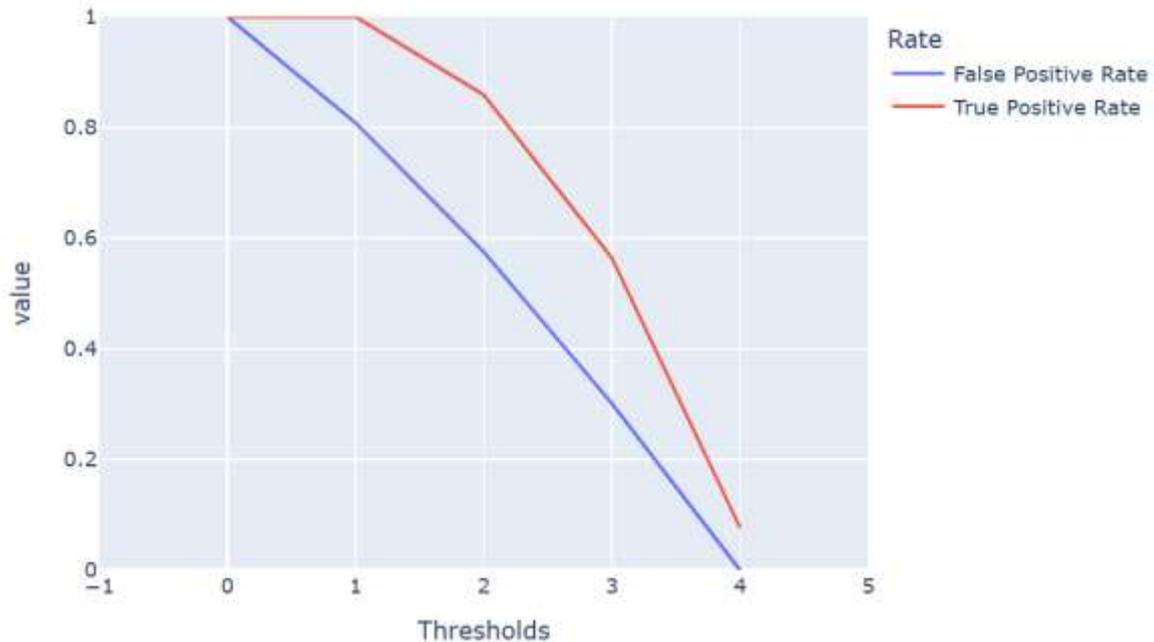


Рисунок 4.6 - Криві чутливості та хибнопозитивної частоти для кольору рани

Однак використання кольору як єдиного критерію для визначення глибини ураження має суттєві обмеження. Колір рани може змінюватися під впливом зовнішнього освітлення, часу після травми, наявності сторонніх домішок (наприклад, медикаментів чи некротичних мас), мікробного забруднення або часткової епітелізації. Крім того, у пацієнтів із різним фототипом шкіри та при неоднорідності ураження в межах однієї поверхні можлива суб'єктивна інтерпретація відтінків навіть досвідченими клініцистами.

Тому оцінку кольору доцільно застосовувати у поєднанні з іншими клінічними та інструментальними параметрами (капілярним рефілом і термографією, наприклад), що дозволяє підвищити точність стратифікації опікових ран за глибиною ураження.

Отже, визначення кольору опікової поверхні є простим, доступним і чутливим методом попередньої оцінки глибини опіку, проте потребує комбінованого підходу для забезпечення максимальної діагностичної точності.

Аналіз діагностичної інформативності характеристик пухирів продемонстрував задовільний прогностичний потенціал цього клінічного маркера. Побудована ROC-крива засвідчила $AUC = 0,63$, що відповідає помірному рівню дискримінаційної здатності: за даними вибірки правильна оцінка морфології пухирів дозволяла відмежувати поверхневі та глибокі опікові ураження. ROC-крива наведена на рисунку 4.7.

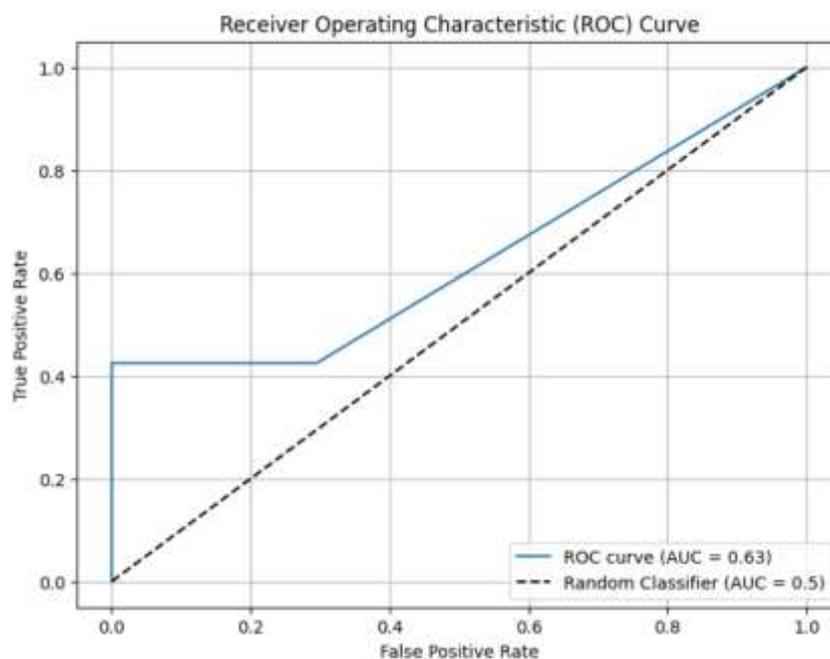


Рисунок 4.7 - ROC-крива для оцінки діагностичної цінності пухирів в опіковій рані у прогнозуванні глибини ураження

Для статистичного аналізу пухирі класифікувалися у три категорії:

- прозорий ексудат (3),
- жовтий ексудат (2),
- напружені з серозно-геморагічним вмістом (1),
- відсутність пухирів (0).

Встановлено чітку залежність: пухирі з прозорим серозним вмістом відповідали поверхневим опікам, які зберігали потенціал до спонтанної епітелізації. Наявність жовтого ексудату асоціювалася з ризиком інфікування та частковим пошкодженням дерми. Найбільш несприятливим прогностичним критерієм були пухирі з темним (геморагічним або некротичним) вмістом, які достовірно відображали глибоке ураження з високою ймовірністю формування некрозу.

Оптимальна точка відсікання (cut-off point) становила 2, що відповідає межі між поверхневими та глибокими ураженнями. Це означає, що пухирі з прозорим (3) або жовтим ексудатом (2) переважно належали до групи поверхневих опіків, тоді як серозно-геморагічний вміст чи відсутність пухирів — були предикторами глибоких уражень (див. рис. 4.8 та 4.9).

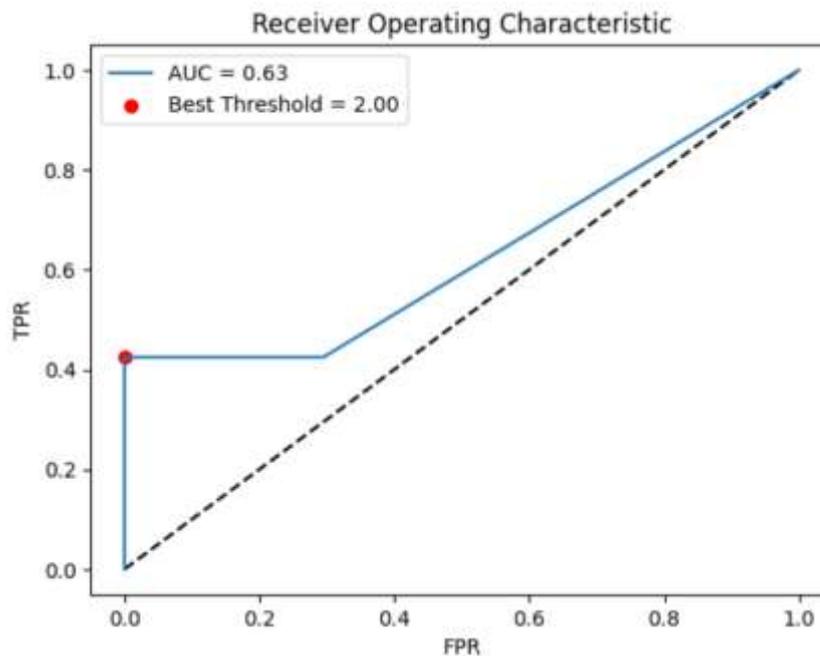


Рисунок 4.8 - ROC-крива пухирів опікової рани з визначенням оптимального порогового значення (cut-off point)

Таким чином, характеристика пухирів може розглядатися як один із об'єктивних і доступних клінічних критеріїв оцінки глибини опікових уражень.

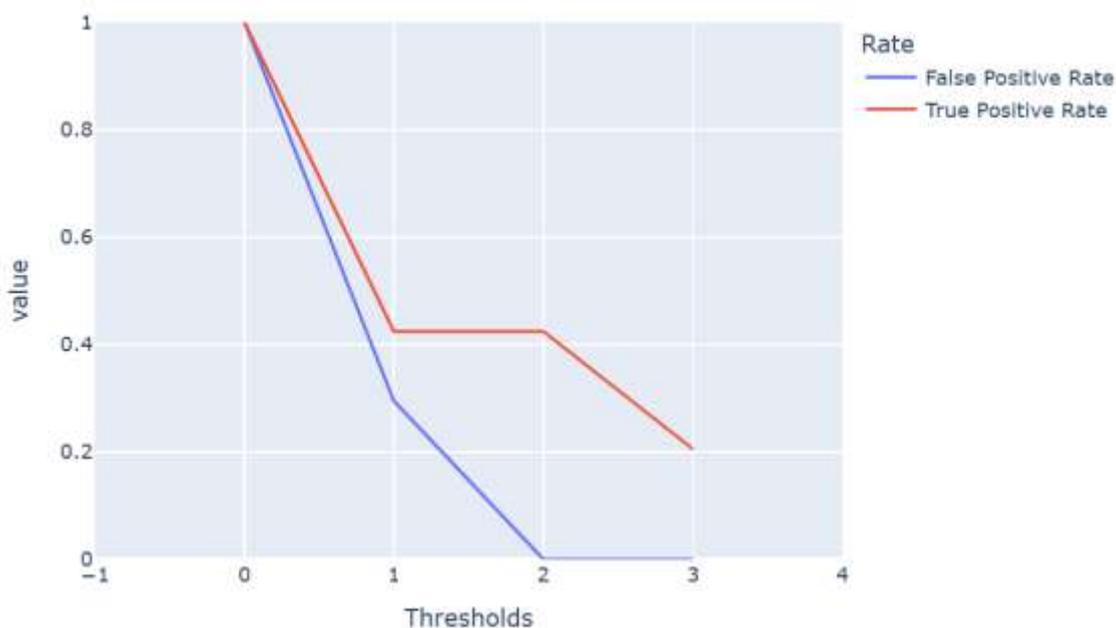


Рисунок 4.9 - Криві чутливості та хибнопозитивної частоти для пухирів опікової рани

Проте використання цього показника як самостійного діагностичного критерію є обмеженим. У реальній клінічній практиці пухирі часто руйнуються до моменту госпіталізації, особливо при побутових або бойових опіках, розриваються під одягом чи пов'язками, частково спускаються при транспортуванні пацієнта або первинній обробці рани. Крім того, на момент огляду пухир може бути інфікованим, зім'ятим або вже відшарованим, що утруднює точну оцінку його вмісту.

Ці фактори значно знижують відтворюваність та універсальність методики, тому оцінка пухирів повинна використовуватись у поєднанні з іншими клінічними та інструментальними ознаками для комплексної диференціації глибини опікової рани.

Однак ключовим маркером для оцінки глибини опіків є температура, так як попередні маркери мали суб'єктивний характер і залежали від уважності та досвіду лікуючого лікаря. Температура ураженої ділянки відображає стан мікроциркуляції та перфузії тканин. Попередні дослідження показали, що температура рани суттєво відрізняється залежно від глибини опіку: у

поверхневих ураженнях вона, як правило, вища або близька до температури здорової шкіри, тоді як при глибоких опіках, де відбувається руйнування дермальних судин і розвиток ішемії, температура тканин знижена порівняно із здоровими ділянками.

Для кількісної оцінки прогностичної цінності температури у диференціації поверхневих та глибоких опіків було проведено ROC-аналіз із розрахунком AUC та визначено оптимальну точку відсікання (cut-off point), що дозволяє об'єктивно відокремити ураження з високим ризиком некрозу від поверхневих ран. Побудова ROC-кривої та аналіз співвідношення TPR і FPR на різних порогах забезпечили кількісну оцінку чутливості та специфічності температурного маркера, а також обґрунтування вибору порогового значення для клінічного використання.

Таким чином, температура ураженої ділянки є доступним і об'єктивним маркером, який у поєднанні з іншими клінічними характеристиками (капілярний рефіл, колір рани, наявність пухирів) може суттєво підвищити точність оцінки глибини опіку та своєчасність вибору хірургічної тактики.

Спочатку для оцінки глибини опікових уражень було проаналізовано різницю між температурою здорової шкіри та найменшою температурою на рані (див. рис. 4.10).

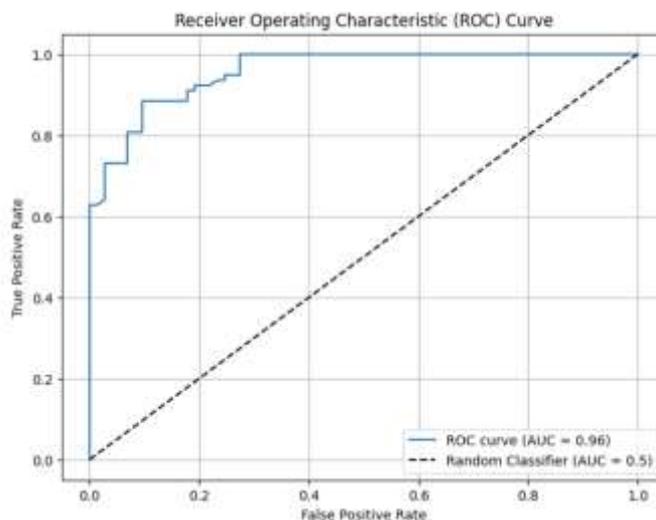


Рисунок 4.10 - ROC-крива для оцінки діагностичної цінності різниці між температурою здорової шкіри та найменшою температурою на рані у прогнозуванні глибини ураження

ROC-аналіз показав високу діагностичну цінність цього показника, $AUC = 0,96$, що свідчить про відмінну здатність диференціювати поверхневі та глибокі опіки на ранньому етапі.

Оптимальним пороговим значенням (cut-off point) визначено $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (див. рис. 4.11). Це означає, що якщо температура на ураженій ділянці нижча на $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ або більше порівняно зі здоровою шкірою, висока ймовірність глибокого опіку та формування некрозу. Менші різниці температури, а переважно зі знаком «мінус» (тобто значення вищі, ніж здорової шкіри) характерні для поверхневих уражень, де збережена мікроциркуляція та перфузія тканин.

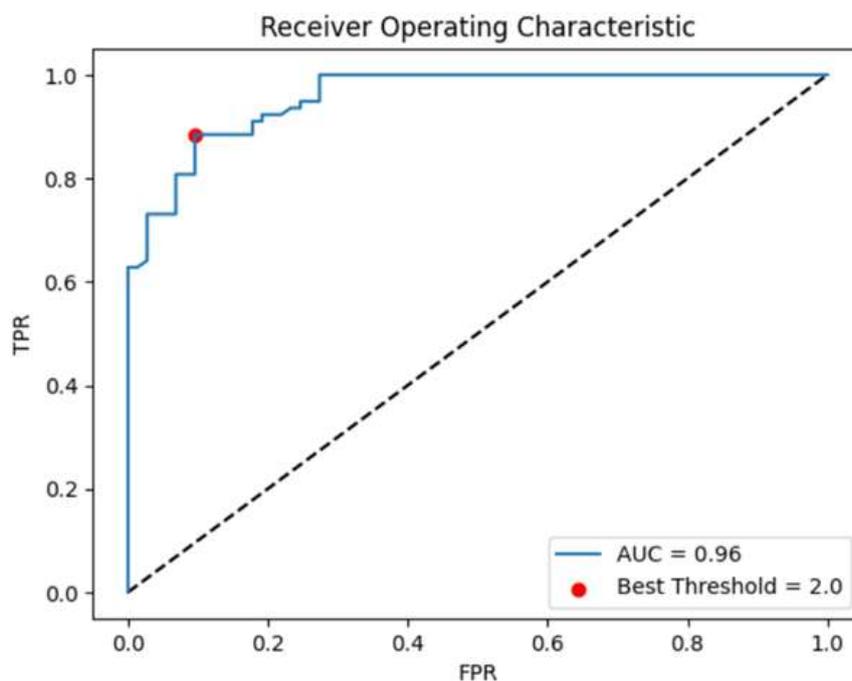


Рисунок 4.11 - ROC-крива для оцінки діагностичної цінності різниці між температурою здорової шкіри та найменшою температурою на рані у прогнозуванні глибини ураження з визначенням оптимального порогового значення (cut-off point)

Побудова кривої залежності TPR та FPR від різних порогів температури дозволила оцінити баланс між чутливістю та специфічністю маркера (див. рис. 4.12).

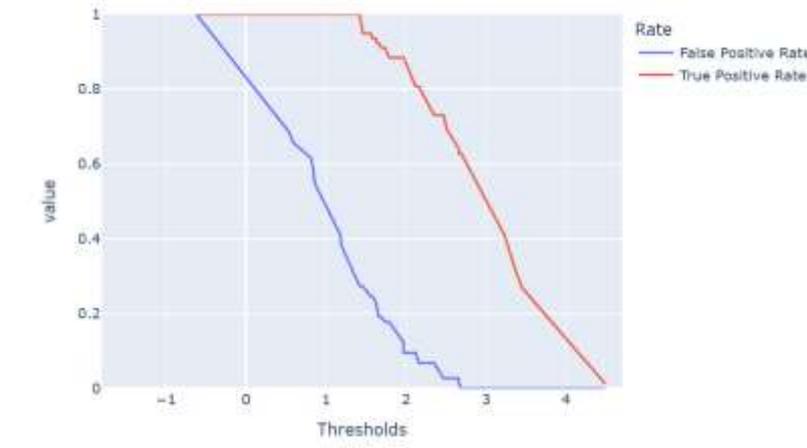


Рисунок 4.12 - Криві чутливості та хибнопозитивної частоти для різних порогів різниці між температурою здорової шкіри та найменшою температурою на рані у прогнозуванні глибини ураження

Отримані результати демонструють, що різниця між температурою здорової шкіри та найменшою температурою на рані є об'єктивним і високочутливим маркером глибини опікових ран.

Далі для оцінки глибини опікових уражень було проаналізовано різницю між температурою здорової шкіри та максимальною температурою на рані (див. рис. 4.13).

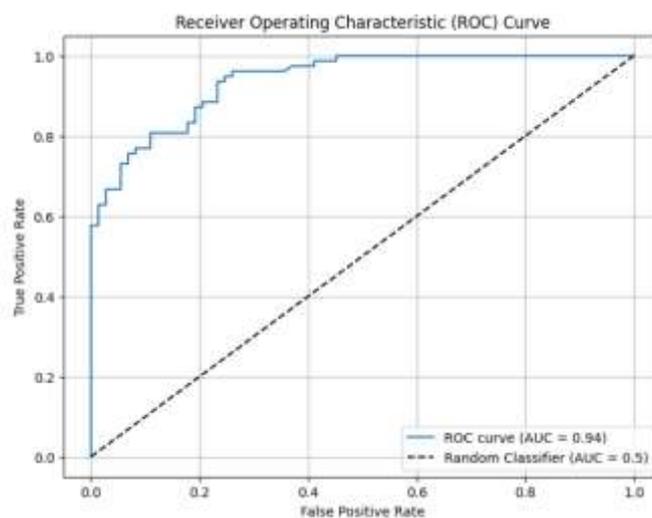


Рисунок 4.13 - ROC-крива для оцінки діагностичної цінності різниці між температурою здорової шкіри та найвищою температурою на рані у прогнозуванні глибини ураження

ROC-аналіз продемонстрував високу прогностичну цінність цього параметра, $AUC = 0,94$, що підтверджує його здатність ефективно відокремлювати поверхневі та глибокі опіки.

Оптимальна точка відсікання (cut-off point) становила $0,73\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це означає, що якщо температура на рані нижча температури здорової шкіри більше, ніж на $0,73\text{ }^{\circ}\text{C}$, висока ймовірність формування некрозу та віднесення рани до глибоких уражень (див. рис. 4.14).

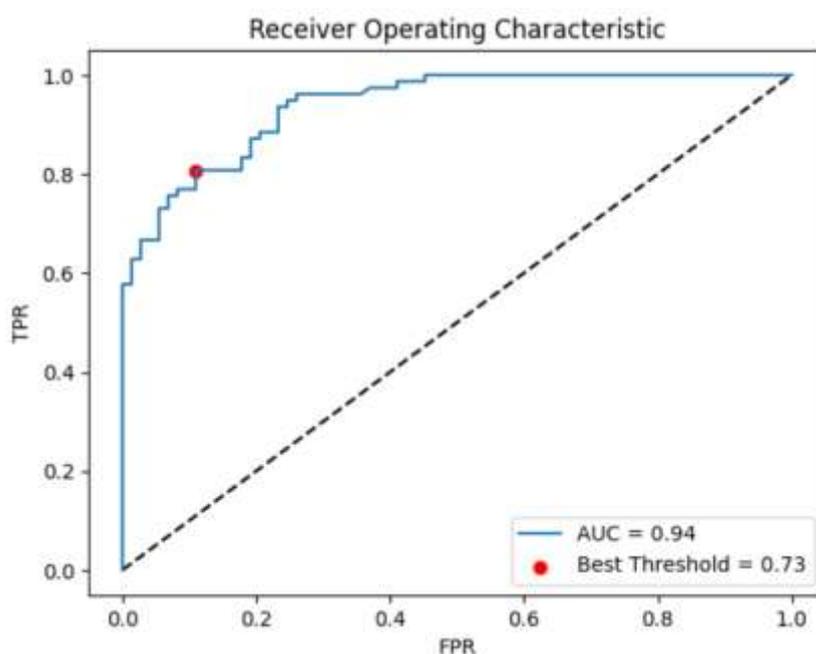


Рисунок 4.14 - ROC-крива для оцінки діагностичної цінності різниці між температурою здорової шкіри та найвищою температурою на рані у прогнозуванні глибини ураження з визначенням оптимального порогового значення (cut-off point)

Побудова графіка залежності TPR і FPR від порогових значень дозволила визначити оптимальний баланс між чутливістю та специфічністю цього маркера (див. рис. 4.15).

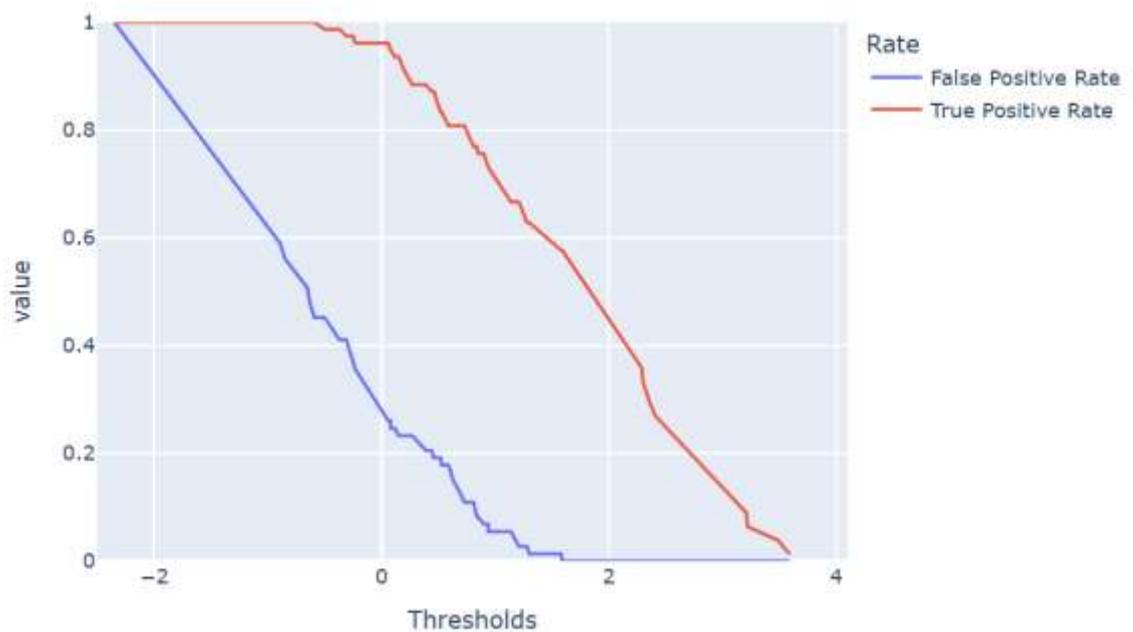


Рисунок 4.15 - Криві чутливості та хибнопозитивної частоти для різних порогів різниці між температурою здорової шкіри та найвищою температурою на рані у прогнозуванні глибини ураження

Результати свідчать, що аналіз різниці температури здорової шкіри та рани є об'єктивним і високоточним клінічним інструментом для прогнозування глибини опікових уражень.

Для оцінки глибини опікових уражень було проаналізовано максимальне значення температури на рані (див. рис. 4.16).

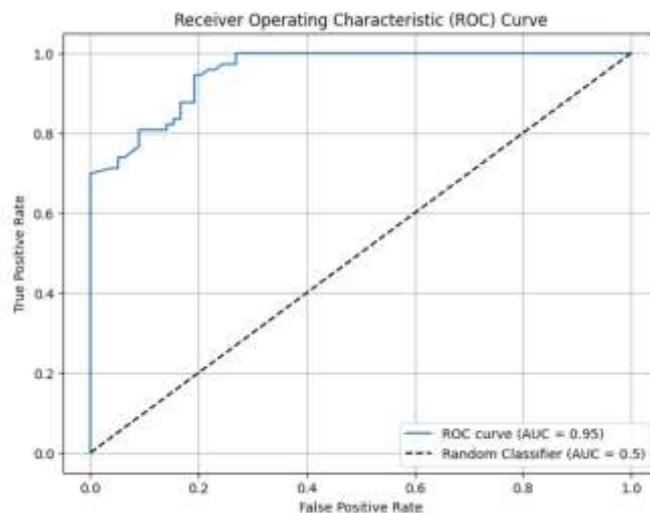


Рисунок 4.16 - ROC-крива для оцінки діагностичної цінності найвищої температури на рані у прогнозуванні глибини ураження

ROC-аналіз показав високий прогностичний потенціал цього параметра, $AUC = 0,95$, що свідчить про здатність ефективно диференціювати поверхневі та глибокі опіки. Оптимальна точка відсікання (cut-off point) становила $34,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Точка відсікання наведена на рисунку 4.17. Це означає, що ураження з максимальною температурою нижче і рівне $34,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ належать до групи глибоких опіків з високим ризиком некрозу, тоді як поверхневі опіки характеризуються вищими максимальними температурами ($>34,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), що відображає збережену перфузію тканин.

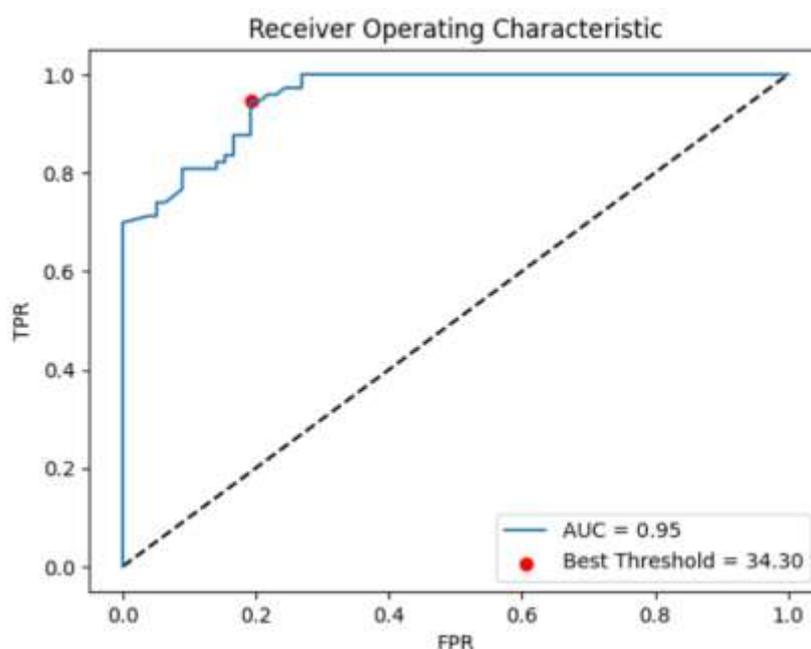


Рисунок 4.17 - ROC-крива для оцінки діагностичної цінності найвищої температури на рані у прогнозуванні глибини ураження з визначенням оптимального порогового значення (cut-off point)

Побудова графіка залежності TPR і FPR від порогових значень підтвердила високу чутливість та специфічність цього показника, що робить його об'єктивним маркером глибини опіку для клінічної практики (див. рис. 4.18).

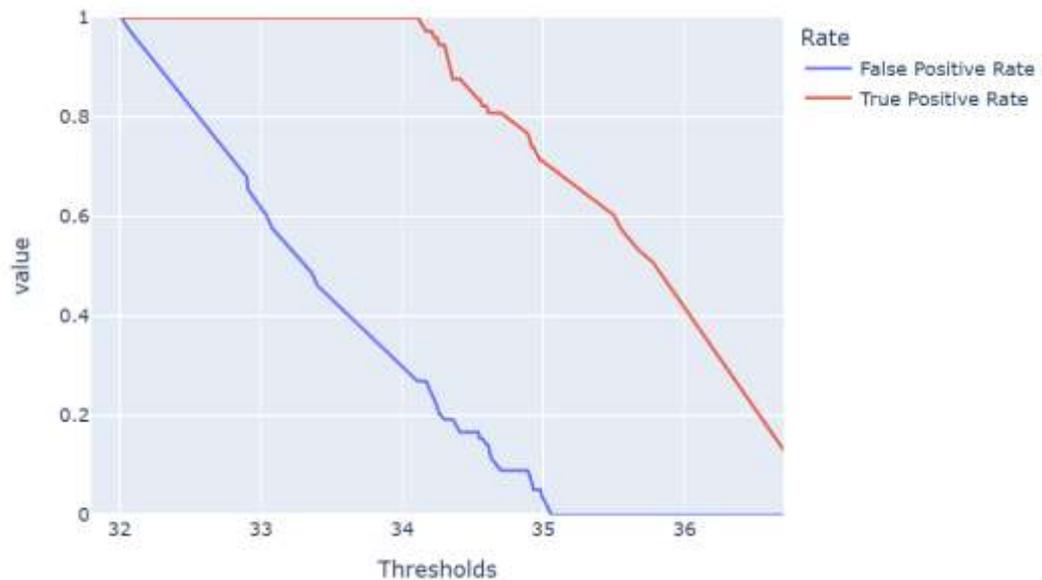


Рисунок 4.18 - Криві чутливості та хибнопозитивної частоти для різних порогів найвищої температури на рані у прогнозуванні глибини ураження

І останнім критерієм було проаналізовано мінімальне значення температури на рані, що найбільше відображає стан мікроциркуляції та ішемії тканин. ROC-аналіз показав $AUC = 0,99$, що підтверджує високу діагностичну цінність цього параметра (див. рис. 4.19).

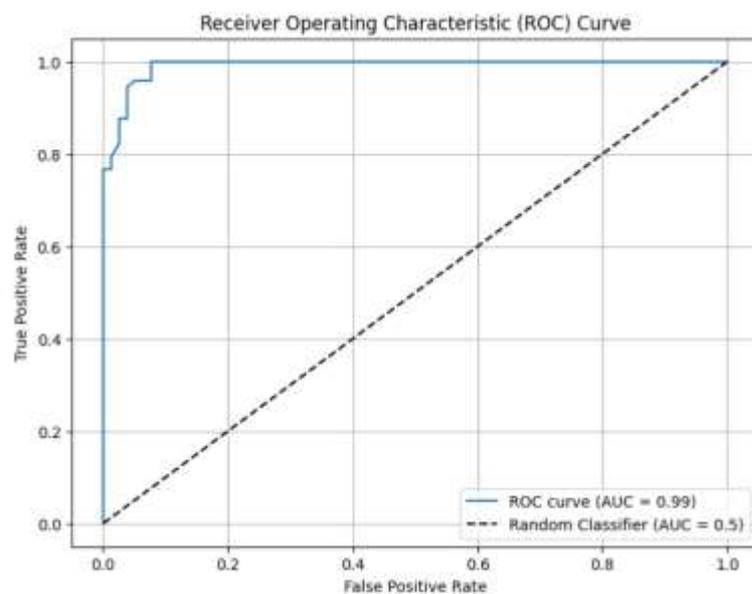


Рисунок 4.18 - ROC-крива для оцінки діагностичної цінності найнижчої температури на рані у прогнозуванні глибини ураження

Оптимальна точка відсікання становила 33,15 °С. Ураження з мінімальною температурою нижче і рівне 33,15 °С асоціювалися з глибокими опіками та високим ризиком формування некрозу, тоді як поверхневі опіки та здорова шкіра мали мінімальні температури >33,15 °С, що свідчить про збережену тканинну перфузію та потенціал до спонтанної епітелізації (див. рис. 4.19).

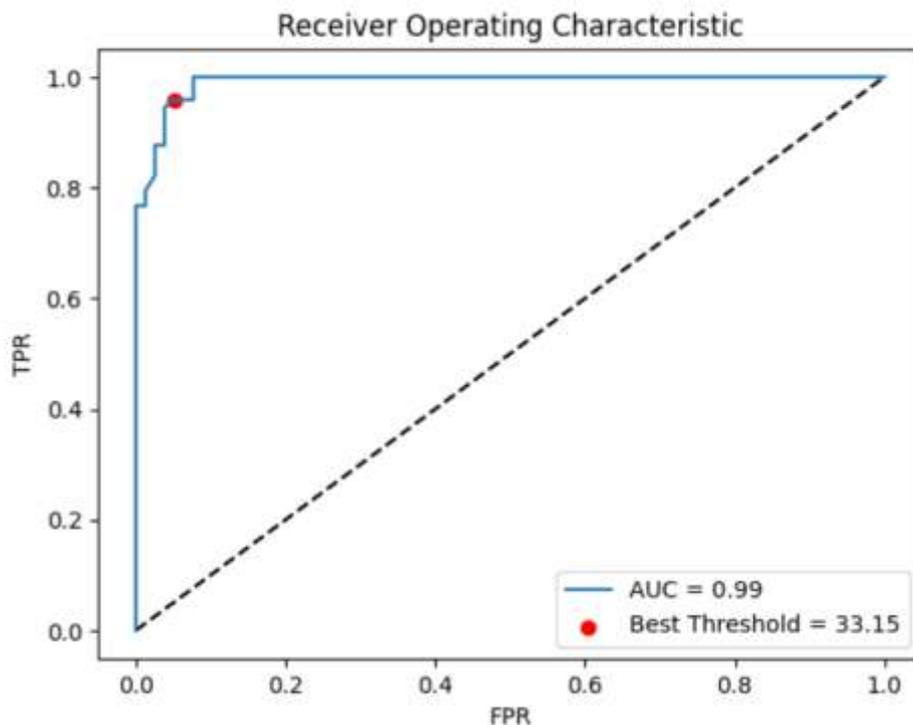


Рисунок 4.19 - ROC-крива для оцінки діагностичної цінності найнижчої температури на рані у прогнозуванні глибини ураження з визначенням оптимального порогового значення (cut-off point)

Аналіз співвідношення TPR і FPR на різних порогах підтвердив, що використання мінімальної температури як маркера забезпечує високу точність диференціації глибини ураження, особливо у поєднанні з іншими клінічними характеристиками (капілярний рефліл, колір рани, наявність пухирів).

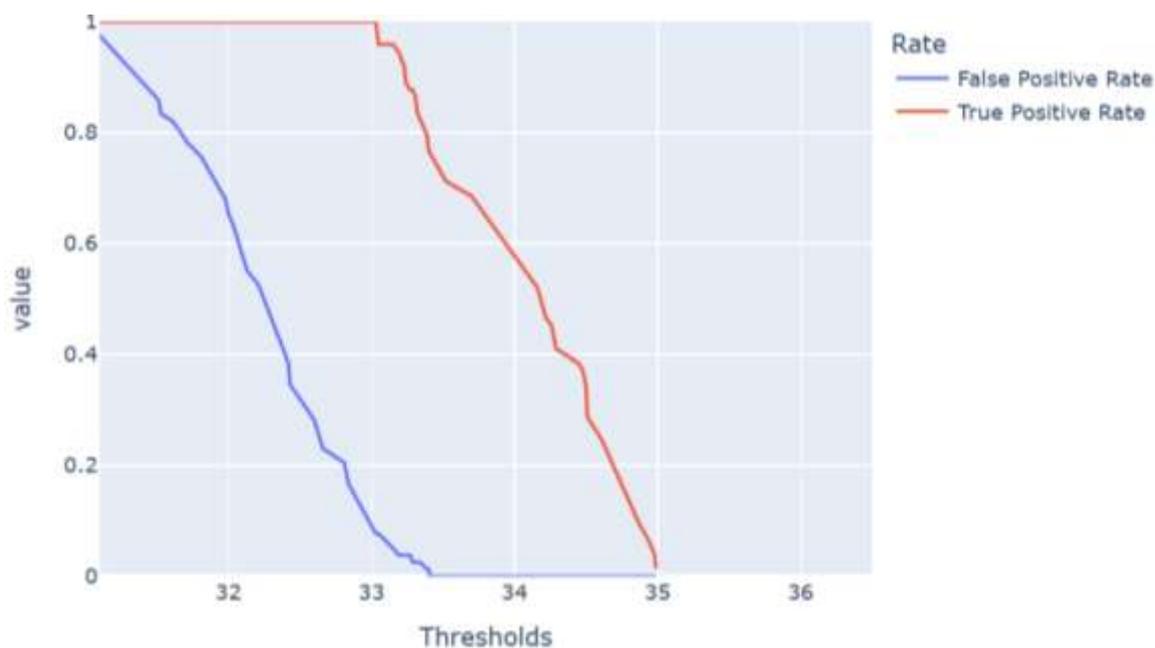


Рисунок 4.20 - Криві чутливості та хибнопозитивної частоти для різних порогів найнижчої температури на рані у прогнозуванні глибини ураження

Використання температурних маркерів ураженої ділянки показало високу діагностичну цінність для оцінки глибини опікових ран. Як різниця між температурою здорової шкіри та максимальною і мінімальною температурою на рані, так і абсолютні показники максимальної та мінімальної температури продемонстрували відмінну дискримінаційну здатність (AUC = 0,94–0,99). Встановлені порогові значення дозволяють чітко відокремити поверхневі ураження від глибоких ран із високим ризиком некрозу. Таким чином, температура ураженої ділянки є об'єктивним і надійним клінічним маркером, що може бути використаний для прогнозування глибини опіку та обґрунтування хірургічних рішень.

Комплексна оцінка глибини опікових ран на основі клінічних та інструментальних маркерів показала високу прогностичну значущість кожного окремого параметра. Капілярний рефіл (AUC = 0,81, cut-off 2,5 с), колір рани (AUC = 0,70), характер пухирів (AUC = 0,63) та температурні показники (AUC = 0,94–0,99) дозволяють об'єктивно відокремити поверхневі ураження від глибоких ран із високим ризиком некрозу. Використання цих маркерів підвищує точність діагностики, зменшує суб'єктивність оцінки та забезпечує

надійну основу для вибору оптимальної хірургічної тактики. Результати підтверджують ефективність комплексного підходу, що поєднує цифрову оцінку клінічних характеристик та сучасні інструментальні методи, для ранньої та точної оцінки глибини опікових уражень.

4.2. Розробка та апробація моделі штучного інтелекту оцінки глибини опікових ран за даними цифрової планіметрії, термографії та клінічних характеристик

Нами було розроблено комплексну модель оцінки глибини опікових уражень, що базується на поєднанні об'єктивних клінічних показників, цифрової планіметрії та термографічних даних. Необхідність такої моделі обґрунтована тим, що клінічне визначення глибини опіку за зовнішніми ознаками часто має суб'єктивний характер і залежить від досвіду лікаря. Використання машинного навчання дає змогу стандартизувати процес оцінки, підвищити точність діагностики та мінімізувати ймовірність людської помилки.

Для побудови моделі, на основі результатів, що наведені в підрозділі 4.2.1, було сформовано набір ознак, які відображають ключові фізіологічні та термальні властивості ранової поверхні. До аналізу були включені такі параметри: час капілярного рефілу, колір рани, наявність пухирів, мінімальна та максимальна температура в рані, найменша та найбільша різниця температур між ураженою та здоровою шкірою.

Клінічні ознаки, такі як колір рани та наявність пухирів, відображають морфологічні зміни шкіри після термічного ураження, а час капілярного рефілу — функціональний стан мікроциркуляції. Температурні параметри, отримані за допомогою інфрачервоної термографії, забезпечують кількісну оцінку життєздатності тканин. Найнижча температура у зоні опіку відображає ділянку некрозу або глибокого ураження, де мікроциркуляція повністю порушена. Найвища температура визначає зону поверхневого ураження, де збережене кровопостачання та відзначається активна запальна реакція. Саме в цій ділянці

зберігається потенціал до спонтанного загоєння без потреби у хірургічному втручанні.

Показники найменшої та найбільшої різниці температур ураження та інтактної шкіри, де найменша різниця відображає зону поверхневого опіку, де температура вища норми, а тканини частково життєздатні, а найбільша різниця вказує на центр глибокого ураження з максимальною термальною деструкцією.

Отримані параметри були використані як вхідні ознаки для побудови моделей машинного навчання. Для навчання та тестування було застосовано два алгоритми — RandomForest та XGBoost, які належать до ансамблевих методів класифікації. Обидва алгоритми добре зарекомендували себе у задачах медичної діагностики, оскільки здатні враховувати нелінійні взаємозв'язки між численними показниками та мають високу стійкість до шумових даних.

Для валідації моделей було використано набір клінічно підтверджених випадків (n=31), що містив як поверхневі, так і глибокі опіки. Дані були розділені на тренувальну та тестову вибірки. В процесі навчання алгоритми здійснювали автоматичний відбір найбільш значущих ознак та побудову дерев рішень, що визначають імовірність належності випадку до певного класу глибини ураження (див. табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Метрики точності моделей RandomForest та XGBoost на основі клінічних, планіметричних і термографічних даних

Модель	Accuracy	Precision (0)	Recall (0)	F1-score (0)	Precision (1)	Recall (1)	F1-score (1)
Random Forest	0.9677	0.94	1.00	0.97	1.00	0.94	0.97
XGBoost	0.9677	0.94	1.00	0.97	1.00	0.94	0.97

Отримані результати машинного навчання свідчать про високу точність побудованих моделей у диференціації глибини опікових уражень за сукупністю клінічних, планіметричних та термографічних параметрів. Для аналізу використовували два алгоритми — RandomForest та XGBoost (див. рис.4.2.1 та

4.2.2, відповідно), які є одними з найефективніших ансамблевих методів машинного навчання для задач класифікації медичних даних.

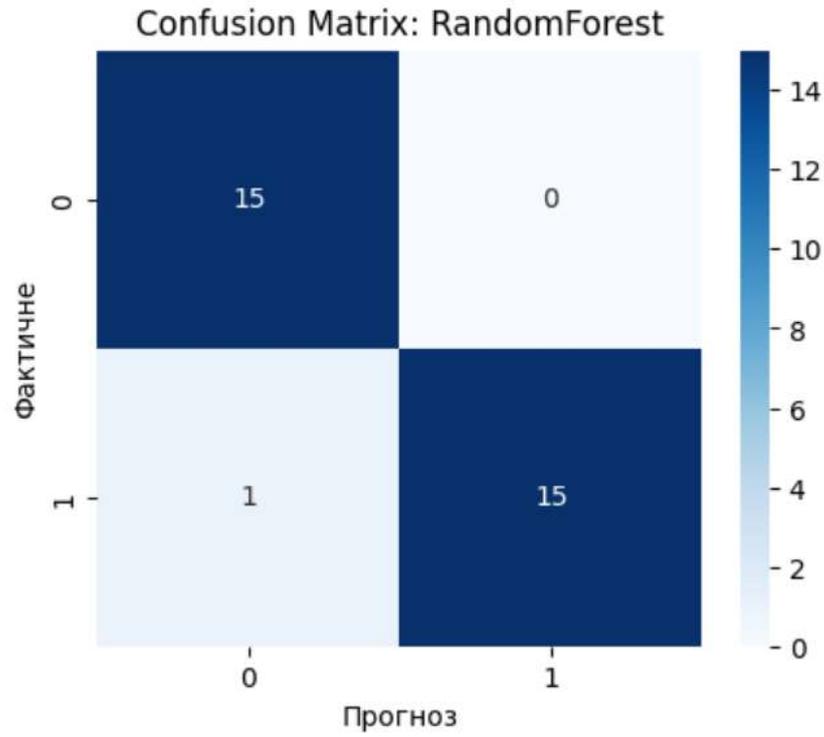


Рисунок 4.2.1 – Візуалізація помилок класифікації RandomForest: точне визначення поверхневих та глибоких опікових уражень на тестовій вибірці

За показником *Accuracy* (точність класифікації) обидві моделі продемонстрували ідентичне значення 0.9677 (96,77%), що свідчить про правильне визначення глибини ураження у 30 з 31 випадку. Такий високий рівень точності вказує на те, що сукупність обраних ознак (клінічних і термографічних) має високу діагностичну цінність для прогнозування ступеня опіку.

Показник *Precision* (точність позитивного прогнозу) характеризує, наскільки часто модель, прогнозуючи певну категорію (поверхневий або глибокий опік), виявляється правою. Для обох моделей точність становила 0.94 для поверхневих опіків (клас 0) і 1.00 для глибоких (клас 1). Це означає, що всі випадки, які система визначила як глибокі опіки, дійсно належали до цього класу, тобто хибнопозитивні результати були відсутні.

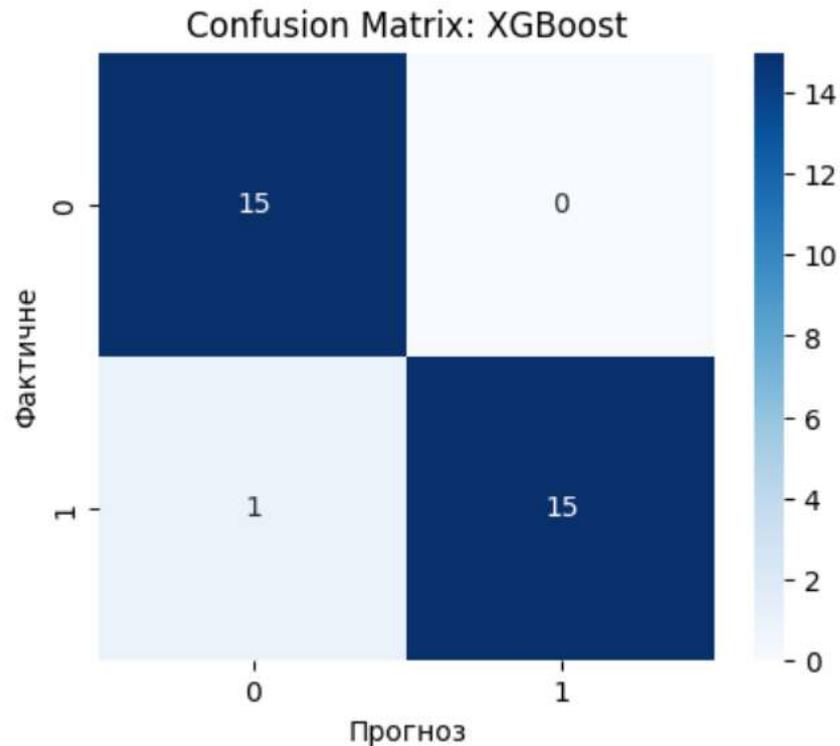


Рисунок 4.2.2 – Візуалізація помилок класифікації XGBoost точне визначення поверхневих та глибоких опікових уражень на тестовій вибірці

Показник *Recall* (чутливість, або повнота) відображає здатність моделі виявляти всі реальні випадки певного класу. Для поверхневих опіків чутливість становила 1.00, тобто модель виявила всі справжні випадки поверхневого ураження. Для глибоких опіків *Recall* склав 0.94, що свідчить лише про один пропущений випадок глибокого ураження серед усіх наявних у вибірці.

F1-score, який об'єднує точність і чутливість у єдиний збалансований показник, також був високим — 0.97 для обох класів. Це свідчить про стабільну роботу моделі без переважання помилок певного типу (ані хибнопозитивних, ані хибнонегативних).

Support вказує кількість прикладів у кожній категорії: 15 випадків поверхневих опіків та 16 — глибоких. Це відносно збалансована вибірка, що зменшує ризик упередження моделі щодо певного класу.

Варто зазначити, що Random Forest продемонстрував більшу стабільність на різних підвибірках під час крос-валідації, меншу варіабельність результатів і кращу інтерпретованість завдяки можливості оцінити важливість окремих

ознак. Тому саме Random Forest було обрано як найкращу модель для подальшої імплементації. При цьому, згідно з аналізом Feature Importance, найбільший внесок у точність диференціації внесли показники термографії, а значно менший – клінічні ознаки.

Отримані показники свідчать, що сформований набір ознак адекватно відображає патофізіологічні процеси в зоні опіку. Поєднання термографічних параметрів із клінічними дозволило підвищити точність диференціації до рівня, порівнянного з експертною оцінкою досвідченого лікаря.

Важливо, що модель виявилась здатною розпізнавати як поверхневі, так і глибокі ураження без суттєвого переважання одного з класів, що підтверджується рівномірними значеннями Precision та Recall.

Подальший аналіз внутрішньої структури моделі Random Forest показав, що найбільший вплив на результат диференціації мали показники мінімальної температури в рані, максимальної температури в рані, та час капілярного рефілу, що логічно узгоджується з клінічними спостереженнями.

Таким чином, побудована модель не лише виконує класифікацію, але й підтверджує діагностичну значущість відомих клінічних ознак, надаючи їм кількісне вираження через теплові характеристики. Це відкриває можливості для використання моделі як інструмента підтримки клінічних рішень, що зменшує суб'єктивний фактор у визначенні ступеня опіку.

Вказана модель штучного інтелекту може бути інтегрована в програму «Аналізатор рани», який уже використовується для цифрової планіметрії як окремий модуль для автоматизованого аналізу термографічних даних і видачі попереднього прогнозу глибини ураження. Планується, що після завантаження термографічного зображення програма визначатиме ділянки з мінімальною та максимальною температурою, розраховуватиме значення температури, та на основі алгоритму RandomForest прогнозуватиме ступінь опіку. Можна буде отримати результат у вигляді повідомлення з візуалізацією меж поверхневих і глибоких ділянок, що може бути використано лікарем для прийняття клінічного рішення.

Завдяки такій можливості буде створена основа для автоматизованої об'єктивної оцінки опікових ушкоджень, що може бути впроваджено у клінічну практику як допоміжний метод при первинному огляді пацієнтів із термічними травмами.

Це особливо актуально у військових умовах, коли час на діагностику обмежений, а досвід лікаря може бути різним. Автоматизована система дає змогу швидко і точно оцінити глибину опіку, спростити процес прийняття рішення і покращити відбір пацієнтів для хірургічного лікування.

Отже, алгоритми Random Forest та XGBoost досягли високої точності ($\approx 96.8\%$) у розпізнаванні глибини опіків. Модель Random Forest продемонструвала високу узагальнювальну здатність і може бути використана як основа для інтелектуальної системи підтримки рішень у медичній практиці.

Розроблена модель оцінки глибини опікових уражень, що поєднує клінічні ознаки, цифрову планіметрію та термографічні дані, продемонструвала високу точність і стабільність у диференціації поверхневих та глибоких опіків. Використання алгоритмів Random Forest та XGBoost дозволило досягти Accuracy 0,9677 ($\approx 96,8\%$), precision для поверхневих опіків — 0,94, для глибоких — 1,00, recall відповідно 1,00 і 0,94, а F1-score для обох класів — 0,97.

Аналіз важливості ознак показав, що найбільший внесок у правильну класифікацію мають термографічні показники, що підтверджує їх клінічну значущість. Модель демонструє здатність не тільки автоматично визначити глибину опіку, а й кількісно оцінювати важливі клінічні показники, зменшуючи суб'єктивний фактор при діагностиці.

Модель може бути інтегрована у програмний продукт «Аналізатор рани», що забезпечить швидку, відтворювану та об'єктивну оцінку опікових уражень, що особливо актуально в умовах обмеженого часу або недостатнього досвіду лікаря. Це відкриває можливості для застосування автоматизованої системи підтримки клінічних рішень та ефективного відбору пацієнтів для хірургічного лікування.

Отже, результати дослідження підтверджують високу діагностичну точність і практичну цінність моделі штучного інтелекту для оцінки глибини опікових ран. Поєднання методів цифрової планіметрії, термографії та клінічної оцінки дозволяє отримати об'єктивний, відтворюваний і швидкий результат, що може суттєво підвищити ефективність медичної допомоги пацієнтам з опіковими травмами.

Висновок. Комплексна оцінка глибини опікових уражень із використанням клінічних та інструментальних маркерів продемонструвала високу діагностичну точність і практичну значущість. Параметри капілярного рефілу (AUC = 0,81, cut-off 2,5 с), кольору рани (AUC = 0,70), характеру пухирів (AUC = 0,63) та температурних показників (AUC = 0,94–0,99) виявилися найбільш інформативними для диференціації поверхневих і глибоких опіків із ризиком некрозу. На основі цих даних згенеровано модель штучного інтелекту, що поєднує цифрову планіметрію, термографію та клінічну оцінку, забезпечує об'єктивне, відтворюване й швидке визначення глибини опікових ран. Такий підхід мінімізує суб'єктивність оцінки, підвищує точність діагностики та створює надійну основу для вибору оптимальної хірургічної тактики, сприяючи підвищенню ефективності лікування пацієнтів з опіковими травмами.

Результати, подані у розділі 4, опубліковані у наукових працях:

- Фармага ТІ, Лукавецький ОВ, Чемерис ОМ, Стояновський ІВ. Використання безконтактного термографа FLIR One для оцінювання глибини опікової рани. Хірургія дитячого віку (Україна). 2024;2(83):13–18. <https://doi.org/10.15574/PS.2024.83.13> [10]
- Фармага Т. І. Аналіз взаємозв'язків клінічними характеристиками та даних термографії з глибиною опікових ран // Матеріали 9-го Міжнародного наукового симпозіуму SMARTLION 2025 «Медична освіта та наукові дослідження в Україні під час війни» / за ред. проф.

3. Масної ; Наукове товариство ім. Шевченка та ін. – Львів : ДНП «ЛНМУ імені Данила Галицького», 2025. – С. 72–74 [15]

РОЗДІЛ 5

ВПРОВАДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ МЕТОДИКИ ХІРУРГІЧНОГО ЛІКУВАННЯ ОПІКОВИХ РАН

Запропонований метод оптимізації хірургічного лікування ран опікового генезу полягає у застосуванні тангенціального висічення нежиттєздатних тканин із обов'язковою перед- або інтраопераційною ідентифікацією ділянок глибокого опіку за допомогою портативного термографа FLIR One та одночасною аутодерматопластиком шкірним трансплантатом, розмір якого визначено за допомогою розробленої комп'ютерної програми для цифрової планіметрії «Аналізатор рани». Необхідність удосконалення методики зумовлена тим, що традиційні підходи до визначення глибини опіку значною мірою базуються на візуальній оцінці та досвіді хірурга, що може призводити до неточностей, зайвого видалення здорових тканин, підвищення ризику інфекційних ускладнень, формування рубців та зниження функціональності шкіри. Визначення глибини ураження є ключовим для вибору лікувальної тактики, і від точності цього процесу залежить ефективність хірургічного втручання.

Термографія, як неінвазивний метод оцінки опікових ран, дозволяє отримати детальну карту стану тканин, виявляючи зони з різною температурою, що відповідають ступеню ураження. При глибоких опіках порушується кровообіг уражених ділянок, що проявляється як зони зниженої температури. Термографія дає можливість не лише локалізувати ділянки, які потребують видалення, а й прогнозувати потенціал загоєння тканин, визначати межі зон частково життєздатної шкіри та оцінювати ризик розвитку ускладнень. Застосування термографії значно підвищує точність планування обсягу та глибини хірургічного втручання.

Тангенціальне висічення передбачає поширене видалення ураженої шкіри ручними ножами Goulian або Watson із регульованим захищеним лезом або електричним дерматомом. Лезо можна налаштувати до необхідної глибини, що

дозволяє контролювати товщину видалення та видаляти некротизовані шари послідовно до шару життєздатної васкуляризованої тканини. Такий підхід дозволяє зберегти здорові тканини, функціональні та косметичні властивості шкіри, знизити травматизацію та ризик післяопераційних ускладнень. У разі поверхневого ураження пріоритет надається консервативному лікуванню, оскільки тканина здатна до самовідновлення.

Негайна аутодерматоластика після видалення некротичних ділянок значно скорочує час лікування, прискорює загоєння та знижує ризик інфекцій. Використовуються сітчасті або листові трансплантати товщиною 0,3 мм, які фіксують скобами або вузловими швами після гемостазу, накривають пов'язкою «Grassolind» або «Jelonet» і марлевою пов'язкою. Комп'ютерна програма «Аналізатор рани» дозволяє точно розрахувати розмір і форму шкірного клаптя, враховуючи індивідуальні анатомічні та клінічні особливості пацієнта, що мінімізує травматизацію, підвищує приживлюваність трансплантату та точність операції.

Комбіноване використання термографії та цифрової планіметрії дозволяє зменшити обсяг видалення здорових тканин, покращити функціональний і косметичний результат, знизити ризик ускладнень, скоротити тривалість перебування у стаціонарі та потребу в повторних операціях. Це сприяє економії медичних ресурсів і підвищує якість життя пацієнтів після лікування. Використання обох методів дозволяє хірургу приймати більш обґрунтовані рішення щодо обсягу і техніки втручання, що особливо важливо при опіках на видимих ділянках тіла.

Для визначення переваг удосконаленого методу тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластикою було залучено 52 пацієнти з опіками верхніх і/або нижніх кінцівок. Критерії включення до дослідження були: вік 18–65 років, відсутність тяжкої супутньої патології, зокрема цукрового діабету, наявність глибокого опіку верхньої і/або нижньої кінцівки (II–III ступенів), загальна площа ураження менше 40,0% загальної поверхні

тіла. До дослідження були залучені пацієнти, які отримали опікову травму внаслідок контакту з розжареним предметом, окропом або полум'ям.

Для оцінки ефективності удосконаленого методу лікування сформовано дві групи: дослідну (28 пацієнтів) та контрольну (24 пацієнти), репрезентативні за статтю, віком, причиною, локалізацією та площею опіку. Пацієнтам дослідної групи застосовано запропоновану методику – тангенціальне висічення та одночасну аутодерматопластику із використанням розробленої комп'ютерної програми для вульнерометрії «Аналізатор рани» та термографії за допомогою пристрою FLIR One.

Контрольна група формувалась на основі архівних даних, тобто включала пацієнтів, які раніше отримували лікування за традиційними методиками: відтерміновану почергову некректомію, ксенопластику (за потреби) і відтерміновану аутодерматопластику. Таким чином, дослідна група відображає сучасну практику лікування пацієнтів із застосуванням удосконаленого методу, а контрольна — історичні дані, що дозволяє провести порівняльний аналіз ефективності нової методики щодо раніш прийнятого традиційного підходу.

Переваги лікування оцінюються за такими критеріями:

1. Загальний ліжко-день.
2. Час до повного загоєння рани.
3. Кількість перев'язок.
4. Кількість загальних знеболень.
5. Кількість оперативних втручань.
6. Частота інфекційних ускладнень.
7. Частота інших ускладнень.
8. Потреба у вторинній реконструкції.

Аналіз ефективності удосконаленого лікування хворих з опіковими ранами верхніх і/або нижніх кінцівок умовно поділили на два етапи. На першому оцінювали критерії, що стосувалися пацієнтів, - це загальний ліжко-день, проведений хворими в лікарняному закладі, кількість загальних знеболювань та оперативних втручань. На другому етапі аналізували критерії

ефективності лікування, які оцінювали щодо кожного окремого випадку - окремої рани на конкретних локалізаціях, загальний час до повного загоєння рани, кількість перев'язок для конкретної локалізації, частота інфекційних ускладнень та інших ускладнень і потреба у вторинній реконструкції.

За даними таблиці 5.1, хворі дослідної групи, тобто ті, які отримали хірургічну допомогу за удосконаленою нами методикою, у середньому перебували в стаціонарі $12,2 \pm 4,4$ доби, що практично удвічі менше, ніж у контрольній групі ($20,8 \pm 4,1$ доби), і підтверджено статистично. Кількість оперативних втручань у дослідній групі становила $1,6 \pm 0,9$, а в контрольній - $3,0 \pm 1,4$, що вірогідно більше. Відповідно, і кількість загальних знеболювань у дослідній групі була меншою ($1,8 \pm 1,2$), ніж у контрольній ($4,2 \pm 1,6$; $p < 0,05$). Варто звернути увагу на те, що кількість оперативних втручань практично відповідає кількості загальних знеболювань у дослідній групі, а от у контрольній групі кількість загальних знеболювань була значно більшою, що свідчить про необхідність використання загального знеболювання на перев'язках (див. рис. 5.1).

Таблиця 5.1 – Переваги лікування хворих з опіковими ранами верхніх і/або нижніх кінцівок

Критерій оцінки ефективності лікування	Дослідна група (n=28)	Контрольна група (n=24)	Вірогідність
Загальний ліжко-день, доби	$12,2 \pm 4,4$	$20,8 \pm 4,1$	$p < 0,05$
Кількість оперативних втручань	$1,6 \pm 0,9$	$3,0 \pm 1,4$	$p < 0,05$
Кількість загальних знеболювань	$1,8 \pm 1,2$	$4,2 \pm 1,6$	$p < 0,05$

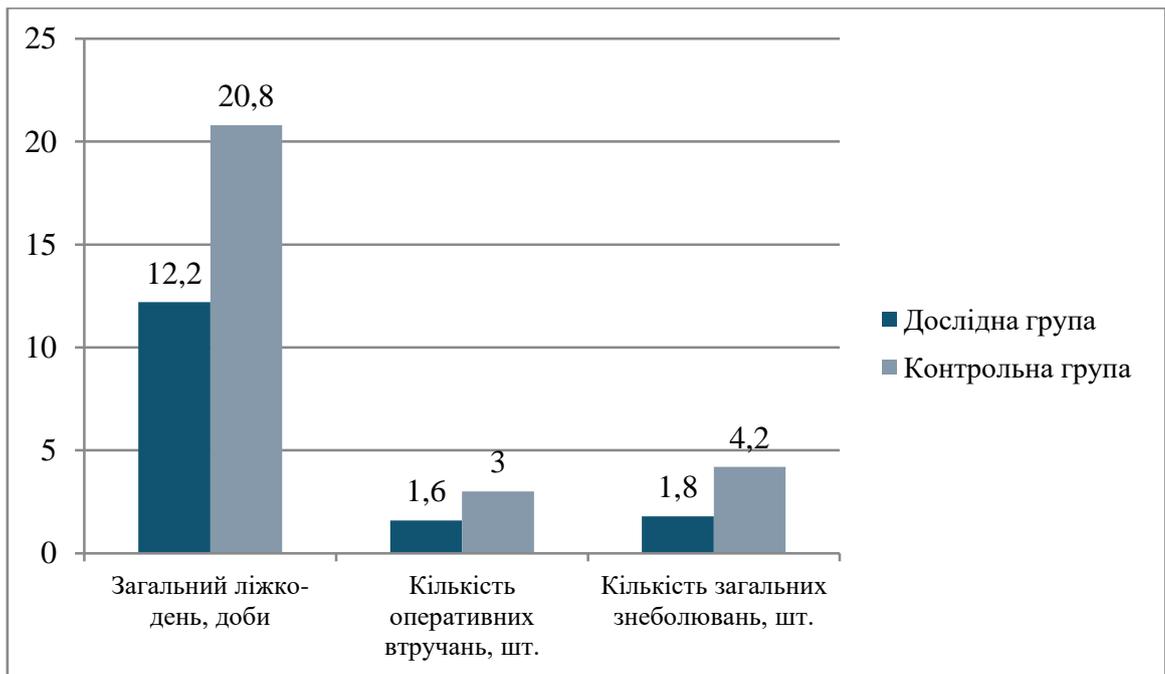


Рисунок 5.1 – Переваги лікування хворих з опіковими ранами верхніх і/або нижніх кінцівок

На наступному, другому етапі дослідження, на якому оцінювали переваги лікування окремо кожної рани в пацієнтів, визначали кількість перев'язок. Всього у дослідній групі було 67 ран, а у контрольній – 58 ран. У дослідній групі кількість перев'язок окремо для кожного ураження становила $4,0 \pm 1,3$, а в контрольній - практично у тричі більше ($11,5 \pm 2,3$; $p < 0,05$). Тривалість загоєння опікових ран у дослідній групі становила $15,5 \pm 3,9$ доби, що значно менше, ніж у контрольній групі ($28,3 \pm 5,4$ доби; $p < 0,05$).

Частота інфекційних ускладнень у дослідній групі становила 16,4% (11 випадків), а в контрольній - вірогідно більше (31,0%, або 18 випадків; $p < 0,05$). Частота інших ускладнень, таких як лізис шкірних трансплантатів, була вірогідно нижчою в дослідній групі (25,4%, або 17 випадків) порівняно з контрольною (53,4%, або 31 випадок).

Потребу у вторинній реконструкції оцінювали через 3-6 місяці після повного загоєння опікової рани. Враховуючи тривалість спостереження, до цього етапу дослідження не увійшли усі пацієнти. Серед пацієнтів дослідної групи потребу у вторинній реконструкції оцінювали на основі огляду 37 ран, а

в контрольній - 32 ран. Згідно з отриманими результатами, у дослідній групі тільки 4 (10,8%) рани потребували вторинного реконструктивного оперативного втручання, а в контрольній - вірогідно більше (12 ран, або 37,5%). Результати наведено у таблиці 5.2 та на рисунку 5.2.

Таблиця 5.2 - Переваги лікування опікових ран верхніх і/або нижніх кінцівок

Критерій оцінки ефективності лікування	Дослідна група (n=67)	Контрольна група (n=58)	Вірогідність
Кількість перев'язок	4,0±1,3	11,5±2,3	p<0,05
Час до повного загоєння рани, доби	15,5±3,9	28,3±5,4	p<0,05
Частота інфекційних ускладнень, абс. (%)	11 (16,4)	18 (31,0)	p<0,05
Частота інших ускладнень, абс. (%)	17 (25,4)	31 (53,4)	p>0,05

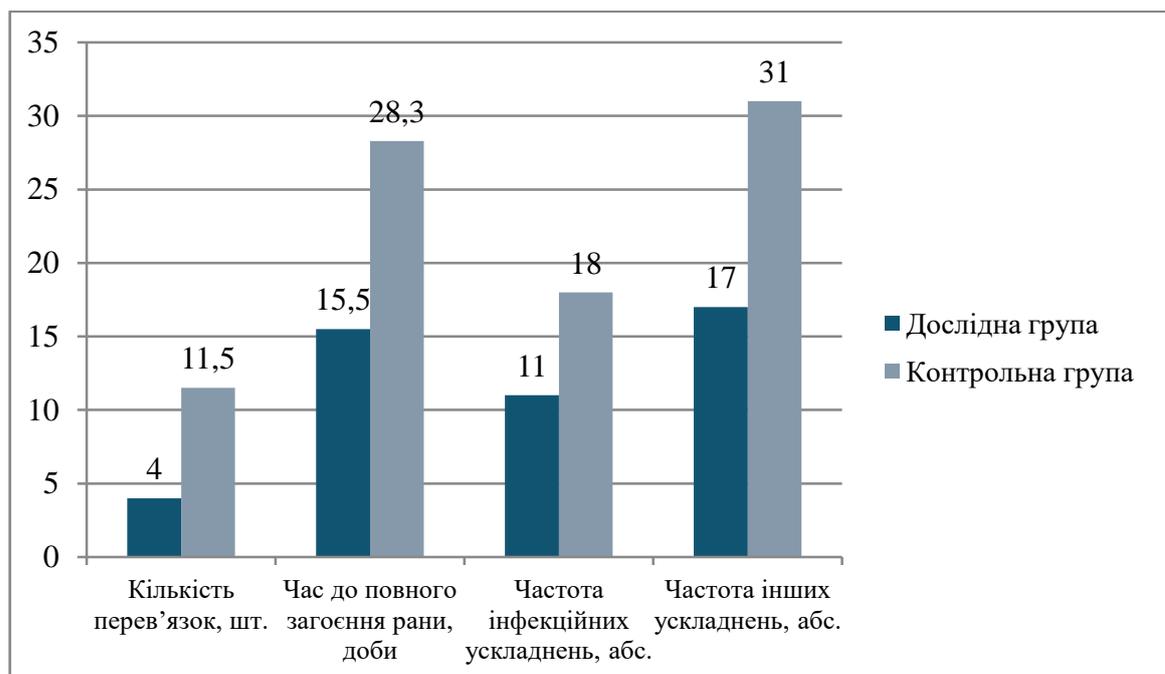


Рисунок 5.2 - Переваги лікування опікових ран верхніх і/або нижніх кінцівок

Сьогодні більшість опікових травм виникає через нещасні випадки в побуті, і кінцівки уражуються найчастіше. Більшість таких травм є поверхневими та лікуються самостійно вдома. Але близько чверті уражень є глибокими і потребують лікування у стаціонарі. Тривале перебування в лікарні небезпечно безпосередньо для хворого, адже створює можливості для додаткової контамінації внутрішньолікарняними стійкими до антибіотиків мікроорганізмами, а також створює додатковий тягар на систему охорони здоров'я. Фінансові витрати на лікування рани - це не лише вартість перев'язувальних матеріалів, бинтів та антисептиків, але й затрати на перебування хворого в лікарні та роботу медичних працівників. Тому оптимізація лікування хворих з опіковими ранами сьогодні вкрай необхідна.

Запропонована методика - тангенціальне висічення з одночасною аутодерматопластиком з додатковим використанням термографії та комп'ютерної програми «Аналізатор рани» в межах перших кількох діб після травми - дає змогу вірогідно скоротити кількість ліжко-днів у стаціонарі, зменшити число оперативних втручань і, отже, загальних знеболювань. Вірогідно зменшується потреба в додаткових перев'язках, а тривалість повного загоєння рани скорочується практично удвічі.

Щодо інфекційних уражень, то раннє закриття шкірного дефекту трансплантатом і скорочення перебування хворого у стаціонарі вірогідно зменшує частоту інфекційних ускладнень. Кількість інших ускладнень у хворих після тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластиком є також нижчою, проте не вірогідною.

Важливим критерієм ефективності лікування є потреба в додаткових вторинних реконструктивних втручаннях, адже опікові рани на кінцівках повинні загоїтися таким чином, аби кінцівка зберегла свою функціональність. Важливим є також естетичний вигляд рубця, адже такі рани часто складно прикрити одягом. Відповідно до отриманих результатів, хворі, яким проведено тангенціальне висічення з одночасною аутодерматопластиком, потребували вторинних реконструкцій достовірно рідше, ніж хворі в контрольній групі.

Отримані результати дають змогу рекомендувати запропоновану нами методику для лікування опікових ран кінцівок.

Лікування опікових ран верхніх і/або нижніх кінцівок методом тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластиком за удосконаленою нами методикою дає змогу вірогідно скоротити тривалість перебування хворих у стаціонарі, зменшити кількість оперативних втручань, загальних знеболювань, перев'язок, а також забезпечити швидше загоєння рани, зменшити частоту ускладнень і потребу у вторинній реконструкції.

Клінічні випадки

Клінічний випадок 1. Пацієнт, 20 років, військовослужбовець Збройних сил України, отримав термічний опік під час несення служби. Діагностовано опіки обличчя, обох верхніх та нижніх кінцівок полум'ям і був госпіталізований в опікове відділення для дорослих Міського центру термічної травми та пластичної хірургії відокремленого підрозділу «Лікарня Святого Луки» Комунального некомерційного підприємства «Львівське територіальне медичне об'єднання «Багатопрофільна клінічна лікарня інтенсивних методів лікування та швидкої медичної допомоги» через 2 години 40 хвилин після травми. При первинному огляді лікарем-хірургом було встановлено, що опіки становлять 20,0 % площі тіла, з яких приблизно 10,0 % поверхневі опіки (ПА), а 10,0 % - глибокі (ПБ). Наступного дня після травми було заплановане оперативне втручання.

Під час підготовки до операції було проведено термографію портативним термографом FLIR One для детальної оцінки глибини ураження тканин (див. рисунок 5.3).

Ця технологія дозволила виявити ділянки з різними температурними аномаліями, що свідчать про порушення кровопостачання та наявність глибоких ушкоджень тканин. Термографічне обстеження дозволило чітко розділити зони нормальної шкіри, поверхневого та глибокого опіку, що дало

можливість максимально точно визначити ділянки, які потребують хірургічного видалення.

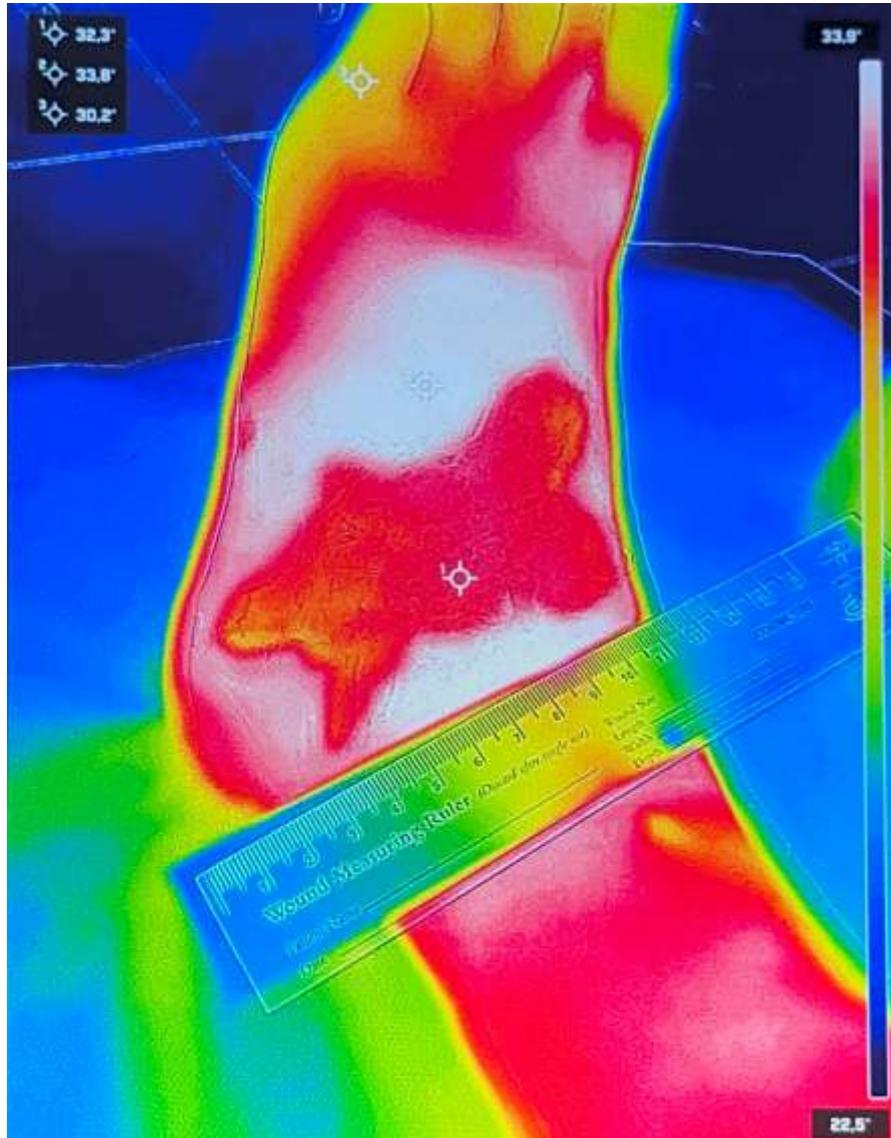


Рисунок 5.3 – Термофотографія правої стопи перед оперативним втручанням

Таким чином було підтверджено, що поверхневий опік становив 11,2 % площі поверхні тіла, а глибокий – 8,6% площі поверхні тіла.

Для подальшого планування хірургічного втручання було застосовано розроблену нами комп'ютерну програму для цифрової вульнерометрії «Аналізатор рани» (див. рисунок 5.4).

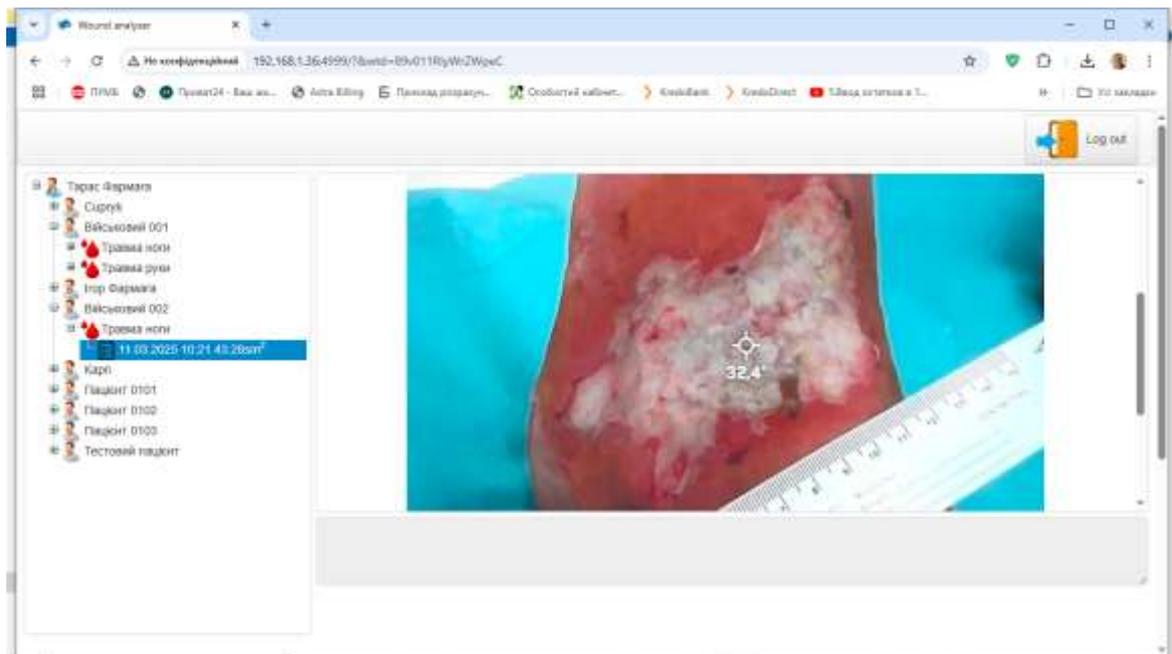


Рисунок 5.4 - Цифрова фотографія рани правої стопи під час опрацювання у комп'ютерній програмі «Аналізатор рани»

Ця програма забезпечила точний розрахунок необхідного розміру і форми шкірного клаптя для аутодерматопластики (див. рисунок 5.5, 5.6).

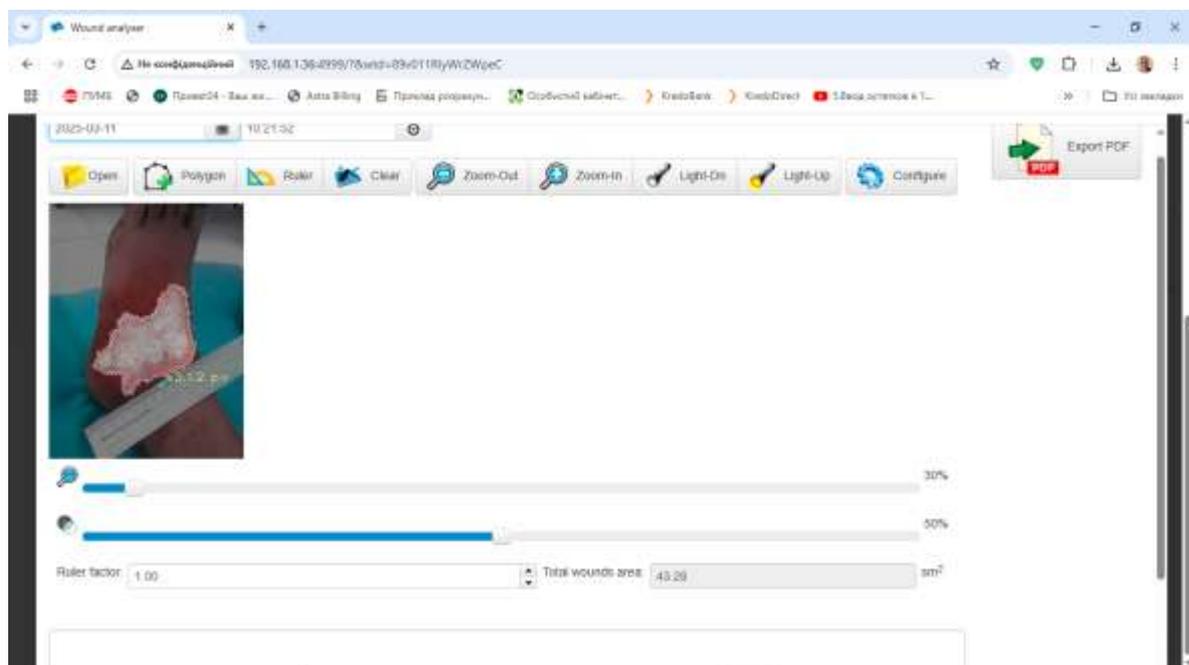


Рисунок 5.5 - Цифрова фотографія рани правої стопи із виділеним її контуром під час опрацювання у комп'ютерній програмі «Аналізатор рани»

Використання цього інструмента допомогло точно визначити ділянки для пересадки, що значно скоротило час операції та покращило її результати.

Wound Survey Report [11.03.2025 10:21]



Total wound area: 43.2802 cm²

Рисунок 5.6 – Звіт із комп'ютерної програми «Аналізатор рани» щодо розмірів рани правої стопи

Під час операції було проведено тангенціальне висічення некротизованих тканин з максимальним збереженням життєздатних шарів шкіри. Використання термографії дозволило уникнути зайвого видалення здорових тканин, що є важливим для збереження функціональних і косметичних властивостей шкіри. Після видалення некротизованих ділянок було негайно проведено аутодерматопластику. Для трансплантації використовувався шкірні клапті з обох стегон пацієнта.

Після операції пацієнт перебував під пильним наглядом медичного персоналу. Відновлення проходило без ускладнень, а епітелізація шкірного трансплантата почалася на 6-й день після операції. Повна реепітелізація відбулася через 16 днів. Всього пацієнт перебував у стаціонарі 21 ліжко/день.

Клінічний випадок 2. Пацієнт, 48 років, цивільний чоловік, отримав термічний опік у побуті. Діагностовано, зокрема, опікову рану тильної поверхні лівої стопи з поширенням на ділянку правого гомілково-ступневого суглоба. Також уражено обидві гомілки. Госпіталізований до опікового відділення через 3 години після травми. При первинному огляді було встановлено: площа опіку становить 8,0 % поверхні тіла, з яких 5,0 % — поверхневі (IIA), а 3,0 % — глибокі (IIB–III).

Особливістю цього випадку було ураження функціонально важливої ділянки — тильної поверхні стопи та гомілково-ступневого суглоба, від стану якої залежить здатність пацієнта до пересування та відновлення працездатності.

Для уточнення глибини ураження перед операцією проведено термографічне обстеження, яке дозволило визначити ділянки з порушеним кровопостачанням та підтвердило наявність 3,8 % глибокого опіку (див. рис. 5.7).



Рисунок 5.7 – Термофотографія лівої стопи та ділянки гомілково-ступневого суглобу перед оперативним втручанням

Для планування реконструктивного втручання було застосовано цифрову програму для вольнерометрії «Аналізатор рани». Програма дала можливість визначити площу та форму ураження, а також розрахувати розміри необхідного шкірного клаптя для аутодерматопластики. Результати наведено на рисунку 5.8, 5.9, 5.10.

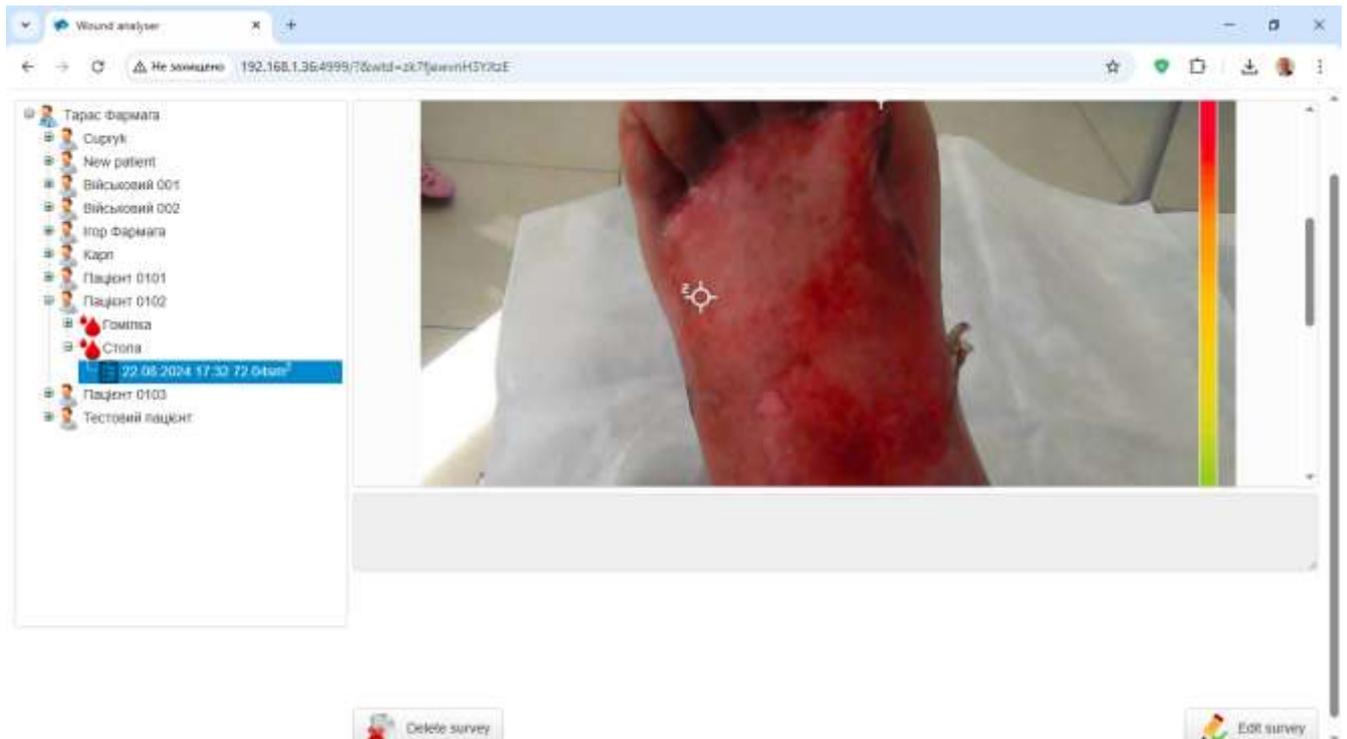


Рисунок 5.8 - Цифрова фотографія рани лівої стопи та гомілково-ступневого суглобу під час опрацювання у комп'ютерній програмі «Аналізатор рани»



Рисунок 5.9 - Цифрова фотографія рани лівої стопи та гомілково-ступневого суглобу із виділеним її контуром під час опрацювання у комп'ютерній програмі «Аналізатор рани»

Хірургічне лікування: виконано тангенціальне висічення некротизованих тканин із максимально можливим збереженням життєздатних структур шкіри й підшкірної клітковини. Проведена аутодерматопластика розщепленими шкірними клаптями, взятими з передньої поверхні обох стегон.

Завдяки використанню термографії вдалося уникнути надлишкового видалення тканин, що дозволило зберегти рухливість у гомілково-ступневому суглобі. Епітелізація трансплантата почалася на 5-й день, повне приживлення — на 20-й день. Пацієнт перебував у стаціонарі 22 ліжко/дні.

Динаміка відновлення:

Через 3 місяці після операції — задовільний стан трансплантата, збереження функції стопи. Обсяг рухів у гомілково-ступневому суглобі:

- дорзальне згинання — 15° (норма 20°);
- підшопвне згинання — 38° (норма 45°);
- інверсія — 25° (норма 30°);
- еверсія — 15° (норма 20°).

Пацієнт може пересуватись самостійно без сторонньої допомоги.

Через 6 місяців після операції — відзначено покращення рухливості та відновлення функції. Обсяг рухів:

- дорзальне згинання — 18° (норма 20°);
- підшопвне згинання — 42° (норма 45°);
- інверсія — 28° (норма 30°);
- еверсія — 18° (норма 20°).

Загальна функція оцінена як задовільна, рухливість гомілково-ступневого суглоба практично відповідає фізіологічній нормі, пацієнт відновив працездатність.

Wound: Стопа

Wound Survey Report [22.08.2024 17:32]



Total wound area: 72.0172 sm²

Рисунок 5.10 – Звіт із комп'ютерної програми «Аналізатор рани» щодо розмірів рани лівої стопи та гомілково-ступневого суглобу

Клінічний випадок 3. Пацієнтка, 36 років, отримала термічний опік гарячою рідиною у побуті. Діагностовано ураження шкіри правої гомілки. Госпіталізована до опікового відділення через 2 години після травми. При

первинному огляді було встановлено: площа ураження становить 6,9 % поверхні тіла, з яких 3,9 % — поверхневі (IIA), а 3,0 % — глибокі (IIB–III).

Особливістю цього випадку була локалізація на відкритій ділянці тіла — гомілці, що мало не лише функціональне, але й важливе косметичне значення, оскільки рубцювання могло вплинути на якість життя пацієнтки та її психологічний стан.

Для уточнення глибини ураження проведено термографічне обстеження, яке дозволило чітко розмежувати ділянки поверхневого і глибокого опіку. Результати термографії наведено на рисунку 5.11.

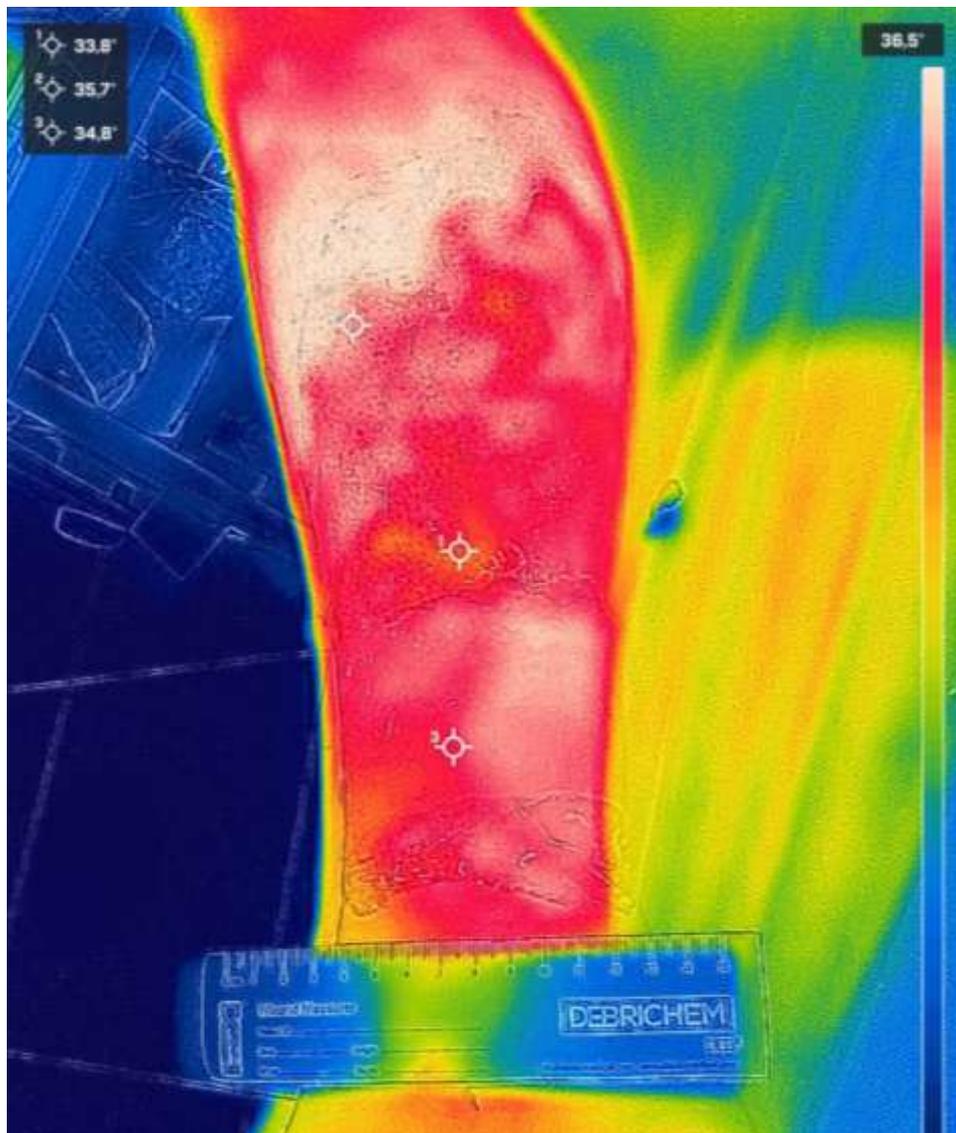


Рисунок 5.11 – Термофотографія правої гомілки перед оперативним втручанням

Для планування реконструктивного втручання застосовано програму цифрової вульнерометрії «Аналізатор рани», що дало змогу визначити площу та форму ураження та розрахувати необхідні параметри шкірного клаптя для аутодерматопластики. Результати наведено на рисунках 5.12, 5.13, 5.14.

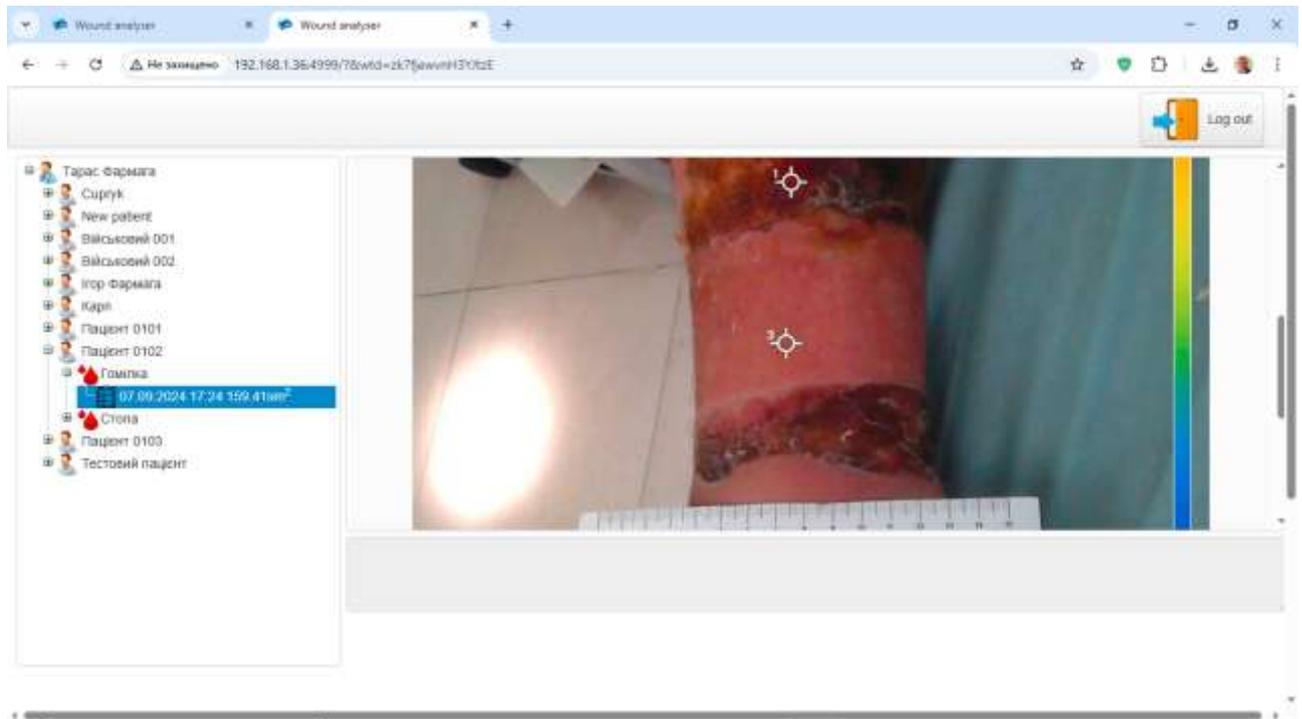


Рисунок 5.12 - Цифрова фотографія рани правої гомілки під час опрацювання у комп'ютерній програмі «Аналізатор рани»

Хірургічне лікування: виконано тангенціальне висічення некротизованих тканин із максимально можливим збереженням життєздатних структур дерми. Проведена аутодерматопластика розщепленими шкірними клаптями, отриманими з передньої поверхні стегна.

Завдяки точному визначенню меж ураження вдалося уникнути зайвого висічення тканин, що зменшило розмір рубця і покращило косметичний результат. Епітелізація трансплантата почалася на 6-й день, повне приживлення — на 15-й день. Пацієнтка перебувала у стаціонарі 19 ліжок/днів.

Динаміка відновлення:

Через 3 місяці після операції — трансплантат прижив повністю, відзначається помірна гіперемія і ущільнення тканини у зоні рубця.

Косметичний дефект частково маскується, пацієнтка використовує компресійний рукав. Функція передпліччя — збережена повністю.

Через 6 місяців після операції — рубець м'який, еластичний, колір шкіри наближений до навколишніх тканин. Функція передпліччя повністю відновлена, косметичний дефект мінімальний і оцінюється як задовільний.

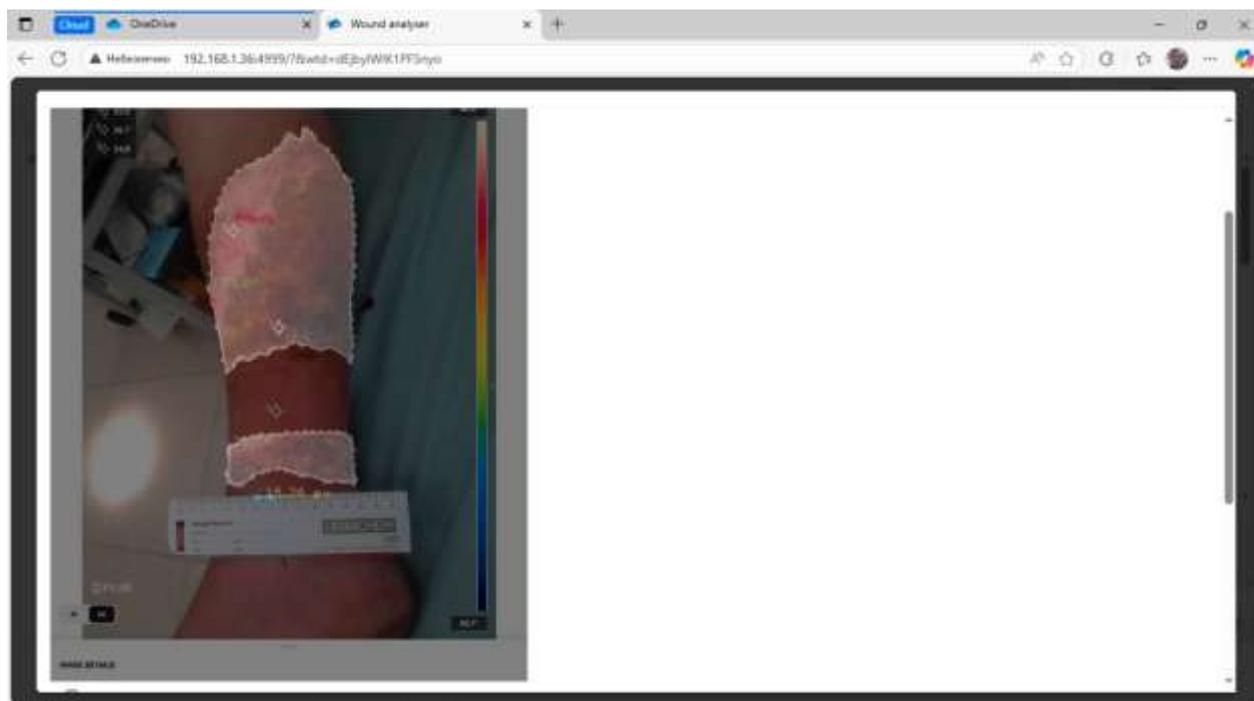


Рисунок 5.13 - Цифрова фотографія рани правої гомілки із виділенням її контуром під час опрацювання у комп'ютерній програмі «Аналізатор рани»

Представлені клінічні випадки демонструють ефективність інноваційного підходу до лікування опіків, що базується на поєднанні термографії для точної оцінки глибини ураження та цифрової програми «Аналізатор рани» для визначення площі та форми шкірних трансплантатів. Така методика забезпечує індивідуалізоване планування хірургічного втручання, дозволяє уникати надмірного висічення здорових тканин і скорочує час операції.

Patient: Пацієнт 0102

Wound: Гомілка

Wound Survey Report [07.09.2024 17:24]



Total wound area: 159.385 sm²

Рисунок 5.14 – Звіт із комп'ютерної програми «Аналізатор рани» щодо розмірів рани правої гомілки

Використання цієї технології дало змогу:

- у пацієнта з масивними опіками кінцівок — досягти швидкого приживлення трансплантатів і відновлення шкірного покриву без ускладнень;
- у випадку опіку стопи та гомілково-ступневого суглоба — зберегти рухливість у функціонально важливій ділянці та відновити працездатність;
- у пацієнтки з опіком передпліччя — мінімізувати косметичний дефект та отримати задовільний естетичний результат.

Таким чином, впровадження термографії та цифрової вольнерометрії у клінічну практику дозволяє не лише підвищити ефективність лікування пацієнтів з опіками, але й значно покращити їх функціональні та естетичні результати, а також підвищити якість життя після травми.

Висновок. Проведене дослідження підтвердило, що запропонована методика тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластиком, поєднана з термографією та цифровими технологіями оцінки рани, значно підвищує точність діагностики і ефективність лікування опікових ран порівняно з традиційними підходами. Використання портативного термографа FLIR One дозволяє отримати детальну інформацію про стан тканин, виявити ділянки з порушеним кровообігом та визначити межі життєздатної шкіри, а цифрова програма «Аналізатор рани» забезпечує точний розрахунок розмірів і форми шкірного клаптя для трансплантації. Це поєднання дозволяє хірургу приймати обґрунтовані рішення щодо обсягу та глибини видалення ушкоджених тканин, мінімізувати травматизацію здорових ділянок та оптимізувати хірургічне втручання.

Застосування запропонованого підходу сприяє зменшенню ризику інфекційних ускладнень і некрозу, скорочує тривалість перебування пацієнтів у стаціонарі, зменшує кількість оперативних втручань, потребу в загальному знеболюванні та частоту перев'язок. Одночасно методика знижує ймовірність

повторних реконструктивних операцій і утворення рубцевих змін, що важливо для збереження функціональних та косметичних властивостей шкіри.

Таким чином, запропонована методика хірургічного лікування опікових ран є значним кроком уперед у галузі пластичної та реконструктивної хірургії. Вона забезпечує індивідуалізовану, надійну та точну оцінку глибини і розмірів ушкоджень, підвищує безпеку та ефективність лікування, сприяє швидшому загоєнню тканин і покращенню якості життя пацієнтів, одночасно оптимізуючи використання медичних ресурсів. Впровадження такого підходу у клінічну практику дозволяє встановлювати нові стандарти лікування опікових ран і спрямоване підвищення рівня медичної допомоги для пацієнтів із подібними травмами.

Результати, подані у розділі 4, опубліковані у наукових працях:

- Фармага ТІ, Лукавецький ОВ, Чемерис ОМ. Переваги тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластикомою для лікування опікових ран. Хірургія дитячого віку (Україна). 2023;2(79):23–27. <https://doi.org/10.15574/PS.2023.79.23> [13]
- Фармага ТІ, Лукавецький ОВ, Чемерис ОМ. Використання власної комп'ютерної програми для вольнерометрії та термографії у лікуванні опікових ран: опис власного клінічного випадку. Клінічна анатомія та оперативна хірургія. 2025;24(2):92–97. <https://doi.org/10.24061/1727-0847.24.2.2025.30> [11]

АНАЛІЗ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Опікова травма є однією з найпоширеніших та одночасно складних у діагностиці і лікуванні форм травмування [101]. Вона характеризується не лише болем і високим ризиком ускладнень, але й значним соціально-економічним навантаженням через тривале перебування пацієнтів у стаціонарі та потребу у подальшій реабілітації. Опік не обмежується віковими чи статевими характеристиками пацієнтів і може виникати у будь-якій віковій групі; проте статистично найбільш схильні до отримання опіків – молоді працездатні особи [92, 148]. Особливо актуальним питання лікування опікових ран є у контексті бойових травм, де опіки часто поєднуються з іншими тяжкими ушкодженнями, що ускладнює процес лікування та реабілітації [92].

За останні десятиліття у світі було створено численні спеціалізовані центри лікування опіків, що дозволило значно знизити рівень летальності пацієнтів із тяжкими опіками [92]. Проте, незважаючи на технологічний прогрес, лікування таких пацієнтів залишається надзвичайно складним завданням через різноманітність ускладнень, що виникають під час перебігу хвороби, тривалу госпіталізацію, а також необхідність проведення комплексного посттравматичного догляду, корекції рубцевих деформацій та підтримки психологічного стану пацієнтів [29].

Ключовим аспектом успішного лікування є своєчасна та об'єктивна оцінка опікової рани на всіх етапах ведення пацієнта [21]. В першу чергу, важливим завданням є диференціація некротизованих тканин від живих, здатних до самовідновлення, що визначає подальшу стратегію лікування та безпосередньо впливає на результати реконвалесценції пацієнта [60]. Від правильно прийнятих рішень на первинному етапі залежить ефективність хірургічного та консервативного лікування, швидкість відновлення шкірного покриву та ризик розвитку ускладнень.

При плануванні лікувальної тактики критично важливо враховувати як площу, так і глибину опіку [21]. Динамічне спостереження за пацієнтом

повинно включати регулярну оцінку змін розмірів та глибини опікової рани для своєчасного корегування терапевтичних підходів і прогнозування термінів одужання [60]. Об'єктивні дані про розміри та глибину рани також є необхідними для проведення реконструктивної хірургії, оскільки дозволяють точно визначити площу ураження та обсяг донорської шкіри або величину шкірного клаптя, що підлягає трансплантації.

У сучасній клінічній практиці активно впроваджуються новітні технології для оцінки опікових ран. Серед них виділяють цифрову планіметрію, термографію, ультразвукову та фотоакустичну візуалізацію, які дозволяють отримати більш точні та об'єктивні дані про ураження тканин. Такі підходи підвищують ефективність лікування, знижують ризик ускладнень і сприяють поліпшенню якості життя пацієнтів. Водночас важливим аспектом є інтеграція цих методів у цифрові бази даних пацієнтів, що забезпечує системність ведення документації, підтримує наукові дослідження та дозволяє стандартизувати процес прийняття клінічних рішень.

Ретроспективний аналіз існуючих методик оцінки опікових ран показав широкий спектр доступних підходів – від простих «на око» до високотехнологічних методів, що потребують спеціалізованого обладнання та значних фінансових ресурсів [8, 49, 74]. Незважаючи на високу точність складних технологій, їх застосування обмежене у рутинній клінічній практиці через вартість та технічні складнощі. У цьому контексті термометрія демонструє перспективи як доступний та відносно точний метод оцінки глибини ураження тканин. Це обумовило поставлену задачу – розробити недорогу та просту у використанні комп'ютерну програму для аналізу площі опікових ран із інтеграцією термографії для оцінки глибини. Такий підхід потенційно дозволяє суттєво покращити діагностику та оптимізувати лікувальні стратегії.

Аналіз методик лікування опіків підтвердив, що сучасна терапія є комплексною і багатокомпонентною. Незважаючи на значний технологічний прогрес та зниження летальності, наразі відсутній ідеальний біоматеріал,

здатний повністю імітувати структуру шкіри та відновлювати її функції, включно з пігментацією, шкірними придатками, судинною мережею та нервовими закінченнями. Найбільш оптимальним матеріалом залишається власна шкіра пацієнта, проте її кількість обмежена. Водночас відсутність чітких критеріїв для вибору між хірургічним та консервативним лікуванням залишає рішення за клінічним досвідом хірурга, що створює суб'єктивний компонент у виборі стратегії лікування і підкреслює необхідність подальших наукових досліджень для стандартизації підходів.

Таким чином, удосконалення методів діагностики та лікування опікових ран є актуальною клінічною та науковою проблемою. Впровадження інноваційних технологій і стандартизація клінічних протоколів можуть значно підвищити якість медичної допомоги, сприяти скороченню термінів реабілітації та покращенню якості життя пацієнтів із опіками.

Під час створення інструменту для клінічної практики ми врахували потреби медичного закладу, лікуючого персоналу та самого пацієнта. Основними критеріями стали простота у використанні, надійність та доступність технології для практикуючого лікаря, незалежно від його технічної підготовки.

Після отримання письмової згоди на проведення комплексного обстеження відповідно до принципів Гельсінкської декларації прав людини, Конвенції Ради Європи про права людини і біомедицину, відповідних законів України та міжнародних актів у рандомізований спосіб у дослідження залучено 151 хворий з ранами опікового генезу, що отримували медичну допомогу в опіковому відділенні для дорослих Міського центру термічної травми та пластичної хірургії відокремленого підрозділу «Лікарня Святого Луки» Комунального некомерційного підприємства «Львівське територіальне медичне об'єднання «Багатопрофільна клінічна лікарня інтенсивних методів лікування та швидкої медичної допомоги». Серед обстежених пацієнтів переважали чоловіки (59,4 %) працездатного (42,4 % середнього та 35,1 % зрілого) віку, що отримали травму переважно внаслідок контакту з полум'ям (47,0 %). Площа

ураження у третини обстежених перевищувала 20,0 % загальної площі тіла (39,7 %) з переважною локалізацією ран на функціональних та видимих ділянках шкіри – на кистях та/або передпліччях (27,6 %) і гомілках та/або стопах (22,7 %).

Усіх хворих було обстежено відповідно до актуальних клінічних протоколів та Стандарту медичної допомоги «Опіки» (Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 09.10.2023 № 1767). Додатково, під час оцінки локального статусу було зроблено традиційне фото рани, а також додатково термофотографію за допомогою безконтактного термометра FLIR One, які в подальшому оцінювалися.

Статистичну обробку даних проведено у Microsoft Excel, SPSS та Python із застосуванням методів описової статистики, t- і z-критеріїв, лінійної регресії та ROC-аналізу. Для підвищення точності діагностики глибини опіків використано моделі машинного навчання (Random Forest, Logistic Regression), які на основі клінічних і термографічних параметрів забезпечили оцінку діагностичної ефективності.

У процесі виконання роботи нами було розроблено та апробовано програмне забезпечення «Аналізатор ран», призначене для цифрової планіметричної вульнерометрії, що забезпечує об'єктивну, точну та відтворювану оцінку площі ураження шкірних дефектів. Програмний продукт є результатом інтеграції клінічних потреб у точному вимірюванні параметрів ран з технічними можливостями сучасних інформаційних технологій. Його архітектура передбачає простоту використання, сумісність із типовими робочими комп'ютерами лікувальних закладів і зручний інтерфейс, який не вимагає спеціальної технічної підготовки медичного персоналу.

Розроблена система забезпечує проведення повного циклу цифрової планіметричної оцінки, який включає три етапи: отримання зображення ураженої ділянки у цифровому форматі, його аналітичну обробку за допомогою спеціальних алгоритмів та збереження отриманих результатів у базі даних пацієнтів. Програмне забезпечення реалізує можливість синхронізації

зображень через хмарне середовище, автоматизованого обчислення площі полігона, що відповідає межах ушкодження, та масштабування даних у реальні одиниці вимірювання. Це дозволяє усунути суб'єктивний фактор при оцінці ранового процесу, а також забезпечує точність і відтворюваність результатів незалежно від досвіду лікаря.

Використання інтерактивного режиму нанесення контурів ушкодження на багатошаровому зображенні забезпечує візуальний контроль меж дефекту та дозволяє поєднати клінічну оцінку з комп'ютерним аналізом. Додаткові функціональні можливості — створення централізованої бази даних установи, авторизація користувачів для збереження конфіденційності та можливість дистанційних консультацій — роблять «Аналізатор ран» не лише діагностичним, а й інформаційно-аналітичним інструментом сучасної медицини.

Апробація програми була проведена на клінічному матеріалі, що включав 23 пацієнтів із різними видами ран: глибокими та поверхневими опіками (16 випадків), післятравматичними (5 випадків) і кусаними (2 випадки). У ході дослідження визначали планіметричні параметри — площу, периметр, довжину, ширину та радіус ураження. Порівняння цифрових даних із клінічними спостереженнями підтвердило високу точність методу: для оцінки ширини рани – $98,96 \pm 1,28\%$, довжини – $99,43 \pm 0,79\%$, радіусу – $99,61 \pm 0,65\%$, периметру – $98,96 \pm 1,19\%$, площі – $99,52 \pm 0,67\%$. Такі показники точності свідчать про високу надійність програми в клінічному застосуванні та дають змогу значно підвищити об'єктивність оцінки стану пацієнта.

Отримані результати демонструють, що цифрова планіметрична вольнерометрія за допомогою програми «Аналізатор ран» може ефективно замінити традиційну візуальну оцінку ран, мінімізуючи похибки, зумовлені людським фактором. Збереження даних у базі дозволяє здійснювати моніторинг динаміки загоєння упродовж усього лікування, що створює можливості для побудови індивідуальних прогнозів і вибору оптимальної тактики терапії.

Запропонована нами методика має концептуальну подібність до низки існуючих підходів кількісної оцінки параметрів ран, проте відрізняється вищим рівнем інтеграції та універсальності. Зокрема, метод L. Ceas [25] базується на фотографуванні рани у натуральну величину з використанням камери миттєвого знімання, тоді як Н. А. Thawer [127] застосував аналогову відеокамеру з подальшим оцифруванням зображення за допомогою плати введення (frame grabber) та автоматичним аналізом параметрів у спеціалізованому програмному забезпеченні VeV Measurement Documentation Vista Medical.

Інші підходи, такі як цифрове фотографування із використанням площинного еталону, дозволяють розраховувати площу рани шляхом співвідношення кількості пікселів дефекту шкіри до кількості пікселів еталона із відомою площею. Подібний принцип реалізований у розробці Ф. І. Гюльмамедова [5], де комп'ютерна програма визначає площу ураження за фотографією, зробленою під прямим кутом, з подальшим перетворенням відносних величин у абсолютні через порівняння з маркером відомих розмірів.

Розвитком цих підходів є роботи Р. Foltynski [39, 40], який створив мобільний застосунок Planimator app, що забезпечує точніше вимірювання, ніж попередні системи (наприклад, Visitrak), і реалізує ідею портативного аналізу ран за допомогою смартфона.

На відміну від наведених методів, запропонована нами технологія орієнтована на потреби сучасної вітчизняної медицини та має хмарну архітектуру, що забезпечує доступ із будь-якого пристрою та місця. Вона не обмежується конкретним апаратним забезпеченням, дозволяючи використовувати будь-яке цифрове зображення (у тому числі зроблене смартфоном) для аналізу, що значно розширює її практичну застосовність і підвищує ефективність у клінічних умовах.

Оцінка лише площі опікової рани не дає повного уявлення про тяжкість ураження, адже для визначення лікувальної тактики необхідно одночасно враховувати як розміри, так і глибину опіку. Саме поєднання цих двох

параметрів має ключове значення для прогнозування перебігу ранового процесу, вибору між консервативним і хірургічним лікуванням та оцінки ефективності терапії.

Існуючі волюметричні технології, спрямовані на тривимірну оцінку ураження, не повною мірою відповідають сучасним клінічним потребам, оскільки є часо- та ресурсоємними, потребують складного обладнання та кваліфікованого персоналу [3, 4, 16, 66, 97, 121].

Серед методів, призначених для оцінки глибини опікових уражень, виділяють підходи, що базуються на визначенні перфузії крові у тканинах. Вони ґрунтуються на відомій закономірності: у ділянках некрозу кровоплин знижений або відсутній, тоді як у життєздатних тканинах він збережений [19, 23, 32, 56, 57, 60, 73, 84–87, 98, 102, 113, 135, 142]. Іншу групу становлять методи спектрофотометрії, які аналізують здатність шкіри відбивати світло на різних довжинах хвиль [62, 94, 145], а також ультразвукові [58] та томографічні [42] технології. Незважаючи на високу точність, усі ці методи об'єднують необхідність використання складного апаратного забезпечення, що обмежує їх застосування у повсякденній клінічній практиці.

З огляду на ці обмеження, найбільш доцільним методом для оцінки глибини опікових ран є термографія, яка поєднує високу інформативність із простотою виконання. Її принцип ґрунтується на аналізі температурної різниці між некротизованими та життєздатними тканинами: ділянки з порушеним кровопостачанням мають нижчу температуру, тоді як добре перфузовані — вищу. Інфрачервоне випромінювання, яке реєструється безконтактно, відображає стан мікроциркуляції та клітинного метаболізму у зоні ураження.

Перевагою термографії є швидкість, неінвазивність і можливість оцінки великої площі опіку в реальному часі. Метод дозволяє отримати теплове зображення без потреби у спеціальному зондуванні або контакті зі шкірою, що робить його особливо цінним для використання у клінічних умовах, зокрема при первинному огляді пацієнтів із опіками [32, 102, 142].

Додатково було проведено дослідження з використанням термографічного методу оцінки глибини опікових уражень із застосуванням портативного пристрою FLIR One. Цей метод дозволив кількісно оцінити різницю температур між здоровою шкірою та ураженими ділянками, що корелює з глибиною опіку. Температура здорової шкіри становила 34,7°C (34,4–35,1°C), поверхневого опіку — 35,8°C (35,5–36,2°C), глибокого опіку — 32,4°C (32,0–32,8°C). Різниця температур між здоровою шкірою та поверхневим опіком склала 1,1°C (0,7–1,5°C), між здоровою шкірою та глибоким опіком — 2,3°C (2,2–2,4°C), а між поверхневим і глибоким опіками — 3,4°C (3,0–3,8°C).

Ці результати підтверджують високу діагностичну точність термографії як методу для ранньої об'єктивної оцінки глибини опіку. Використання FLIR One продемонструвало свою ефективність і технічну зручність для клінічного застосування, зокрема в умовах невідкладної допомоги та комбустіологічних відділень. Отримані температурні різниці є статистично достовірними і можуть бути використані для формування діагностичних критеріїв визначення ступеня термічного ураження.

Таким чином, комбінація цифрової планіметричної вульнерометрії та термографії створює основу для формування нової стратегії об'єктивної оцінки стану ран опікового генезу. Розроблена програма «Аналізатор ран» забезпечує точне кількісне визначення площі ураження, тоді як термографічна оцінка глибини дає змогу визначити ступінь ушкодження тканин на ранніх етапах. Об'єднання цих двох підходів дозволяє значно підвищити точність клінічної діагностики, оптимізувати вибір лікувальної тактики та покращити результати лікування пацієнтів з опіковими травмами.

Запропонована методика має значний потенціал для широкого впровадження у практичну охорону здоров'я, особливо в умовах військової медицини, де швидкість і точність діагностики визначають успішність лікування. Отже, результати дослідження доводять ефективність і практичну цінність використання комп'ютерної вульнерометрії та термографії у клінічній

практиці як інструментів для підвищення якості діагностики, моніторингу та прогнозування процесів загоєння ран опікового походження.

На наступному етапі дослідження проведено об'єктивізацію клінічних ознак глибини опікових ран шляхом їх зіставлення з термографічними даними. Для оцінки прогностичної цінності окремих клінічних маркерів у диференціації поверхневих та глибоких опіків із формуванням некрозу здійснено ROC-аналіз із розрахунком площі під кривою (AUC). Еталонним критерієм виступало клініко-хірургічне підтвердження результатів лікування: самостійна епітелізація вказувала на поверхневий характер ушкодження, тоді як формування некрозу та потреба у хірургічному втручанні — на глибоке ураження.

Встановлено, що температурні параметри мають найвищу діагностичну інформативність у визначенні глибини опікових ран. Як різниця між температурою здорової шкіри та ураженої ділянки, так і абсолютні показники мінімальної та максимальної температури продемонстрували відмінну дискримінаційну здатність (AUC = 0,94–0,99). Отримані порогові значення дозволяють достовірно відмежувати поверхневі опіки від глибоких ран із високим ризиком некрозу. Серед клінічних ознак найбільшу прогностичну значущість мав капілярний рефіл (AUC = 0,81, cut-off = 2,5 с), тоді як колір рани (AUC = 0,70) та характер пухирів (AUC = 0,63) виявилися менш чутливими, проте залишаються корисними додатковими критеріями. Таким чином, поєднання клінічних і термографічних маркерів забезпечує високу точність диференціації та зменшує суб'єктивність оцінки лікаря.

На основі отриманих результатів розроблено комплексну модель оцінки глибини опікових уражень, що поєднує об'єктивні клінічні показники, цифрову планіметрію та термографію. Метою створення моделі було підвищення точності діагностики шляхом використання алгоритмів машинного навчання, здатних автоматизувати процес класифікації. Для тренування та тестування моделі використано 31 клінічно підтверджений випадок із чітким визначенням глибини ураження. У процесі навчання алгоритми здійснювали автоматичний

відбір найбільш значущих ознак і побудову дерев рішень, що дозволили визначати ймовірність належності опіку до певного класу.

Порівняльний аналіз ефективності моделей показав, що алгоритм Random Forest продемонстрував найкращі результати за стабільністю, точністю та інтерпретованістю. Під час крос-валідації він характеризувався мінімальною варіабельністю показників та забезпечував можливість кількісної оцінки важливості ознак (Feature Importance). Найбільший внесок у точність диференціації внесли мінімальна й максимальна температура у рані та час капілярного рефілу, що повністю узгоджується з клінічними закономірностями.

Інтеграція розробленої моделі у програмну систему «Аналізатор рани», яка вже використовується для цифрової планіметрії, дозволила створити модуль для автоматизованого аналізу термографічних даних. Після завантаження термозображення програма автоматично визначає ділянки з мінімальною та максимальною температурою, розраховує їхні параметри та, використовуючи алгоритм Random Forest, прогнозує ступінь опіку з візуалізацією меж поверхневих і глибоких зон. Такий підхід забезпечує оперативність, об'єктивність і точність оцінки, що особливо важливо в умовах обмеженого часу, зокрема у військовій практиці.

Розроблена модель продемонструвала високу ефективність класифікації: Accuracy = 0,9677 ($\approx 96,8\%$), Precision для поверхневих опіків — 0,94, для глибоких — 1,00; Recall відповідно — 1,00 і 0,94; F1-score для обох класів — 0,97. Така висока точність свідчить про коректність сформованого набору ознак, що адекватно відображають патофізіологічні зміни у зоні опіку.

Таким чином, розроблена система дозволяє не лише автоматично визначати глибину опікових уражень, а й кількісно оцінювати значущість клінічних параметрів. Це створює основу для впровадження технології у клінічну практику як інструмента підтримки прийняття рішень, який стандартизує оцінку опікових ран, мінімізує вплив людського фактора та покращує відбір пацієнтів для хірургічного лікування.

Запропонований підхід є новаторським, оскільки вперше в Україні створено та валідувано модель оцінки глибини опікових уражень, що поєднує клінічні, планіметричні та термографічні дані з використанням алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту. Раніше вже існували спроби застосування штучного інтелекту та машинного навчання [48, 75, 106, 136, 138] для об'єктивної оцінки опіків у світі, і ми продовжили цей напрям, розробивши власну систему, адаптовану до локальних клінічних умов. До цього часу визначення глибини опіків базувалося переважно на суб'єктивній оцінці лікаря, що часто призводило до помилок у виборі тактики лікування. Розроблена система забезпечує стандартизований, об'єктивний і кількісний підхід до діагностики, який може бути використаний навіть лікарями з невеликим клінічним досвідом. Це має особливе значення для медицини катастроф та військової хірургії, де швидкість і точність діагностики визначають результат лікування. Таким чином, створена модель відкриває нові можливості для впровадження цифрових технологій, машинного навчання та штучного інтелекту у практику опікової медицини, сприяючи підвищенню якості та ефективності надання допомоги пацієнтам.

Лікування опіків має глибоку історію, що сягає ще доісторичних часів, коли людина лише почала користуватися вогнем. Археологічні знахідки та наскельні зображення свідчать про те, що вже неандертальці намагалися лікувати опікові рани за допомогою природних речовин, зокрема рослинних екстрактів [20]. Згодом у різних культурах формувалися власні підходи до лікування термічних уражень, що відображало рівень медичних знань і доступних засобів того часу. Проте лише із розвитком хірургії, анатомії та мікробіології лікування опіків почало базуватися на доказових принципах і стандартизованих протоколах.

Сучасна комбустіологія розглядає лікування опікових ран як комплексний процес, який охоплює як загальні, так і місцеві заходи. Загальні включають стабілізацію гемодинаміки, боротьбу з опіковим шоком, відновлення водно-електролітного балансу, контроль температурного режиму

тіла, адекватне знеболення, профілактику інфекційних ускладнень і корекцію білкового та енергетичного обміну. Місцеве лікування спрямоване на очищення, закриття та регенерацію пошкоджених тканин і є ключовим елементом відновлення шкірного покриву [41, 104]. Його ефективність залежить від своєчасного визначення глибини ураження, адекватного вибору хірургічної тактики та оптимізації процесу регенерації.

Історично до середини XX століття лікування опіків здебільшого обмежувалося консервативними методами — висиханням ран, накладанням мазевих пов'язок або природним формуванням струпа. Лише у 1970-х роках раннє висічення некротизованих тканин із подальшою аутодерматопластикою почало розглядатися як стандарт лікування важких опікових травм [22]. Раннє хірургічне втручання сприяє зменшенню ризику інфекційних ускладнень, підвищенню виживаності пацієнтів, скороченню терміну перебування у стаціонарі та зниженню імовірності формування гіпертрофічних рубців [129].

Залежно від глибини ураження застосовують дві основні техніки хірургічного лікування — тангенціальне висічення та фасціальне висічення. Тангенціальна техніка передбачає пошарове видалення обуглених і некротичних тканин до рівня життєздатної, добре васкуляризованої дерми. Цей метод дозволяє максимально зберегти здорові тканини, однак потребує високої точності в оцінці глибини ураження, адже надмірне висічення призводить до необґрунтованої втрати шкіри, а недостатнє — до збереження некротизованих ділянок і ризику інфікування. Фасціальне висічення передбачає видалення уражень до рівня фасції з повним видаленням підшкірного жиру, судин і нервів, що забезпечує ефективний гемостаз, проте супроводжується значною травматизацією та втратою тканин.

У межах проведеного дослідження обґрунтовано доцільність використання тангенціального висічення, як більш щадного методу, що забезпечує оптимальне співвідношення між повнотою видалення некрозу та збереженням здорових структур. Аутотрансплантація після такого втручання є найкращим варіантом остаточного закриття дефекту, оскільки забезпечує

високу біологічну сумісність, швидке приживлення трансплантата, мінімальний ризик відторгнення та задовільний естетичний результат. До таких же висновків приводять сучасні дослідження [108]: рання ексцизія та аутотрансплантація прискорюють загоєння, скорочують тривалість госпіталізації, зменшують ускладнення (гіпертрофічні рубці, диспігментацію, функціональні порушення) та підвищують задоволеність пацієнтів лікуванням порівняно з первинним неоперативним веденням навіть за використання сучасних інтерактивних антимікробних пов'язок.

Розроблене нами удосконалення діагностично-хірургічного процесу полягало в інтеграції цифрової планіметрії та термографії для об'єктивної оцінки площі та глибини опікового ураження. Застосування програми «Аналізатор рани» дозволило точно визначати межі некротичних ділянок, що дало змогу виконувати негайну некректомію та одночасну аутодерматопластику із заздалегідь розрахованим розміром трансплантата. Використання термографії за допомогою пристрою FLIR One сприяло покращенню точності оцінки життєздатності тканин, що мінімізувало ризик залишкового некрозу та надлишкової резекції.

Клінічні результати підтвердили ефективність удосконаленого методу. У дослідженні взяли участь 52 пацієнти, поділені на дві порівнянні за віком, статтю, площею та локалізацією опіків групи. Пацієнти дослідної групи, яким виконано тангенціальне висічення з одночасною аутодерматопластикою за допомогою розробленої технології, мали істотно кращі показники лікування.

Тривалість госпіталізації скоротилась майже вдвічі — $12,2 \pm 4,4$ доби у порівнянні з $20,8 \pm 4,1$ доби в контрольній групі ($p < 0,05$). Кількість оперативних втручань у дослідній групі була значно меншою ($1,6 \pm 0,9$ проти $3,0 \pm 1,4$), як і кількість загальних знеболювань ($1,8 \pm 1,2$ проти $4,2 \pm 1,6$; $p < 0,05$). Це свідчить про зменшення травматичності лікування та зниження необхідності у проведенні наркозу під час перев'язок.

Важливим показником ефективності стала також кількість перев'язок — у дослідній групі на одну рану припадало лише $4,0 \pm 1,3$, тоді як у контрольній

цей показник сягав $11,5 \pm 2,3$ ($p < 0,05$). Така різниця безпосередньо впливає на комфорт пацієнтів, швидкість загоєння та ризик інфікування.

Тривалість епітелізації ран у дослідній групі становила $15,5 \pm 3,9$ доби, тоді як у контрольній — $28,3 \pm 5,4$ доби ($p < 0,05$). Частота інфекційних ускладнень знизилася майже удвічі — $16,4\%$ проти $31,0\%$, а частота лізису трансплантатів — $25,4\%$ проти $53,4\%$ ($p < 0,05$).

Через 3–6 місяців після повного загоєння лише $10,8\%$ ран у дослідній групі потребували вторинного реконструктивного втручання, що було вірогідно нижчим порівняно з $37,5\%$ у контрольній. Отримані дані свідчать про стійкий позитивний ефект методики та зниження потреби в подальших оперативних втручаннях.

Таким чином, поєднане використання термографії та цифрової планіметрії під час планування та виконання тангенціального висічення забезпечує низку переваг:

- мінімізацію обсягу видалення здорових тканин;
- покращення функціонального та косметичного результату;
- зменшення ризику післяопераційних ускладнень;
- скорочення тривалості перебування у стаціонарі;
- зниження потреби у повторних операціях;
- економію медичних ресурсів і підвищення якості життя пацієнтів.

Представлені у роботі клінічні випадки підтверджують практичну ефективність запропонованого підходу та демонструють можливість його використання у повсякденній хірургічній практиці.

Попри значні досягнення у галузі опікової хірургії, досі відсутні чіткі алгоритми вибору між консервативною та хірургічною тактикою при прикордонних ступенях ураження, що зумовлює суб'єктивність рішень і залежність результатів від досвіду хірурга. Розроблена система інтегрованої діагностики із використанням цифрової планіметрії, термографії та алгоритмів прогнозування забезпечує об'єктивізацію цього процесу, дозволяючи підвищити точність і відтворюваність клінічних рішень.

Таким чином, результати проведеного дослідження становлять теоретичне узагальнення та практичне вирішення актуального наукового завдання — підвищення ефективності діагностики та лікування пацієнтів з опіковими ранами шляхом поєднання цифрових технологій із вдосконаленою хірургічною тактикою. Отримані результати мають високу клінічну значущість, формують основу для подальшого удосконалення стандартів комбустіологічної допомоги та сприяють покращенню результатів лікування й реабілітації пацієнтів з опіковими травмами.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено теоретичне узагальнення та запропоновано нове вирішення актуального наукового завдання — підвищення ефективності діагностики та лікування хворих з опіковими ранами шляхом інтеграції цифрової планіметрії та безконтактної термографії, розроблення прогнозуючої моделі для обґрунтованого вибору хірургічної тактики та удосконалення методики хірургічного лікування.

1. Розроблено комп'ютерну програму «Аналізатор рани», що забезпечує швидке, точне та безконтактне вимірювання площі рани з можливістю збереження й обробки даних; може широко застосовуватись у практичній хірургії як об'єктивний інструмент контролю загоєння, а його точність, підтверджена порівнянням із методом R. W. Sessions, становить: ширина — $98,96 \% \pm 1,28 \%$, довжина — $99,43 \% \pm 0,79 \%$, радіус — $99,61 \% \pm 0,65 \%$, периметр — $98,96 \% \pm 1,19 \%$, площа — $99,52 \% \pm 0,67 \%$.
2. Підтверджено, що безконтактна термографія є надійною, неінвазивною та економічно ефективною методикою диференціації поверхневого та глибокого опіків, згідно якої температура здорової шкіри становить $34,7^{\circ}\text{C}$ ($34,4\text{--}35,1^{\circ}\text{C}$), що вище за глибокий опік ($32,4^{\circ}\text{C}$; $32,0\text{--}32,8^{\circ}\text{C}$) і нижче за поверхневий ($35,8^{\circ}\text{C}$; $35,5\text{--}36,2^{\circ}\text{C}$), температурні різниці: здоровий – поверхневий опік $1,1^{\circ}\text{C}$ ($0,7\text{--}1,5^{\circ}\text{C}$), здоровий – глибокий опік $2,3^{\circ}\text{C}$ ($2,2\text{--}2,4^{\circ}\text{C}$), поверхневий – глибокий опік $3,4^{\circ}\text{C}$ ($3,0\text{--}3,8^{\circ}\text{C}$).
3. Доведено, що комплексна оцінка глибини опікових ран із використанням клінічних та інструментальних маркерів володіє високою прогностичною значущістю для об'єктивної диференціації поверхневих та глибоких уражень: капілярний рефіл (AUC = 0,81), колір рани (AUC = 0,70), характер пухирів (AUC = 0,63) та температурні показники (AUC = 0,94–0,99), що підвищує точність діагностики та забезпечує надійну основу для вибору оптимальної хірургічної тактики.
4. Створено модель штучного інтелекту, що інтегрує клінічні, планіметричні та термографічні дані і забезпечує високу точність диференціації глибини опікових уражень (Accuracy $\approx 96,8\%$; F1-score =

0,97), де найінформативнішими ознаками виступали термографічні параметри.

5. Запропоновано та впроваджено методику тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластикою, доповнену термографічним контролем і цифровими технологіями оцінки глибини рани, яка дозволила оптимізувати обсяг висічення, зменшити кількість оперативних втручань (з $3,0 \pm 1,4$ до $1,6 \pm 0,9$ втручань), частоту інфекційних ускладнень (з 31,0 % до 16,4 %) та інших ускладнень (з 53,4 % до 25,4 %), скоротити термін загоєння ран (з $28,3 \pm 5,4$ до $15,5 \pm 3,9$ доби) і забезпечити кращі функціональні та косметичні післяопераційні результати.

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Для хірургічного ведення пацієнтів з опіковими ранами необхідно здійснювати систематичний контроль розмірів ран, динамічне спостереження за процесом загоєння та документування даних у базах даних; рекомендується використовувати комп'ютерну програму «Аналізатор рани», яка забезпечує виконання цих вимог.
2. Об'єктивне визначення глибини опікової рани є ключовим фактором для вибору оптимальної хірургічної тактики; для цього доцільно застосовувати комплексну оцінку, що включає як інструментальні, так і клінічні маркери.
3. До інструментальних методів слід віднести безконтактну термографію, яка дозволяє достовірно диференціювати поверхневі та глибокі опіки на основі температурних характеристик тканин; водночас додатково доцільно використовувати клінічні маркери: капілярний рефіл, колір рани, характер пухирів, що підвищує точність стратифікації та мінімізує суб'єктивність оцінки.
4. Для підвищення об'єктивності та швидкості діагностики рекомендовано інтегрувати у програму «Аналізатор рани» модель прогнозування глибини опіку на основі штучного інтелекту і алгоритмів машинного навчання та імплементувати її в практику, що забезпечить високоточну диференціацію глибини опікових уражень та сприятиме обґрунтованому вибору хірургічної тактики.
5. Доцільно впроваджувати методику тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластикою, доповнену термографічним контролем і цифровими технологіями оцінки глибини рани, що дозволяє покращити коротко- та довготермінові результати лікування.
6. Рекомендовано включати результати цифрової оцінки та термографії в електронну медичну документацію пацієнтів, що забезпечить єдину систему моніторингу та аналізу динаміки загоєння ран, підвищить якість наукових досліджень і дозволить уніфікувати підходи до хірургічного лікування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Біляєва ОО, Яцун ВВ, Біляєва ВВ, Невжгляд ВА, assignee. Спосіб контролю ефективності лікування трофічних виразок. Patent number: UA64171. Priority number: UA20030031853 20030303. 2004 Feb 16.
2. Бойко ВВ, Кравцов ОВ, Лихман ВМ, Кравцова ОО. Місцеве лікування опікових ран із застосуванням пробіотиків. Харківська хірургічна школа. 2022;4-5:115–116.
3. Герич ІД, Стояновський ІВ, Савчин ВС. Спосіб цифрової планіметричної вольнерометрії. Хірургія Україна. 2008;4:57–58.
4. Герич ІД. Об'ємна вольнерометрія як новий метод вивчення динаміки загоєння ран. Матеріали 5-ї Респ. учбово-метод. та наук. конф. завідуючих кафедрами загальної хірургії медвузів України. Тернопіль; 1996. С. 66–67.
5. Гюльмамедов ФИ, Жадинский АН, Жадинский НВ, Белозерцев АМ, Заблоцкий ВВ, Полунин ГЕ. Разработка способов измерения площади раны, заживающей вторичным натяжением. Актуальні проблеми сучасної медицини. Вісник української медичної стоматологічної академії. 2008;8(1-2):216–218.
6. Закон України “Про хмарні послуги”. Відомості Верховної Ради України. 2023;15:52. Зміни: №3343-IX (23.08.2023; 2023;92:357), №3549-IX (16.01.2024; 2024;18:76), №3783-IX (05.06.2024).
7. Лукавецький ОВ, Стояновський ІВ, Фармага ТІ. Комп'ютерна програма для вольнерометрії. Харківська хірургічна школа. 2017;1(82):145–147.
8. Тертишний С, Хоменко І, Гуменюк К, Король С, Цема Є, Дубенко Д та ін. Класифікацій дефектів м'яких тканин та обґрунтування оптимального об'єму та методу хірургічної реконструкції. Ukrainian Scientific Medical Youth Journal. 2021;1(121):112–113.
9. Фармага Т, Лукавецький О, Чемерис О. Методи оцінювання розмірів та

- глибини опікової рани. *Proceedings of the Shevchenko Scientific Society. Medical Sciences [Internet]*. 2024;76(2):27.
10. Фармага ТІ, Лукавецький ОВ, Чемерис ОМ, Стояновський ІВ. Використання безконтактного термографа FLIR One для оцінювання глибини опікової рани. *Хірургія дитячого віку (Україна)*. 2024;2(83):13–18. <https://doi.org/10.15574/PS.2024.83.13>.
 11. Фармага ТІ, Лукавецький ОВ, Чемерис ОМ. Використання власної комп'ютерної програми для вольнерометрії та термографії у лікуванні опікових ран: опис власного клінічного випадку. *Клінічна анатомія та оперативна хірургія*. 2025;24(2):92–97. <https://doi.org/10.24061/1727-0847.24.2.2025.30>.
 12. Фармага ТІ, Лукавецький ОВ, Чемерис ОМ. Оцінка глибини опікових уражень за допомогою безконтактної термографії FLIR ONE. XX Конгрес Світової Федерації Українських Лікарських Товариств (СФУЛТ), 24–26 жовтня 2024 р. *Українські медичні вісті*. 2024;16(3–4 suppl):46–47.
 13. Фармага ТІ, Лукавецький ОВ, Чемерис ОМ. Переваги тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластикомою для лікування опікових ран. *Хірургія дитячого віку (Україна)*. 2023;2(79):23–27. <https://doi.org/10.15574/PS.2023.79.23>.
 14. Фармага ТІ, Лукавецький ОВ, Чемерис ОМ. Цифрова комп'ютерна планіметрія ранових дефектів різного генезу. *Шпитальна хірургія. Журнал імені Л. Я. Ковальчука*. 2022;3:42–45. <https://doi.org/10.11603/2414-4533.2022.3.13392>.
 15. Фармага ТІ. Аналіз взаємозв'язків клінічними характеристиками та даних термографії з глибиною опікових ран. *Матеріали 9-го симпозиуму SMART LION 2025: Медична освіта та наукові дослідження під час війни в Україні; 2025 вересень; Львів*.
 16. Abbass M, Azizi A, van den Heuvel AF, Zolfaghari M. Development of a Robust Photogrammetric Metrology System for Monitoring the Healing of Bedsores. *The Photogrammetric Record*. 2005;111(20):241.

17. Ang GC. History of skin transplantation. *Clin Dermatol*. 2005;23:320-324. doi: 10.1016/j.clindermatol.2004.07.013.
18. Anyanwu JA, Cindass R. Burn Debridement, Grafting, and Reconstruction. 2023 May 29. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan.
19. Atilas L, Mileski W, Purdue G, Hunt J, Baxter C. Laser Doppler flowmetry in burn wounds. *J Burn Care Rehabil*. 1995;16(4):388-93. doi: 10.1097/00004630-199507000-00003.
20. Barrow RE, Herndon DN. *Total Burn Care*. Elsevier BV; Amsterdam, The Netherlands: 2007. History of treatments of burns; pp. 1-8.
21. Brekke RL, Almeland SK, Hufthammer KO, Hansson E. Agreement of clinical assessment of burn size and burn depth between referring hospitals and burn centres: A systematic review. *Burns*. 2023;49(3):493-515. doi: 10.1016/j.burns.2022.05.007.
22. Burke JF, Bondoc CC, Quinby WC. Primary burn excision and immediate grafting: A method shortening illness. *J Trauma*. 1974;14:389-395. doi: 10.1097/00005373-197405000-00005.
23. Burke-Smith A, Collier J, Jones I. A comparison of non-invasive imaging modalities: Infrared thermography, spectrophotometric intracutaneous analysis and laser Doppler imaging for the assessment of adult burns. *Burns*. 2015;41(8):1695-1707. doi: 10.1016/j.burns.2015.06.023.
24. Cannon TM, Uribe-Patarroyo N, Villiger M, Bouma BE. Measuring collagen injury depth for burn severity determination using polarization sensitive optical coherence tomography. *Sci Rep*. 2022;12(1):10479. doi: 10.1038/s41598-022-14326-3.
25. Cees L, Jody C, Deannine H, De Haan R. Pressure Ulcer surface area measurement using instant full-scale photography and transparency tracings. *Adv Skin Wound Care*. 2002;15(1):17-23.
26. Chang CW, Ho CY, Lai F, Christian M, Huang SC, Chang DH, Chen YS. Application of multiple deep learning models for automatic burn wound

- assessment. *Burns*. 2023;49(5):1039-1051. doi: 10.1016/j.burns.2022.07.006.
27. Chang CW, Lai F, Christian M, Chen YC, Hsu C, Chen YS et al. Deep Learning-Assisted Burn Wound Diagnosis: Diagnostic Model Development Study. *JMIR Med Inform*. 2021;9(12):e22798. doi: 10.2196/22798.
 28. Chong KK, Abdul-Rani AM, M. Fadzil HA et al. Analytical studies on volume determination of leg ulcer using laser triangulation and structured light data acquisition techniques. 18th Iranian Conf. Biomed. Eng. Teheran, Iran: IEEE, 2011.
 29. Chrzanowska-Wąsik M, Chemperek E, Sokołowski D, Goniewicz M, Bednarz K, Rzońca P. Analiza oparzeń osób dorosłych hospitalizowanych we Wschodnim Centrum Leczenia Oparzeń i Chirurgii Rekonstrukcyjnej w Łęcznej. *J Educ*. 2017;7:2391-8306. doi: 10.5281/zenodo.495655.
 30. Claes KEY, Hoeksema H, Vyncke T, Verbelen J, De Coninck P, De Decker I et al. Evidence Based Burn Depth Assessment Using Laser-Based Technologies: Where Do We Stand? *J Burn Care Res*. 2021;42(3):513-525. doi: 10.1093/jbcr/iraa195.
 31. Criscitelli T. The Future of Wound Care. *AORN J*. 2018;107(4):427-429.
 32. Dang J, Lin M, Tan C, Pham CH, Huang S, Hulsebos IF et al. Use of Infrared Thermography for Assessment of Burn Depth and Healing Potential: A Systematic Review. *J Burn Care Res*. 2021:irab108. doi: 10.1093/jbcr/irab108.
 33. Daugherty THF, Ross A, Neumeister MW. Surgical Excision of Burn Wounds: Best Practices Using Evidence-Based Medicine. *Clin Plast Surg*. 2017;44:619-625. doi: 10.1016/j.cps.2017.02.018.
 34. Davis BN, Xu H, Gottlieb LJ, Vrouwe SQ. Acute Burn Care. *Plast Reconstr Surg*. 2024;153(4):804e-823e. doi: 10.1097/PRS.00000000000011182.
 35. Esselman PC. Burn Rehabilitation: An Overview. *Arch Phys Med. Rehabil*. 2007;88:3-6.
 36. Eteraf-Oskouei T., Najafi M. Traditional and modern uses of natural honey in human diseases: A review. *J. Basic Med Sci*. 2013;16:731-742.
 37. Farmaha I, Farmaha T, Banaś M, Savchyn V, Lukashchuk B. Wound image

- segmentation using clustering based algorithms. *New Trends in Production Engineering*. Warszawa: Sciendo; 2019;2(1):570-578.
38. Febriyenti F, Lucida H, Almahdy A, Alfikriyah I, Hanif M. Wound-healing effect of honey gel and film. *J Pharm Bioallied Sci*. 2019;11:176-180. doi: 10.4103/JPBS.JPBS_184_18.
 39. Foltynski P, Ladyzynski P. Digital Planimetry With a New Adaptive Calibration Procedure Results in Accurate and Precise Wound Area Measurement at Curved Surfaces. *J Diabetes Sci Technol*. 2022;16(1):128-136.
 40. Foltynski P. Ways to increase precision and accuracy of wound area measurement using smart devices: Advanced app Planimator. *PLoS One*. 2018;13(3):e0192485.
 41. Gacto-Sanchez P. Surgical treatment and management of the severely burn patient: Review and update. *Med Intensiva*. 2017;41:356-364. doi: 10.1016/j.medin.2017.02.008.
 42. Ganapathy P, Tamminedi T, Qin Y, Nanney L, Cardwell N, Pollins A et al. Dual-imaging system for burn depth diagnosis. *Burns*. 2014;40(1):67-81. doi: 10.1016/j.burns.2013.05.004.
 43. Glaser J, Ziegler B, Hirche C, Tapking C, Haug V, Bliesener B et al. The status quo of early burn wound excision: Insights from the German burn registry. *Burns*. 2021;47(6):1259-1264.
 44. Gold MH, Nestor MS, Berman B, Goldberg D. Assessing keloid recurrence following surgical excision and radiation. *Burns Trauma*. 2020;8:tkaa031. doi: 10.1093/burnst/tkaa031.
 45. Goodwin NS, Spinks A, Wasiak J. The efficacy of hydrogel dressings as a first aid measure for burn wound management in the pre-hospital setting: A systematic review of the literature. *Int Wound J*. 2015;13:519-525. doi: 10.1111/iwj.12469.
 46. Greenhalgh DG. Management of Burns. *N Engl J Med*. 2019;380(24):2349-2359. doi: 10.1056/NEJMra1807442.
 47. Griffin B, Bairagi A, Jones L, Dettrick Z, Holbert M, Kimble R. Early non-

- excisional debridement of paediatric burns under general anaesthesia reduces time to re-epithelialisation and risk of skin graft. *Sci Rep.* 2021;11:23753. doi: 10.1038/s41598-021-03141-x.
48. Gurnani B, Kaur K, Lalgudi VG, Kundu G, Mimouni M, Liu H et al. Role of artificial intelligence, machine learning and deep learning models in corneal disorders - A narrative review. *J Fr Ophtalmol.* 2024;47(7):104242. doi: 10.1016/j.jfo.2024.104242.
49. Haalboom M. Chronic wounds: Innovations in diagnostics and therapeutics. *Curr Med Chem.* 2018;25(41):5772-5781.
50. Hakimi N, Cheng R, Leng L, Sotoudehfar M, Ba PQ, Bakhtyar Nb et al. Handheld skin printer: In situ formation of planar biomaterials and tissues. *Lab Chip.* 2018;18:1440-1451. doi: 10.1039/C7LC01236E.
51. Hejda B, Hejdova J. Metoda stanoven'i velikosti plochy pop'alen'e ku ze [a method for estimating the size of the area of burnt skin]. *Rozhl Chir.* 1963;42:226-229.
52. Huang J, Frauenlob M, Shibata Y, Wang L, Nakajima T, Nonoyama T et al. Chitin-based double network hydrogel as potential superficial soft tissue repairing material. *Biomacromolecules.* 2020;21:4220-4230. doi: 10.1021/acs.biomac.0c01003.
53. Huang S, Dang J, Sheckter CC, Yenikomshian HA, Gillenwater J. A systematic review of machine learning and automation in burn wound evaluation: A promising but developing frontier. *Burns.* 2021;47(8):1691-1704. doi: 10.1016/j.burns.2021.07.007.
54. Ibbett DA, Dugdale RE, Hart GC, Vowden KR, Vowden P. Measuring leg ulcers using a laser displacement sensor. *Physiol Meas.* 1994;15(3):325-332.
55. Ichimaru J, Ito T, Shigeta T, assignee. Wound surface area measuring sheet. Patent № JP7163526. Priority № JP19930312991 19931214. 1995 Jun 27.
56. Ida T, Iwazaki H, Kawaguchi Y, Kawauchi S, Ohkura T, Iwaya K, Tsuda H et al. Burn depth assessments by photoacoustic imaging and laser Doppler imaging. *Wound Repair Regen.* 2016;24(2):349-55. doi: 10.1111/wrr.12374.

57. Ida T, Kawaguchi Y, Kawauchi S, Iwaya K, Tsuda H, Saitoh D et al. Real-time photoacoustic imaging system for burn diagnosis. *J Biomed Opt.* 2014;19(8):086013. doi: 10.1117/1.JBO.19.8.086013.
58. Iraniha S, Cinat ME, VanderKam VM, Boyko A, Lee D, Jones J et al. Determination of burn depth with noncontact ultrasonography. *J Burn Care Rehabil.* 2000;21(4):333-8. doi: 10.1067/mbc.2000.106391.
59. Jaspers MEH, Carrière ME, Meij-de Vries A, Klaessens JHGM, van Zuijlen PPM. The FLIR ONE thermal imager for the assessment of burn wounds: Reliability and validity study. *Burns.* 2017;43(7):1516-1523. doi: 10.1016/j.burns.2017.04.006.
60. Jaspers MEH, van Haasterecht L, van Zuijlen PPM, Morkink LB. A systematic review on the quality of measurement techniques for the assessment of burn wound depth or healing potential. *Burns.* 2019;45(2):261-281. doi: 10.1016/j.burns.2018.05.015.
61. Jaworski N, Farmaha I, Farmaha T, Marikutsa U, Savchyn V. Implementation features of wounds visual comparison subsystem. In: XIV-th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH) [abstracts]. Lviv, 2018 Apr 18-22. p. 114-118. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2018.8365714>.
62. Kaiser M, Yafi A, Cinat M, Choi B, Durkin AJ. Noninvasive assessment of burn wound severity using optical technology: a review of current and future modalities. *Burns.* 2011;37(3):377-86. doi: 10.1016/j.burns.2010.11.012.
63. Khimich S, Chemerys O. Role of the Family Physician in the Treatment of Patients with Polytrauma on the Obesity Background on an Ambulatory. *Wiad Lek.* 2019;72(4):631-634.
64. Klasen HJ. A review on the nonoperative removal of necrotic tissue from burn wounds. *Burns.* 2000;26:207-222. doi: 10.1016/S0305-4179(99)00117-5.
65. Korzeniowski T, Strużyna J, Chrapusta AM, Krajewski A, Kucharzewski M, Piorun K et al. A questionnaire-based study to obtain a consensus from 5 Polish burns centers on eschar removal by bromelain-based enzymatic

- debridement (Nexobrid®) in burns following the 2020 updated European consensus guidelines. *Med Sci Monit.* 2022;28:e935632. doi: 10.12659/MSM.935632.
66. Krouskop TA, Baker R, Wilson MS. A noncontact wound measurement system. *J Rehabil Res Dev.* 2002;39(3):337-346.
 67. Kundin JJ. A new way to size up a wound. *Am J Nurs.* 1989;89(2):206-207.
 68. Lara HH, Garza-Treviño EN, Ixtapan-Turrent L, Singh DK. Silver nanoparticles are broad-spectrum bactericidal and virucidal compounds. *J Nanobiotechnology.* 2011;9:30.
 69. Latańska I, Kolesińska B, Draczyński Z, Sujka W. The use of chitin and chitosan in manufacturing dressing materials. *Prog Chem Appl Chitin Its Deriv.* 2020;25:16-36. doi: 10.15259/PCACD.25.002.
 70. Latenser BA. Critical care of the burn patient: The first 48 h. *Crit Care Med.* 2009;37:2819-2826. doi: 10.1097/00003246-200910000-00021.
 71. Lee S, Rahul, Lukan J, Boyko T, Zelenova K, Makled B et al. A deep learning model for burn depth classification using ultrasound imaging. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2022;125:104930. doi: 10.1016/j.jmbbm.2021.104930.
 72. Legemate CM, Goei H, Gostelie OFE, Nijhuis THJ, Van Baar ME, Van der Vlies CH. Application of hydrosurgery for burn wound debridement: an 8-year cohort analysis. *Burns.* 2019;45(1):88-96.
 73. Li H, Bu Q, Shi X, Xu X, Li J. Non-invasive medical imaging technology for the diagnosis of burn depth. *Int Wound J.* 2024;21(1):e14681. doi: 10.1111/iwj.14681.
 74. Li S, Renick P, Senkowsky J, Nair A, Tang L. Diagnostics for Wound Infections. *Adv Wound Care (New Rochelle).* 2021;10(6):317-327.
 75. Liu H, Yue K, Cheng S, Li W, Fu Z. A Framework for Automatic Burn Image Segmentation and Burn Depth Diagnosis Using Deep Learning. *Comput Math Methods Med.* 2021;2021:5514224. doi: 10.1155/2021/5514224.
 76. Liu K, Chen Z, Zhou W, Xing D. Towards quantitative assessment of burn based on photoacoustic and optical coherence tomography. *J Biophotonics.*

- 2020;13(10):e202000126. doi: 10.1002/jbio.202000126.
77. Liu YJ, Wu P, An G, Fang Q, Zheng J, Wang YB. Research advances on the techniques for diagnosing burn wound depth. *Zhonghua Shao Shang Yu Chuang Mian Xiu Fu Za Zhi*. 2022;38(5):481-485. doi: 10.3760/cma.j.cn501120-20210518-00195.
 78. Loo YL, Goh BKL, Jeffery S. An Overview of the Use of Bromelain-Based Enzymatic Debridement (Nexobrid®) in Deep Partial and Full Thickness Burns: Appraising the Evidence. *J Burn Care Res*. 2018;39:932-938. doi: 10.1093/jbcr/iry009.
 79. Low AJ, Dyster-Aas J, Willebrand M, Ekselius L, Gerdin B. Psychiatric morbidity predicts perceived burn-specific health 1 year after a burn. *Gen. Hosp. Psychiatry*. 2012;34:146-152.
 80. Lucas Y, Niri R, Treuillet S, Douzi H, Castaneda B et al. Wound Size Imaging: Ready for Smart Assessment and Monitoring. *Adv Wound Care (New Rochelle)*. 2021;10(11):641-661.
 81. Luze H, Nischwitz SP, Smolle C, Zrim R, Kamolz LP. The Use of Acellular Fish Skin Grafts in Burn Wound Management-A Systematic Review. *Medicina (Kaunas)*. 2022;58(7):912. doi: 10.3390/medicina58070912.
 82. Markiewicz-Gospodarek A, Koziół M, Tobiasz M, Baj J, Radzikowska-Büchner E, Przekora A. Burn Wound Healing: Clinical Complications, Medical Care, Treatment, and Dressing Types: The Current State of Knowledge for Clinical Practice. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(3):1338. doi: 10.3390/ijerph19031338.
 83. Mayrovitz HN. Shape and area measurement considerations in the assessment of diabetic plantar ulcers. *Wounds*. 1997;9(1):21-28.
 84. McGill DJ, Sorensen K, MacKay IR, Taggart I, Watson SB. Assessment of burn depth: a prospective, blinded comparison of laser Doppler imaging and videomicroscopy. *Burns*. 2007;33(7):833-842.
 85. McUmbler H, Dabek RJ, Bojovic B, Driscoll DN. Burn Depth Analysis Using Indocyanine Green Fluorescence: A Review. *J Burn Care Res*. 2019;40(4):513-

516. doi: 10.1093/jbcr/irz054.
86. Mihara K, Nomiya T, Masuda K, Shindo H, Yasumi M, Sawada T et al. Dermoscopic insight into skin microcirculation - Burn depth assessment. *Burns*. 2015;41(8):1708-1716. doi: 10.1016/j.burns.2015.08.032.
 87. Mihara K, Shindo H, Mihara H, Ohtani M, Nagasaki K, Katoh N. Early depth assessment of local burns by videomicroscopy: a novel proposed classification. *Burns*. 2012;38(3):371-377. doi: 10.1016/j.burns.2011.08.020.
 88. Mirzaei B, Etemadian S, Goli HR, Bahonar S, Gohlami SA, Karami P et al. Construction and analysis of alginate-based honey hydrogel as an ointment to heal of rat burn wound related infections. *Int J Burn Trauma*. 2018;8:88-97.
 89. Munoz-Torres JR, Martínez-González SB, Lozano-Luján AD, Martínez-Vázquez MC, Velasco-Elizondo P, Garza-Veloz I et al. Biological properties and surgical applications of the human amniotic membrane. *Front Bioeng Biotechnol*. 2023;10:1067480. doi: 10.3389/fbioe.2022.1067480.
 90. Navare KJ, Eggeermont L, Rogers ZJ, Mohammed HS., Colombani T, Bencherif S. Antimicrobial hydrogels: Key considerations and engineering strategies for biomedical applications. *Racing Surf*. 2020:511-542. doi: 10.1007/978-3-030-34475-7_22.
 91. Nunez J, Mironov S, Wan B, Hazime A, Clark A, Akarichi C et al. Novel multi-spectral short-wave infrared imaging for assessment of human burn wound depth. *Wound Repair Regen*. 2024;32(6):979-991. doi: 10.1111/wrr.13221.
 92. Nunez Lopez O, Cambiaso-Daniel J, Branski LK, Norbury WB, Herndon DN. Predicting and managing sepsis in burn patients: current perspectives. *Ther Clin Risk Manag*. 2017;13:1107-1117. doi: 10.2147/TCRM.S119938.
 93. Ozhatil DK, Tay MW, Wolf SE, Branski LK. A Narrative Review of the History of Skin Grafting in Burn Care. *Medicina (Kaunas)*. 2021;57(4):380. doi: 10.3390/medicina57040380.
 94. Parvez MA, Yashiro K, Nagahama Y, Tsunoi Y, Saitoh D, Sato S et al. In vivo visualization of burn depth in skin tissue of rats using hemoglobin parameters

- estimated by diffuse reflectance spectral imaging. *J Biomed Opt.* 2024;29(2):026003. doi: 10.1117/1.JBO.29.2.026003.
95. Pećanac M, Janjić Z, Komarcević A., Pajić M, Dobanovacki D, Misković SS. Burns treatment in ancient times. *Med Pregl.* 2013;66:263-267.
96. Plassmann P, Jones C, McCarthy M. Accuracy and precision of the hand-held MAVIS wound measurement device. *Int J Low Extrem Wounds.* 2007;6(3):176-190.
97. Plassmann P, Jones TD. MAVIS: a non-invasive instrument to measure area and volume of wounds. *Med Engl Phys.* 1998;20(5):332-338.
98. Promny D, Billner M, Reichert B. Objektive Tiefenbestimmung von Verbrennungen der Hand [Objective burn depth assessment of hand burns]. *Handchir Mikrochir Plast Chir.* 2019;51(5):362-366. German. doi: 10.1055/a-0991-7869.
99. Przekora A. A Concise Review on Tissue Engineered Artificial Skin Grafts for Chronic Wound Treatment: Can We Reconstruct Functional Skin Tissue In Vitro? *Cells.* 2020;9(7):1622. doi: 10.3390/cells9071622.
100. Raab S. Method and apparatus for wound management. Appl. No. 733700 Filed October 17, 1996 US5957837.
101. Radzikowska-Büchner E, Łopuszyńska I, Flieger W, Tobiasz M, Maciejewski R, Flieger J. An Overview of Recent Developments in the Management of Burn Injuries. *Int J Mol Sci.* 2023;24(22):16357. doi: 10.3390/ijms242216357.
102. Renkielska A, Kaczmarek M, Nowakowski A, Grudziński J, Czapiewski P, Krajewski A et al. Active dynamic infrared thermal imaging in burn depth evaluation. *J Burn Care Res.* 2014;35(5):e294-303. doi: 10.1097/BCR.0000000000000059.
103. Rezaei E, Beiraghi-Toosi A, Ahmadabadi A, Tavousi SH, Tabrizi AA, Fotuhi K et al. Can Skin Allograft Occasionally Act as a Permanent Coverage in Deep Burns? A Pilot Study. *World J Plast Surg.* 2017;6:94-99.
104. Rezvani Ghomi E, Khalili S, Nouri Khorasani S, Esmaeely Neisiany R, Ramakrishna S. Wound dressings: Current advances and future directions. *J*

- Appl Polym Sci. 2019;136:47738. doi: 10.1002/app.47738.
105. Richard JL, Daures JP, Parer-Richard C et al. Of mice and Wounds: Reproducibility and accuracy of a novel planimetry program for measuring wound area. *Wounds*. 2000;12(6):1248-1254.
 106. Robinson CJ, Dickie B, Lindner C, Herrera J, Dingle L, Reid AJ et al. Complex wound analysis using AI. *Comput Biol Med*. 2025;190:109945. doi: 10.1016/j.compbimed.2025.109945.
 107. Rogers LC, Bevilacqua NJ, Armstrong DG, Andros G. Digital planimetry results in more accurate wound measurements: a comparison to standard ruler measurements. *J Diabetes Sci Technol*. 2010;4(4):799-802.
 108. Saeed S, Sohail M, Bashir MM, Bajwa MS, Nazir U, Khadam M. Comparison of outcome of early tangential excision with autografting versus interactive antimicrobial dressing in deep-partial thickness burn patients: A retrospective analysis. *Burns*. 2024;50(9):107221. doi: 10.1016/j.burns.2024.07.025.
 109. Saijo Y, Akaishi S, Kuwahara H. High-frequency Power Doppler Ultrasonography in Predicting Burn Depth: A Preliminary Case Report. *Plast Reconstr Surg Glob Open*. 2024;12(7):e5949. doi: 10.1097/GOX.0000000000005949.
 110. Schmiedova I, Dembickaja A, Kiselakova L, Nowakova B, Slama P. Using of Amniotic Membrane Derivatives for the Treatment of Chronic Wounds. *Membranes*. 2021;11:941. doi: 10.3390/membranes11120941.
 111. Schubert V. Measuring the area of chronic ulcers for consistent documentation in clinical practice. *Wounds*. 1997;9:153-159.
 112. Schulz T, Marotz J, Seider S, Langer S, Leuschner S, Siemers F. Burn depth assessment using hyperspectral imaging in a prospective single center study. *Burns*. 2022;48(5):1112-1119. doi: 10.1016/j.burns.2021.09.010.
 113. Seki T, Fujioka M, Fukushima H, Matsumori H, Maegawa N, Norimoto K et al. Regional tissue oxygen saturation measured by near-infrared spectroscopy to assess the depth of burn injuries. *Int J Burns Trauma*. 2014;4(1):40-44.
 114. Sessions RW, Rainer S, Carr RD, assignee. Device and related method for

- determining the surface area of a wound. Patent № EP0730845. Priority № US19950398225 19950303. 1996 Sept 11.
115. Shah NR, Palackic A, Brondeel KC, Walters ET, Wolf SE. The Burn Wound. *Surg Clin North Am.* 2023;103(3):453-462. doi: 10.1016/j.suc.2023.01.007.
 116. Shahdadi H, Rezayi S, Shahrahmani F, Mohamadi AA. Photographic Evaluation of Burn Depth via Telemedicine: Insights from Iranian Surgeons. *Telemed Rep.* 2023;4(1):266-270. doi: 10.1089/tmr.2023.0048.
 117. Sharma DJ, Langer V. Management of hand burns using tangential excision and grafting versus delayed excision and grafting. *Int Surg J.* 2019;6(6):2097-2103.
 118. Shaw J, Bell PM. Wound measurement in diabetic foot ulceration. In: *Global Perspective on Diabetic Foot Ulcerations.* InTech, 2011.
 119. Shetty R, Sreekar H, Lamba S, Gupta AK. A novel and accurate technique of photographic wound measurement. *Indian J. Plast. Surg.* 2012;45: 425-429.
 120. Singh R, Shitiz K, Singh A. Chitin, and chitosan: Biopolymers for wound management. *Int Wound J.* 2017;14:1276-1289. doi: 10.1111/iwj.12797.
 121. Smith RB, Rogers B, Tolstykh GP, Walsh NE, Davis MG, Bunegin L et al. Three-dimensional laser imaging system for measuring wound geometry. *Lasers Surg Med.* 1998;23(2):87-93.
 122. Song DH, Neligan PC. *Plastic Surgery. 4th ed. Trunk and Lower Extremity;* Elsevier; Amsterdam, The Netherlands: 2017.
 123. Spitz L, Coran AG. *Operative Pediatric Surgery. 6th ed.* Hodder Education Publishers; London, UK: 2006. pp. 957-964.
 124. Staud CJ, Resch A, Christ A, Borger A, Zaussinger M, Teufelsbauer M et al. Skin Bank Establishment in Treatment of Severe Burn Injuries: Overview and Experience with Skin Allografts at the Vienna Burn Center. *J Clin Med.* 2023;12:4717. doi: 10.3390/jcm12144717.
 125. Sugama J, Matsui Y, Sanada H, Konya C, Okuwa M, Kitagawa A. A study of the efficiency and convenience of an advanced portable Wound Measurement System (VISITRAK™). *J Clin Nurs.* 2007;16(7):1265-1269.

126. Taylor RJ. 'Mouseeyes': An aid to wound measurement using a computer. *J Wound Care*. 1997;6(3):123-126.
127. Thawer HA, Houghton PE, Woodbury MG, Keast D, Campbell K et al. A comparison of computer-assisted and manual wound size measurement. *Ostomy Wound Manage*. 2002;48(10):46-53.
128. Thomas AC, Wysocki AB. The healing wound: a comparison of three clinically useful methods of measurement. *Decubitus*. 1990;3(1):18-25.
129. Thorne CH, Chung KC, Gosain AK, Gurtner GC, Mehrara BJ, Rubin JP et al. *Grabb and Smith's Plastic Surgery*. 7th ed. Wolters Kluwer Health Adis (ESP)/Lippincott Williams & Wilkins Health; Philadelphia, PA, USA: 2013.
130. Tsunoi Y, Sato N, Nishidate I, Ichihashi F, Saitoh D, Sato S. Burn depth assessment by dual-wavelength light emitting diodes-excited photoacoustic imaging in rats. *Wound Repair Regen*. 2023;31(1):69-76. doi: 10.1111/wrr.13056.
131. Turchin I, Beschastnov V, Peretyagin P, Perekatova V, Kostyuk A, Orlova A et al. Multimodal Optical Monitoring of Auto- and Allografts of Skin on a Burn Wound. *Biomedicines*. 2023;11(2):351. doi: 10.3390/biomedicines11020351.
132. Valachova K, Svik K, Biro C, Soltes L. Skin wound healing with composite biomembranes loaded by troponin or captopril. *J Biotechnol*. 2020;310:49-53. doi: 10.1016/j.jbiotec.2020.02.001.
133. Verolino P, Casoli V et al. A skin substitute in a successful delayed reconstruction of a severe injured hand. *Burbs*. 2008;34:284-287.
134. Vo LT, Anikijenko P, McLaren WJ, Delaney PM, Barkla DH, King RG. Autofluorescence of skin burns detected by fiber-optic confocal imaging: evidence that cool water treatment limits progressive thermal damage in anesthetized hairless mice. *J Trauma*. 2001;51(1):98-104. doi: 10.1097/00005373-200107000-00016.
135. Wang R, Zhao J, Zhang Z, Cao C, Zhang Y, Mao Y. Diagnostic Accuracy of Laser Doppler Imaging for the Assessment of Burn Depth: A Meta-analysis and Systematic Review. *J Burn Care Res*. 2020;41(3):619-625. doi:

- 10.1093/jbcr/irz203.
136. Wang Y, Ke Z, He Z, Chen X, Zhang Y, Xie P et al. Real-time burn depth assessment using artificial networks: a large-scale, multicentre study. *Burns*. 2020;46(8):1829-1838. doi: 10.1016/j.burns.2020.07.010.
 137. Wannous H, Lucas Y, Treuillet S, Albouy B. A complete 3d wound assessment tool for accurate tissue classification and measurement. In: 15th IEEE International Conference on Image Processing. San Diego, California, USA: IEEE, 2008.
 138. Wilson RH, Rowland R, Kennedy GT, Campbell C, Joe VC, Chin TL et al. Review of machine learning for optical imaging of burn wound severity assessment. *J Biomed Opt*. 2024;29(2):020901. doi: 10.1117/1.JBO.29.2.020901.
 139. Witkowski W. Wykorzystanie opatrunków hydrożelowych w leczeniu wojennych ran oparzeniowych. *Chir Plast I Oparzenia*. 2019;7:37-41. doi: 10.15374/ChPiO2019013.
 140. Wood FM. The Role of Cell-Based Therapies in Acute Burn Wound Skin Repair: A Review. *J Burn Care Res*. 2023;44(Suppl_1):S42-S47. doi: 10.1093/jbcr/irac146.
 141. Wu XW, Herndon DN, Spies M, Sanford AP, Wolf SE. Effects of delayed wound excision and grafting in severely burned children. *Arch Surg*. 2002;137:1049-1054. doi: 10.1001/archsurg.137.9.1049.
 142. Xue EY, Chandler LK, Viviano SL, Keith JD. Use of FLIR ONE Smartphone Thermography in Burn Wound Assessment. *Ann Plast Surg*. 2018;80(4 Suppl 4):S236-S238. doi: 10.1097/SAP.0000000000001363.
 143. Yakupu A, Zhang J, Dong W, Song F, Dong J, Lu S. The epidemiological characteristic and trends of burns globally. *BMC Public Health*. 2022;22(1):1596. doi: 10.1186/s12889-022-13887-2.
 144. Yang CK, Polanco TO, Ii JCL. A Prospective, Postmarket, Compassionate Clinical Evaluation of a Novel Acellular Fish-skin Graft Which Contains Omega-3 Fatty Acids for the Closure of Hard-to-heal Lower Extremity

- Chronic Ulcers. Wounds. 2016;28:112-118.
145. Yeong EK, Hsiao TC, Chiang HK, Lin CW. Prediction of burn healing time using artificial neural networks and reflectance spectrometer. *Burns*. 2005;31(4):415-420. doi: 10.1016/j.burns.2004.12.003.
 146. Yu S, Dwight J, Siska RC, Burkart H, Quan P, Yi F et al. Feasibility of intra-operative image guidance in burn excision surgery with multispectral imaging and deep learning. *Burns*. 2024;50(1):115-122. doi: 10.1016/j.burns.2023.07.005.
 147. Zacharevskij E, Baranauskas G, Varkalys K, Rimdeika R, Kubilius D. Comparison of non-surgical methods for the treatment of deep partial thickness skin burns of the hand. *Burns*. 2018;44:445-452. doi: 10.1016/j.burns.2017.08.002.
 148. Żwieręło W, Piorun K, Skórka-Majewicz M, Maruszewska A, Antoniewski J, Gutowska I. Burns: Classification, Pathophysiology, and Treatment: A Review. *Int J Mol Sci*. 2023;24(4):3749. doi: 10.3390/ijms24043749.

ДОДАТКИ

Додаток 1

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лукавецький ОВ, Стояновський ІВ, **Фармага ТІ**. Комп'ютерна програма для вульнерометрії. Харківська хірургічна школа. 2017;1(82):145–147. URL: <https://surgical-school.com.ua/index.php/journal/issue/view/31/1-2017-pdf>
2. Farmaha I, **Farmaha T**, Banaś M, Savchyn V, Lukashchuk B. Wound image segmentation using clustering based algorithms. *New Trends in Production Engineering*. Warszawa: Sciendo; 2019. 2(1):570–578.
3. **Фармага ТІ**, Лукавецький ОВ, Чемерис М. Цифрова комп'ютерна планіметрія ранових дефектів різного генезу. Шпитальна хірургія. Журнал імені Л. Я. Ковальчука. 2022;3:42–45. <https://doi.org/10.11603/2414-4533.2022.3.13392>
4. **Фармага ТІ**, Лукавецький ОВ, Чемерис ОМ. Переваги тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластикомою для лікування опікових ран. *Хірургія дитячого віку (Україна)*. 2023;2(79):23–27. <https://doi.org/10.15574/PS.2023.79.23>
5. **7Фармага ТІ**, Лукавецький ОВ, Чемерис ОМ, Стояновський ІВ. Використання безконтактного термографа FLIR One для оцінювання глибини опікової рани. *Хірургія дитячого віку (Україна)*. 2024;2(83):13–18. <https://doi.org/10.15574/PS.2024.83.13>
6. **Фармага Т**, Лукавецький О, Чемерис О. Методи оцінювання розмірів та глибини опікової рани. *Proceedings of the Shevchenko Scientific Society. Medical Sciences [Internet]*. 2024;76(2):27.
7. **Фармага ТІ**, Лукавецький ОВ, Чемерис ОМ. Використання власної комп'ютерної програми для вульнерометрії та термографії у лікуванні опікових ран: опис власного клінічного випадку. *Клінічна анатомія та оперативна хірургія*. 2025;24(2):92–97. <https://doi.org/10.24061/1727-0847.24.2.2025.30>

8. Jaworski N, Farmaha I, **Farmaha T**, Marikutsa U, Savchyn V. Implementation features of wounds visual comparison subsystem. In: XIV-th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH) [abstracts]. Lviv, 18–22 April 2018. p. 114–118. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2018.8365714>
9. **Фармага ТІ**, Лукавецький ОВ, Чемерис ОМ. Оцінка глибини опікових уражень за допомогою безконтактної термографії FLIR ONE. XX Конгрес Світової Федерації Українських Лікарських Товариств (СФУЛТ), 24–26 жовтня 2024 р. Українські медичні вісті. 2024;16(3–4 suppl):46–47.
10. **Фармага Т. І.** Аналіз взаємозв'язків клінічними характеристиками та даних термографії з глибиною опікових ран // Матеріали 9-го Міжнародного наукового симпозиуму SMARTLION 2025 «Медична освіта та наукові дослідження в Україні під час війни» / за ред. проф. З. Масної ; Наукове товариство ім. Шевченка та ін. – Львів : ДНП «ЛНМУ імені Данила Галицького», 2025. – С. 72–74.

Додаток 2

Акти впровадження

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Медичний директор ВП «Лікарня Святого Луки»
КНП «Львівське територіальне медичне об'єднання
«Багатопрофільна клінічна лікарня інтенсивних методів
лікування та швидкої медичної допомоги»
м. Львова

Віталій Колодій

_____ 2025 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

1. Удосконалення діагностики ран, зокрема опікового генезу.
2. ДНП «Львівський національний медичний університет ім. Данила Галицького», кафедра хірургії №1, 79010, Львів, вул. Пекарська, 69: Фармага Т.І., Лукавецький О.В., Чемерис О.М.
3. Джерело інформації: Фармага Т. І., Лукавецький О. В., Чемерис О. М. Цифрова комп'ютерна планіметрія ранових дефектів різного генезу // Шпитальна хірургія. Журнал імені Л. Я. Ковальчука. — 2022. — №3. — С. 42–45.
4. Впроваджено в роботу опікового відділення для дорослих Міського центру термічної травми та пластичної хірургії відокремленого підрозділу «Лікарня Святого Луки» Комунального некомерційного підприємства «Львівське територіальне медичне об'єднання «Багатопрофільна клінічна лікарня інтенсивних методів лікування та швидкої медичної допомоги».
5. Термін впровадження з січень по грудень 2024 року
6. Загальна кількість спостережень 55
7. Ефективність впровадження у відповідності з критеріями викладеними у джерелі інформації (п.3) _____

Показники	За даними	
	авторів, які пропонують впровадження	організації, що впровадила
Покращення результатів лікування	на 91,8%	на 88,9%

8. Зауваження, пропозиції : немає, доцільно впроваджувати в клінічну практику

30 10 _____ 2025 р.

Завідувача опікового відділення для дорослих
Міського центру термічної травми та пластичної хірургії
відокремленого підрозділу «Лікарня Святого Луки»
Риш І.Я.



"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Медичний директор ВП «Лікарня Святого Луки»
 КНП «Львівське територіальне медичне об'єднання
 «Багатопрофільна клінічна лікарня інтенсивних методів
 лікування та швидкої медичної допомоги»
 м. Львова



Віталій Колодій

_____ 2025 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

1. Методика тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластикою, доповнена термографічним контролем і цифровими технологіями оцінки глибини рани.
2. ДНП «Львівський національний медичний університет ім. Данила Галицького», кафедра хірургії №1, 79010, Львів, вул. Пекарська, 69: Фармага Т.І., Лукавецький О.В., Чемерис О.М.
3. Джерело інформації: Фармага Т. І., Лукавецький О. В., Чемерис О. М. Переваги тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластикою для лікування опікових ран // Хірургія дитячого віку (Україна). — 2023. — Т. 2, № 79. — С. 23–27.
4. Впроваджено в роботу опікового відділення для дорослих Міського центру термічної травми та пластичної хірургії відокремленого підрозділу «Лікарня Святого Луки» Комунального некомерційного підприємства «Львівське територіальне медичне об'єднання «Багатопрофільна клінічна лікарня інтенсивних методів лікування та швидкої медичної допомоги».
5. Термін впровадження з січень по грудень 2024 року
6. Загальна кількість спостережень 98
7. Ефективність впровадження у відповідності з критеріями викладеними у джерелі інформації (п.3) _____

Показники	За даними	
	авторів, які пропонують впровадження	організації, що впровадила
Покращення результатів лікування	на 90,5%	на 84,6%

8. Зауваження, пропозиції : немає, доцільно впроваджувати в клінічну практику

30 10 2025 р.

Завідувача опікового відділення для дорослих
 Міського центру термічної травми та пластичної хірургії
 відокремленого підрозділу «Лікарня Святого Луки»
 Рик І.Я.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Медичний директор КНП ЛОР «Львівський обласний госпіталь ветеранів війни та репресованих ім. Ю. Липи»

Ростислав Коцань



30 жовтня 2025 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

1. Методика тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластиком, доповнена термографічним контролем і цифровими технологіями оцінки глибини рани.
2. ДНП «Львівський національний медичний університет ім. Данила Галицького», кафедра хірургії №1, 79010, Львів, вул. Пекарська, 69; Фармага Т.І., Лукавецький О.В., Чемерис О.М.
3. Джерело інформації: Фармага Т. І., Лукавецький О. В., Чемерис О. М. Переваги тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластиком для лікування опікових ран // Хірургія дитячого віку (Україна). — 2023. — Т. 2, № 79. — С. 23–27.
4. Впроваджено в роботу опікового відділення для дорослих Міського центру термічної травми та пластичної хірургії відокремленого підрозділу «Лікарня Святого Луки» Комунального некомерційного підприємства «Львівське територіальне медичне об'єднання «Багато-профільна клінічна лікарня інтенсивних методів лікування та швидкої медичної допомоги».
5. Термін впровадження з січень по грудень 2024 року
6. Загальна кількість спостережень 24
7. Ефективність впровадження у відповідності з критеріями викладеними у джерелі інформації (п.3) _____

Показники	За даними	
	авторів, які пропонують впровадження	організації, що впровадила
Покращення результатів лікування	на 90,5%	на 89,3%

8. Зауваження, пропозиції : немає, доцільно впроваджувати в клінічну практику

30 жовтня 2025 р.

Завідувач відділення термічної травми та реконструктивної хірургії
к. мед. н., Савчин В.С.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Медичний директор КНП ЛОР «Львівський обласний госпіталь ветеранів війни та репресованих ім. Ю. Липи»

Ростислав Коцань



20 жовтня 2025 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

1. Удосконалення діагностики ран, зокрема опікового генезу.
2. ДНП «Львівський національний медичний університет ім. Данила Галицького», кафедра хірургії №1, 79010, Львів, вул. Пекарська, 69: Фармага Т.І., Лукавецький О.В., Чемерис О.М.
3. Джерело інформації: Фармага Т. І., Лукавецький О. В., Чемерис О. М. Цифрова комп'ютерна планіметрія ранових дефектів різного генезу // Шпитальна хірургія. Журнал імені Л. Я. Ковальчука. — 2022. — №3. — С. 42–45.
4. Впроваджено в роботу опікового відділення для дорослих Міського центру термічної травми та пластичної хірургії відокремленого підрозділу «Лікарня Святого Луки» Комунального некомерційного підприємства «Львівське територіальне медичне об'єднання «Багато-профільна клінічна лікарня інтенсивних методів лікування та швидкої медичної допомоги».
5. Термін впровадження з січень по грудень 2024 року
6. Загальна кількість спостережень 21
7. Ефективність впровадження у відповідності з критеріями викладеними у джерелі інформації (п.3) _____

Показники	За даними	
	авторів, які пропонують впровадження	організації, що впровадила
Покращення результатів лікування	на 91,8%	на 87,2%

8. Зауваження, пропозиції: немає, доцільно впроваджувати в клінічну практику

20 жовтня 2025 р.

Завідувач відділення термічної травми та реконструктивної хірургії
к. мед. н., Савчин В.С.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Завідувач кафедри хірургії №1

ДНП «Львівський національний медичний університет

імені Данила Галицького»

Володимир Хом'як

"30" жовтня 2025 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

1. Методика тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластиком, доповнена термографічним контролем і цифровими технологіями оцінки глибини рани.
2. ДНП «Львівський національний медичний університет ім. Данила Галицького», кафедра хірургії №1, 79010, Львів, вул. Пекарська, 69; Фармага Т.І., Лукавецький О.В., Чемерис О.М.
3. Джерело інформації: Фармага Т. І., Лукавецький О. В., Чемерис О. М. Переваги тангенціального висічення з одночасною аутодерматопластиком для лікування опікових ран // Хірургія дитячого віку (Україна). — 2023. — Т. 2, № 79. — С. 23–27.
4. Впроваджено в роботу опікового відділення для дорослих Міського центру термічної травми та пластичної хірургії відокремленого підрозділу «Лікарня Святого Луки» Комунального некомерційного підприємства «Львівське територіальне медичне об'єднання «Багато-профільна клінічна лікарня інтенсивних методів лікування та швидкої медичної допомоги».
5. Термін впровадження з січень по грудень 2024 року
6. Загальна кількість спостережень 28
7. Ефективність впровадження у відповідності з критеріями викладеними у джерелі інформації (п.3) _____

Показники	За даними	
	авторів, які пропонують впровадження	організації, що впровадила
Покращення результатів лікування	на 90,5%	на 89,4%

8. Зауваження, пропозиції : доцільно впровадити в навчальний план студентів 4, 5, 6-го курсів медичного факультету КНП «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького»

"30" жовтня 2025 р.

Завідувач кафедри хірургії №1

ДНП «Львівський національний медичний університет

імені Данила Галицького»

Хом'як В.В.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
 Завідувач кафедри хірургії №1
 ДНП «Львівський національний медичний університет
 імені Данила Галицького»
 Володимир Хом'як
 Кафедра
 хірургії №1
 2025 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

1. Удосконалення діагностики ран, зокрема опікового генезу.
2. ДНП «Львівський національний медичний університет ім. Данила Галицького», кафедра хірургії №1, 79010, Львів, вул. Пекарська, 69; Фармага Т.І., Лукавецький О.В., Чемерис О.М.
3. Джерело інформації: Фармага Т. І., Лукавецький О. В., Чемерис О. М. Цифрова комп'ютерна планіметрія ранових дефектів різного генезу // Шпитальна хірургія. Журнал імені Л. Я. Ковальчука. — 2022. — №3. — С. 42–45.
4. Впроваджено в роботу опікового відділення для дорослих Міського центру термічної травми та пластичної хірургії відокремленого підрозділу «Лікарня Святого Луки» Комунального некомерційного підприємства «Львівське територіальне медичне об'єднання «Багато-профільна клінічна лікарня інтенсивних методів лікування та швидкої медичної допомоги».
5. Термін впровадження з січень по грудень 2024 року
6. Загальна кількість спостережень 36
7. Ефективність впровадження у відповідності з критеріями викладеними у джерелі інформації (п.3) _____

Показники	За даними	
	авторів, які пропонують впровадження	організації, що впровадила
Покращення результатів лікування	на 91,8%	на 84,5%

8. Зауваження, пропозиції : Зауваження, пропозиції : доцільно впровадити в навчальний план студентів 4, 5, 6-го курсів медичного факультету КНП «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького»

30 жовтень 2025 р.

Завідувач кафедри хірургії №1
 ДНП «Львівський національний медичний університет
 імені Данила Галицького»
 Хом'як В.В.