

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГРАБОВСЬКА НАТАЛІЯ РОМАНІВНА



УДК 383.8:621.396.96

**Інформаційні технології тривимірної реконструкції зображень
поверхневих дефектів для ламбертівської моделі відбиття світла**

05.13.06 – інформаційні технології

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Фізико-механічному інституті
ім. Г.В. Карпенка НАН України

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
Русин Богдан Павлович,
Фізико-механічний інститут
ім. Г.В. Карпенка НАН України,
завідувач відділу методів і систем дистанційного
зондування, м. Львів

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент
Шекета Василь Іванович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу,
завідувач кафедри інженерії
програмного забезпечення, м. Івано-Франківськ

доктор технічних наук, професор
Яровий Андрій Анатолійович,
Вінницький національний технологічний
університет,
завідувач кафедри комп'ютерних наук, м. Вінниця

Захист відбудеться “2” травня 2019 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 58.082.02 в Тернопільському національному економічному університеті за адресою: 46020, м. Тернополь, вул. Львівська, 11а (корпус 11, зал засідань вченої ради).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Тернопільського національного економічного університету за адресою: 46020, м. Тернополь, вул. Бережанська, 4.

Автореферат розісланий “1” квітня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 58.082.02
д.т.н., доцент



В.В. Яцків

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інформаційні технології (ІТ) тривимірної реконструкції об'єктів широко застосовуються в різноманітних галузях науки і техніки, а саме в медицині, робототехніці, дистанційному зондуванні поверхні Землі. Останнім часом вони знайшли своє широке використання і в дистанційному зондуванні поверхні конструкційних матеріалів. Так в неруйнівному контролі технічного стану об'єктів необхідно оцінити форму та розміри поверхневих дефектів, які є вирішальними при оцінці ресурсу безаварійної роботи об'єктів. Існуючі підходи до тривимірної реконструкції (3D) мають цілий ряд недоліків. Їх усунення вимагає вдосконалення існуючих інформаційних технологій 3D реконструкції. Зокрема, при стереореконструкції необхідно усунути збій методу та алгоритму, що його реалізує. Цей збій пов'язаний з присутністю на одному з зображень стереопари значної за розмірами зони загороджених пікселів. Для тривимірного відтворення за фотометричним стерео та алгоритмами SFS збій методу і алгоритму зумовлений присутністю на об'єкті аналізу зони, де змінюється дифузний коефіцієнт відбиття від поверхні. Ці артефакти виникають і при використанні методів, що основані на використанні ламбертівської моделі відбиття світла.

Тому дисертаційна робота, яка присвячена розробці методів і програмно-технічних засобів тривимірної реконструкції, в яких усувається залежність від завад, викликаних зміною дифузного коефіцієнта відбиття та загороджених пікселів на зображеннях об'єктів реконструкції, є актуальною науковою роботою.

Розвинуті в роботі положення базуються на доробці таких вчених, як О. Романюк, В. Гусятін, Є. Башков, В. Боюн, В. Лукін, Е. Путятін, Б. Русин, М. Шлезінгер, Y. Ma, С. Rafael, Д. Форсайт, О. Faugeras, Р. Anandan, А. Blake, R. Szeliski, D. Scharstein, Д. Броек, Р. Marcus, J. Fole, В.К.Р. Horn, R.J. Woodham та інші.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.

Дисертаційна робота є складовою частиною досліджень, що виконувалися за дербюджетною темою: “Розроблення інформаційних технологій діагностики елементів конструкцій, уражених корозійними виразками” (номер державної реєстрації 0114U004007, 2014-2016 рр.) у Фізико-механічному інституті НАН України.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка методів і програмно-технічних засобів тривимірної реконструкції на інформаційному ресурсі ламбертівської моделі відбиття світла, та створення на їх основі інформаційних технологій, які підвищують завадостійкість та швидкість відтворення форми дефектів в технічній діагностиці.

Досягнення поставлено мети вимагало вирішення наступних науково-технічних завдань:

- провести загальний огляд та системний аналіз основних відомих методів тривимірної реконструкції з обґрунтуванням їхніх переваг та недоліків при моніторингу технічного стану металевих конструкцій;

- розробити та реалізувати ІТ тривимірної реконструкції поверхні за одним або тріадою зображень на інформаційному ресурсі ламбертівської моделі відбиття світла, яка використовує технологічно задані напрямки освітлення поверхні;

- усунути вплив артефактів, а саме зміни дифузного коефіцієнта відбиття і загороджених пікселів на процес реконструкції та оцінити похибки відтворення форми поверхневих дефектів;

- розробити метод дистанційного оптичного моніторингу напрямків світла;

- розробити новий метод та алгоритм тривимірної реконструкції за стереозображенням на інформаційному ресурсі ламбертівської моделі відбиття світла;

- практично реалізувати нову ІТ тривимірної реконструкції поверхневих дефектів за одним зображенням, що базується на ламбертівському відбитті світла.

Об'єкт дослідження: процес тривимірної реконструкції локальних пошкоджень поверхонь металевих конструкцій за їх зображеннями.

Предмет досліджень - методи та алгоритми зменшення впливу артефактів на тривимірну реконструкцію поверхневих дефектів.

Методи дослідження: методи 3D реконструкції, методи оцінки похибок вимірювань з застосуванням рядів Тейлора і Маклорена, комп'ютерне моделювання процесу реконструкції.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у створенні на інформаційному ресурсі ламбертівської моделі відбиття світла нових методів і інформаційних технологій тривимірної реконструкції, які зменшують вплив артефактів на відтворення форми дефектів та підвищують швидкість і точність їх реконструкції.

1. Вперше розроблено математичну модель, яка усуває з процесу відтворення форми дефекту вплив зміни дифузного коефіцієнта відбиття світла, що дозволяє розробити інформаційну технологію тривимірної реконструкції поверхневих дефектів за тріадою зображень, яка на відміну від існуючих зменшує похибку визначення форми та глибини дефектів.

2. Запропоновано метод автоматизованого дистанційного контролю напрямку освітлення поверхні об'єкту, який дозволяє здійснити такий контроль на інформаційному ресурсі ламбертівської моделі відбиття світла за трьома векторами нормалі до тестової поверхні, що має тріаду площин. Метод об'єднаний у технологічний ланцюжок з методами ІТ тривимірної реконструкції за тріадою зображень, що збільшує швидкість і точність відтворення форми поверхневих тріщин та пітингів.

3. Удосконалено ІТ тривимірної реконструкції за стереозображенням, в якій застосовуються два напрямки освітлення поверхні об'єкту та зменшено до мінімуму вплив зміни дифузного коефіцієнта відбиття світла в процесі відтворення форми дефекту.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному.

Запропонована ІТ тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень, де напрямки освітлення визначаються методом дистанційного оптичного моніторингу напрямку освітлення (абсолютна похибка розрахункової частини алгоритму реконструкції котангенсів кутів освітлення становить $\pm 0,028$), дає змогу

застосовувати таку реконструкцію для автоматизованого неруйнівного контролю дефектостійкості поверхні елементів конструкції.

Запропонований метод тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень з контролем напрямків освітлення, шляхом порівняння з технологічно заданим вектором (гарантована абсолютна похибка встановлення котангенсів кутів освітлення $\pm 0,01$), дозволяє застосовувати таку реконструкцію для моніторингу технічного стану об'єктів з відносною похибкою реконструкції $\pm 0,1$. Для підвищення точності реконструкції розроблено двокроковий алгоритм встановлення оптимального бокового кута освітлення для формування зображень. Ефективність практичного застосування 3D реконструкції перевірена для поверхневих пітингів, що виникають на поверхні на сталі 17ГС.

Для запропонованої ІТ 3D реконструкції пітинга за його двовимірним зображенням оцінені похибки визначення значень вертикальної похідної та глибини, які індуковані відхиленням оцінок параметрів ламбертівської моделі відбиття світла від дійсних або технологічно запланованих значень, що дало змогу практичної реалізації ІТ з гарантованими похибками реконструкції.

Результати дисертаційної роботи, а саме розроблені установки фотозйомки поверхні трубопроводів, а також алгоритми та інформаційні технології реконструкції дефектів реалізовані у вигляді програмного забезпечення, яке прийнято для впровадження в філії БМФ “Укргазпромбуд” АТ “Укртрансгаз” та Долинському ЛВ УМГ філії “Прикарпаттрансгаз” для неруйнівного контролю стану газопроводів, уражених корозійними дефектами.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати роботи отримані автором самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, автору належать; метод дистанційного визначення напрямку світла [1]; метод тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень [2]; оцінка точності тривимірної реконструкції [3, 4]; алгоритм тривимірної реконструкції за стереозображенням [5]; алгоритм адаптивної тривимірної реконструкції за одним зображенням дефекту [6]; програмна реалізація методів реконструкції [7-9]; аналіз похибок методів реконструкції [10-13].

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень та основні положення роботи доповідались та обговорювались на:

- VIII Міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій” (Запоріжжя, 2016).
- IV науково-технічній конференції "Обчислювальні методи і системи перетворення інформації" (Львів, 2016).
- Відкритих науково-технічних конференціях молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (Львів, 2015, 2017).
- VIII Всеукраїнській науково-практичній конференції "Інформатика та системні науки" ІСН-2017 (Полтава, 2017).

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано 14 наукових праць, з них 9 статей у виданнях, що входять до переліку фахових видань, затверджених ДАК України, і 5 публікації у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку літературних джерел (141 найменування) та двох додатків. Загальний обсяг роботи – 163 с., у тому числі 32 рисунки та 3 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми, представлено зв'язок роботи з планами та темами, сформульовано мету, основні задачі досліджень, надано методи дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення основних результатів, представлено відомості про їх апробацію та реалізацію.

У першому розділі окреслені існуючі методи тривимірної реконструкції. Встановлено, що найуживанішими методами тривимірної реконструкції: є реконструкція за стереозображенням, алгоритми SFS та фотометричний стереоскопічний метод. Висвітлені основні операції з яких складаються відомі методи реконструкцій. Встановлено, що найбільшу загрозу при використанні найуживаніших методів для моніторингу технічного стану поверхні конструкції слід очікувати за рахунок появи артефакту (SFS і фотометричний стереоскопічний метод) зон, де зафіксовані зміни дифузного коефіцієнту, або артефакту загородження пікселів (класична реконструкція). Висвітлені ключові операції тривимірної реконструкції за одним зображенням та тривимірної реконструкції за трьома зображеннями, створених на інформаційному ресурсі ламбертівської моделі відбиття світла. Встановлено, що для практичного використання даних методів слід їх удосконалити та доопрацювати. Тому напрямок наукових досліджень сконцентрований на розробленні працездатної високопродуктивної та ефективної ІТ на інформаційному ресурсі ламбертівської моделі відбиття світла.

Другий розділ присвячений розробці математичних моделей та методів тривимірної реконструкції за зображеннями для відновлення форми і визначення глибини дефекту, що виник на досліджуваній поверхні конструкції в результаті дії корозійних процесів. Для цього, використовуючи ламбертівську модель відбиття світла, розроблено нові експлуатаційно привабливі для технічної діагностики методи тривимірної реконструкції поверхні матеріалу по декількох зображеннях, а також одному 2D зображенню.

Вперше запропоновано новий метод 3D реконструкції дефекту за тріадою зображень, в якому усунуто його залежність від зміни дифузного коефіцієнту відбиття. Для цього фотозйомкою (напрямок освітлення $L_0 = (0, 0, 1)$, $L_1 = (\cos\theta, 0, \sin\theta)$, $L_2 = (0, \cos\phi, \sin\phi)$ (рис. 1, а, де θ – кут напрямку світла в площині $[XZ]$, ϕ – кут напрямку світла в площині $[YZ]$)) отримано тріаду зображень поверхні за ламбертівською моделлю

$$I_{\lambda i} = I_a + \tau(N \cdot L_i), \quad i=0,1,2,$$

де I_a – інтенсивність розсіяного світла; $\tau = I_{p\lambda} k_d$ ($I_{p\lambda}$ – інтенсивність джерела світла; k_d – дифузний коефіцієнт відбиття); N – вектор нормалі до поверхні. Якщо поверхня задана в явній формі $z=f(x,y)$, то вектор нормалі до поверхні у досліджуваній точці $M=(x,y,z)$ приймає значення $N = \{-p_d, -q_d, d\}$, де

$d = (p^2 + q^2 + 1)^{-1/2}$, а $p = \frac{\partial z}{\partial x}$, $q = \frac{\partial z}{\partial y}$. Шляхом затінення поверхні отримується зображення I_a . На основі інформації про зображення I_{λ_i} та I_a отримуємо формулу для проведення реконструкції

$$p = \operatorname{tg}\theta - \mu_1 \operatorname{sec}\theta, \quad q = \operatorname{tg}\phi - \mu_2 \operatorname{sec}\phi, \quad (1)$$

де $\mu_j = I_{ja} / I_{0a}$ $j=1,2$, тут $I_{ia} = I_{\lambda_i} - I_a$. Оцінку глибини реконструйованого дефекту отримуємо інтегральним накопиченням похідних p , q , починаючи від точки, яку приймаємо за опорну. Щоб підвищити точність реконструкції для випадку, коли об'єкт реконструкції (1) є ізотропний у тривимірному просторі, тобто $\theta = \phi$, розроблено двокроковий алгоритм. Перший крок полягає у встановленні максимального кута освітлення $\theta_{\max+}$ дефекту. В результаті отримуємо два зображення $I_{\lambda_{1+}}, I_{\lambda_{2+}}$. Умова відсутності затінення для зображення $I_{\lambda_{1+}}$ наступна $|p| < |\operatorname{tg}\theta|$. Шляхом алгебраїчних перетворень трансформуємо цю умову у таку форму $\{s\} = \mu_1 < 2 \sin \theta$. Аналогічно визначимо умову $\{t\} = \mu_2 < 2 \sin \theta$. Сформувавши масиви знайдемо максимальний елемент $S_{ik,\max}$. Тоді похідну $p_{ik,\max}$ оцінимо як кут $\theta_1 = \operatorname{arctg} p_{ik,\max}$. На другому кроці встановлюємо кут освітлення $\theta_{\max} = \theta_1 + \Delta\theta$, де $\Delta\theta$ – оцінка похибки визначення кута θ_1 , і повторно знімаємо зображення $I_{\lambda_1}, I_{\lambda_2}$. Таким чином за отриманою інформацією з виразів (1) можна обчислити скореговане значення похідних p , q і знайти точнішу оцінку глибини об'єкта.

Для практичної реалізації реконструкції запропоновано два методи визначення напрямків освітлення поверхні об'єкту. В першому методі контроль вектору освітлення реалізується порівнянням з технологічно заданим вектором. В другому методі контроль вектору освітлення реалізується за зображенням тестової поверхні на основі ламбертівської моделі відбиття світла.

Суть першого методу полягає у наступному. Схему освітлення дефекту, що реалізує запропонований метод реконструкції, наведено на рис. 1, а, а розташування та конструкцію його основних пристроїв: пристрою вертикального променя (ПВП) та пристрою бокового променя (ПБП) наведено відповідно на рис. 1, б і в. ПВП складається з двох конструктивних елементів: освітлення і екранування. Елемент освітлення L_{pS0} складається з джерела світла L_{S0} та конденсора 1. Елемент екранування містить два екрани (e_1 та e_2). ПБП також має елементи освітлення і екранування, які конструктивно аналогічні таким пристроям у ПВП, а також має вузол формування напрямку освітлення, що складається з плоских дзеркал M_0 і M_1 та регулятора орієнтації. Регулятором змінюється напрям нормалі до поверхні дзеркала M_1 , що дозволяє змінювати напрям променя L_1 . ПВП і ПБП працюють в двох режимах (калібровки напрямку освітлення та освітлення). В першому встановлюється напрям освітлення об'єкта з заданою точністю.

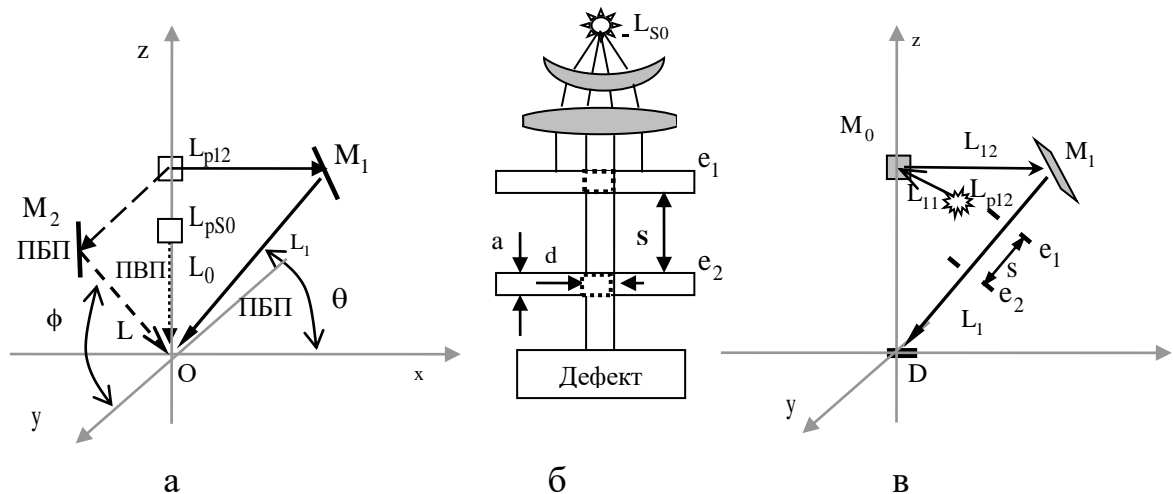


Рисунок 1 – Геометрична інтерпретація запропонованої схеми освітлення дефекту в тривимірному просторі відносно точки O

В другому режимі проводиться освітлення дослідного зразка D пристроєм променя в процесі фотозйомки. Розглянемо режим калібровки напрямку освітлення на прикладі ПБП (рис. 1, в). Вузол освітлення генерує пучок паралельних променів (L_{11}), який дзеркалом M_0 відбивається (L_{12}) на плоске дзеркало M_1 . Для встановлення режиму освітлення променів, відбитих з плоского дзеркала M_1 , використовуються екрани e_1 та e_2 . Кожний екран має отвір розміром d . Ці отвори технологічно розташовуються на прямій лінії, яка відповідає запланованому напрямку L_1 до площини дослідного зразка. Дзеркало M_1 , обертаючи в площинах XZ та YZ , встановлюється таким чином, щоб промінь освітлення L через отвір екрана e_2 падав на дослідний зразок D . Для опису вектора L скористаємось сферою $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ з центром у досліджуваній точці O . Ця точка розміщена у центрі координат. Для поверхні $z = \sqrt{1 - x^2 - y^2}$ можна визначити похідну $P = \frac{\partial z}{\partial x} = -\text{ctg}\theta$,

де θ – кут напрямку світла в площині $[XZ]$, а також похідну $Q = \frac{\partial z}{\partial y} = -\text{ctg}\phi$,

де ϕ – кут напрямку світла в площині $[YZ]$. На цій основі вектор

$$L = \{-PD, -QD, D\}, \quad (2)$$

де $D = (P^2 + Q^2 + 1)^{-1/2}$. Коли промінь L через отвори екранів падає на дослідний зразок, то виконується умова перевірки напрямку освітлення. У площині $[XZ]$ ($[YZ]$) ця умова має вигляд $\Delta P \geq d / (s + 2a)$ ($\Delta Q \geq d / (s + 2a)$). ПБП і ПВП мають такі технічні характеристики: абсолютна похибка $\Delta P_0 = \pm 0,01$ визначення параметра P_0 ; абсолютна похибка $\Delta Q_0 = \pm 0,01$ визначення параметра Q_0 . Габаритні характеристики вузла екранування: $s=30$ см, $a=0,5$ см, $d=3$ мм. В режим освітлення для фотозйомки отвори екранів збільшуються.

Суть другого (нового) методу визначення напрямків освітлення поверхні об'єкту полягає у наступному. Для оптичного моніторингу напрямку освітлення L отримуємо зображення $I_{\lambda\Pi}$ тестової поверхні, яка представляє собою тріаду

площин (ТП), що мають такі вектори нормалі $N_0 = (0, 0, 1)$, $N_1 = (\cos\theta, 0, \sin\theta)$, $N_2 = (0, \cos\phi, \sin\phi)$. З кожного сегмента j -ої площини зображення $I_{\lambda\Pi}$ отримується точка $I_{\lambda\Pi j} = I_a + I_{p\lambda} k_d (N_j \cdot L)$, де L визначено з (2). З цієї системи отримаємо реконструкцію параметрів

$$P = \operatorname{tg}\theta - \mu_{\Pi 1} \operatorname{sec}\theta, \quad Q = \operatorname{tg}\phi - \mu_{\Pi 2} \operatorname{sec}\phi, \quad (3)$$

де $\mu_{\Pi i} = I_{\Pi ia} / I_{\Pi 0a}$, $i=1,2$, тут $I_{\Pi ja} = I_{\lambda\Pi j} - I_a$. На основі (3), щоб підвищити автоматизованість та швидкість реконструкції (1), для випадку коли напрямки освітлення не вимагають встановлення технологічно запланованих значень, розроблена її спеціальна (нова) версія. Нехай фотозйомкою (напрямо освітлення L_n , $n=0,1,2$) отримано тріаду зображень поверхні $I_{\lambda n} = I_a + \iota(N \cdot L_n)$, а також затінене зображення I_a . Представлену інформацію, шляхом алгебраїчних перетворень, трансформуємо у таку систему рівнянь:

$$\begin{bmatrix} I_{1a}L_{x0} - I_{0a}L_{x1} & I_{1a}L_{y0} - I_{0a}L_{y1} \\ I_{2a}L_{x0} - I_{0a}L_{x2} & I_{2a}L_{y0} - I_{0a}L_{y2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}, \text{ де } I_{na} = I_{\lambda n} - I_a, B_1 = I_{1a}L_{z0} - I_{0a}L_{z1},$$

тут $l=1,2$. Якщо напрямки освітлення L_n , $n=0,1,2$ визначені методом (3), то за одержаними виразами можна реконструювати похідні p , q , що програмно реалізується на платформі МАТЛАБ. Щоб контролювати точність роботи методу (3), розглянемо його структуру під час синтезу зображень ТП, де кожне зображення синтезується з персональним напрямком освітлення. Проведемо комп'ютерне моделювання цього процесу. Оскільки зразок є фіксований, то можна вважати $p = p(x, y) = \partial z / \partial x$, $q = q(x, y) = \partial z / \partial y$ визначеними. Для спрощення на стадії комп'ютерного моделювання зображень приймаємо, що інтенсивність фону $I_a = 0$ і вважаємо відомим зважений дифузний коефіцієнт $\iota = I_{p\lambda} k_d$. За виразом ламбертівської відбиття світла зображення ТП $I_{\lambda\Pi nm} = \iota(N_j \cdot L_{nm})$, де $m=\overline{1, M}$, $n=\overline{1, N}$ синтезуємо з індивідуальним кутом освітлення L_{nm} (в (2) застосовано підставлення $L_{nm} = L$), який визначається похідними P_{nm} , Q_{nm} на сфері. Тестова модель ТП, параметри P , Q та синтезовані зображення $I_{\lambda\Pi nm} = I_{n,m}$ наведені на рис. 2. З зображення $I_{n,m}$ виділяємо три точки $I_{j,n,m}$, де кожна точка належить окремій j -й площині. На основі точок $I_{j,n,m}$ за системою (3) реконструйовано масиви похідних \underline{P}_{nm} , \underline{Q}_{nm} вектору нормалі сфери і визначаємо їх абсолютну похибку $\Delta P_{nm} = \underline{P}_{nm} - P_{nm}$, $\Delta Q_{nm} = \underline{Q}_{nm} - Q_{nm}$. Абсолютна похибка розрахункової частини методу дистанційної оцінки горизонтальної та вертикальної похідної вектору нормалі сфери становить $[-0,025, 0,028]$, коли P і Q належать діапазону $[1,225; 1,25]$. Отже алгоритм має задовільну точність і в перспективі, при розповсюдженні дії запропонованого методу на реконструкцію об'єктів з реальних зображень, це дозволить проводити відновлення автоматизовано з вищою оперативністю і меншими технологічними та часовими затратами, як в польових умовах при моніторингу технічного стану великих за розмірами об'єктів,

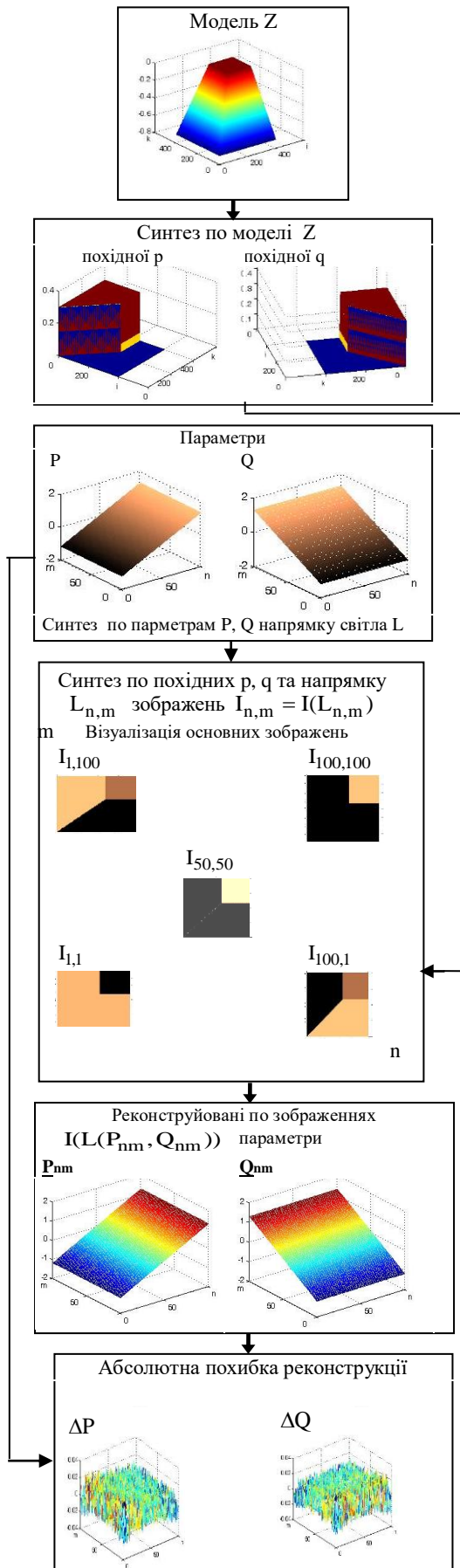


Рисунок 2 – Метод оптичного моніторингу напрямку освітлення

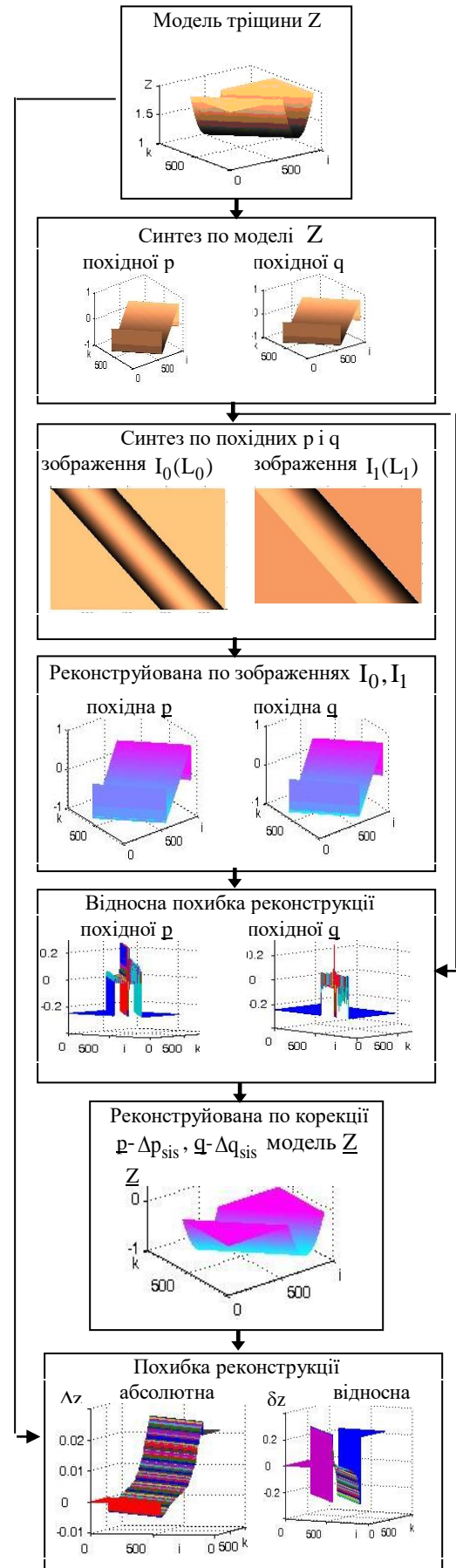


Рисунок 3 – Інформаційна технологія тривимірної реконструкції за стереозображенням

так і в умовах оптичної мікроскопії, тобто при неруйнівному контролі дефектостійкості поверхні реальних об'єктів у великому діапазоні зміни розмірів дефектів.

Розглянемо потенціальні можливості реконструкції (1) при скороченні фотоінформації від тріади зображень до двох. Пропонується новий метод тривимірної реконструкції поверхні за її стереозображенням, в якому фотозйомкою (напрямок освітлення $L_0 = (0,0,1)$, $L_1 = (L_{x1}, L_{y1}, L_{z1})$) отримані зображення $I_{\lambda_i} = I_a + \iota(N \cdot L_i)$, $i=0,1$. На основі інформації I_{λ_i} та I_a запишемо

$$p = -q - b, \quad q^2 + bq + c = 0, \quad (4)$$

де $b = (\mu_1 - L_{z1})/L_{x1}$, $c = 0,5[b^2 + 1 - \iota^2 I_{0a}^{-2}]$. В такому випадку пропонується інформаційна технологія тривимірної реконструкції за парою зображень, яка представлена на рис. 3, а її детальний опис буде приведено у четвертому розділі. Щоб спростити реконструкцію (4) запропоновано наступне. При реконструкції за стереозображенням інтегральним накопиченням похідних p , q , починаючи від опорної точки, відбувається відновлення поверхні $z=f(x,y)$ у прямокутній декартовій системі координат XYZ . На основі напрямку освітлення $L_1 = (L_{x1}, L_{y1}, L_{z1})$ визначаємо кут $\varphi = \arctg(L_{x1}/L_{y1})$. Нехай проведено поворот прямокутної системи координат у тривимірному просторі навколо осі OZ на кут φ . В цьому випадку опис реконструйованої поверхні набуває форми $z=f_1(u,v)$, де u – координата, що має напрямок (L_{x1}, L_{y1}) , а координата v , перпендикулярна до u . Тоді для опису вектора нормалі до поверхні $F(u,v,z)=0$ у досліджуваній точці $M=(u,v,z)$ застосуємо $N=(-hw, -gw, w)$, де $w = (g^2 + h^2 + 1)^{-1/2}$, а $h = \partial z / \partial u$, $g = \partial z / \partial v$ нахил поверхні в околі точки, що приводить до реконструкції (1) у такому вигляді

$$h = \tg\theta - \mu_1 \sec\theta, \quad g = \tg\phi - \mu_2 \sec\phi. \quad (5)$$

Для спрощення реконструкції (4) замість горизонтальної похідної p доцільно реконструювати похідну h (5), а потім інтегральним накопиченням похідних h , q , починаючи від опорної точки, реконструюється поверхня $z=f_2(u,y)$ у системі координат UYZ . Як бачимо, інформації за парою зображень є достатньо для тривимірної реконструкції.

Розглянемо випадок відновлення форми об'єкта на основі одного зображення дефекту. Нехай дефект належить до класу горизонтальних тріщин або пітингів. Встановлено, що реконструкція таких дефектів має спільні риси проте є простішою для пітинга. Тому розглянемо структуру цієї технології реконструкції для зображення пітинга. Для оцінки глибини пітинга в роботі запропоновано двоетапну ІТ. На першому етапі знайдемо переріз пітинга z у найбільш інформативній зоні, де він проходить через точку максимальної глибини. На другому етапі, базуючись на отриманій оцінці перерізу z , визначимо повномасштабну оцінку 3D поверхні пітинга шляхом апроксимації поверхні сфероподібними сегментами. Зупинимось більш детально на цих етапах. Етап 1. Нехай для реконструкції використовуємо зображення $I_\lambda = I_a + \iota(N \cdot L)$, де $L = (0, \cos\varphi, \sin\varphi)$. Знайдемо переріз пітингу z . На обробленому сегменті зображення низькочастотним фільтром у горизонтальному

напрямку, виділяємо вертикальний переріз пітингу, де діє припущення, що $p=0$. На основі цього впливає реконструкція оцінок вертикальних похідних q з розв'язку квадратного рівняння $aq^2 + bq + c = 0$, де $a = ctg^2\varphi - \xi$; $b = -2ctg\varphi$; $c = 1 - \xi$, тут $\xi = \iota / (I_\lambda - I_a)$. В точці максимальної глибини пітинга $z(x_0, y_0)$ отримуємо $q(x_0, y_0) = p(x_0, y_0) = 0$. Тому з $I_{\lambda 0} = I_\lambda(x_0, y_0)$ слідує $\iota = (I_{\lambda 0} - I_a) / \sin\varphi$. В результаті такої реконструкції одержимо масив оцінок похідної q в вертикальному перерізі пітинга. В результаті, шляхом накопичення значень похідної q починаючи від точки, яка розміщена на початку пітинга, відновлюємо масив оцінок глибини пітинга.

Етап 2. ІТ полягає у реалізації наступних чотирьох алгоритмів: штучної моделі пітинга; зміщення штучної моделі по горизонтальному напрямку; стиснення лівого (правого) сегмента штучної моделі з параметром l_{opt} (r_{opt}). Розглянемо кожен з цих алгоритмів. Алгоритм штучної моделі працює таким чином, що поверхня пітинга утворюється обертанням його вертикального перерізу $z = f(y) = f(x_{max}, y)$ відносно вертикальної осі Oz , яка проходить через точку максимальної глибини (x_{max}, y_{max}) і має таку форму $z = f(\rho)$, де $\rho = \sqrt{(x_1 - s)^2 \eta^{-2} + (y - y_{max})^2}$, тут $x_1 = x - x_{max}$, s – зміщення по напрямку x_1 , η – стиснення до вертикальної прямої, яка проходить через точку $(x_{max} - s, y_{max})$ і $\eta \in \{1, r\}$, де стиск з l (r) виконується для точок (x, y) таких, що $x < x_{max} - s$ ($x > x_{max} - s$). Для алгоритму зміщення фіксуємо параметр η , задаючись експериментальними оцінками фону \hat{I}_a і інтенсивності відбиття $\hat{I}_{\lambda 0}$, за дифузною моделлю, де компоненти вектора нормалі p, q розраховано по зміщеній моделі пітинга $z(s)$. Далі синтезуємо штучне зображення моделі пітинга I_s і визначаємо оцінку абсолютної похибки $\Delta I = I_p - I_s$, де I_p – реальне зображення пітинга. Інтегральним накопиченням квадрата ΔI по всіх точках, які належать пітингу, визначаємо квадратичну форму F_s . Для уточнення моделі $z(s)$ шукаємо мінімум квадратичної форми F_s , який обчислюється з параметром $s = s_{opt}$. Знайдений параметр s_{opt} використовується в адаптивній корекції алгоритмами стиснення у сегментах штучної моделі $z = f_2(s_{opt}, l)$ (l – лівий сегмент) і $z = f_2(s_{opt}, r)$ (r – правий сегмент). Для уточнення квадратичних форм з застосуванням селектуючих одиничних функцій P_g , де g приймає значень s , або l , або r , враховано просторову селекцію $F_g = S_g^{-1} \sum_i \sum_k P_{gik} (I_{pik} - I_{gik})_{gik}^2$, де I_g штучне зображення моделі пітинга, S_g – площа одиничних значень функції P_g . Просторова селекція є двох видів. Одна з них закладена в структуру алгоритмів ІТ, а друга використовується для вилучення з квадратичної форми точок артефактів.

Третій розділ присвячено удосконаленню запропонованих методів тривимірної реконструкції у таких аспектах, як автоматизованість і точність відтворення форми об'єкту. Розраховано кількість інформації, яку отримано для ІТ

за тріадою зображень. Розділ також присвячений розгляду нових методів реконструкції, що усувають недоліки, які виникають на етапі їх моделювання і експлуатації.

Для безвтратної реконструкції поверхні дефекту за тріадою зображень (1) була визначена її похибка. Перший етап аналізу точності інформаційної технології пов'язаний з оцінкою похибки визначення похідних поверхні при її реконструкції (1) в залежності від вертикального напрямку освітлення. З використанням розкладу в ряд Маклорена, коли враховано основні вагомні члени ряду, аналітично знайдена абсолютна величина похибки Δp визначення горизонтальної похідної досліджуваної поверхні, яка обумовлена відхиленням вертикального напрямку освітлення $L(P_0, Q_0)$ від технологічно запланованого значення $L(0, 0)$, а саме $\Delta p = p(L(P_0, Q_0)) - p(L(0, 0))$. На основі Δp знайдено відносну похибку обрахунку горизонтальної похідної $\delta p = \delta p_p + \delta p_q$, де $\delta p_p = P_0(1 - p)$, $\delta p_q = Q_0q(1 - p)/p$. В аналізі похибок δp_p , δp_q використані технічні характеристики ПВП та моделі системи тривимірної реконструкції, а саме похибки реконструкції горизонтальної похідної $\delta p_{p0} = \pm 0,1$ і $\delta p_{q0} = \pm 0,1$ під впливом параметра P_0 і Q_0 . Результати розрахунків розподілу абсолютної похибки визначення параметра $\Delta P = P_0 \leq 0,1/(1 - p)$ представлені на рис. 4, а, де $\theta = \text{arcctg} P_0$ показують, що при кутах $87,5^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ реконструкція похідної p відбувається з заданою відносною похибкою $\delta p_{p0} = 0,1$ без обмежень діапазону похідної p . Також показано, що умова безвтратної реконструкції похідної p під впливом параметра Q_0 , $-\delta p_{q0} \leq \delta p_q \leq \delta p_{q0}$ трансформується в умови $0,01 \leq Q_0 \leq -0,01$, де $Q_0 = 0,1p/(1 - p)q$. Результати розрахунків розподілу Q_0 представлено на рис. 4, б. Тут точки безвтратної реконструкції в яких можна реконструювати похідні p та q представлено сірим кольором. З рис. 4, б, видно, що в околі $p=0$ заплановані діапазони реконструкції похідних p та q зменшено. Для розширення діапазонів реконструкції доцільно додатково зменшити абсолютну похибку ΔQ_0 . Один з варіантів практичної реалізації такої операції полягає у збільшенні відстані s в ПВП (рис. 1, б). Доведено, що з використанням підставлень представлені результати можна використати для встановлення безвтратної реконструкції вертикальної похідної. Другий етап аналізу точності полягає в оцінці похибки визначення похідних поверхні при її реконструкції в залежності від бокового напрямку освітлення. Застосуємо у системі джерела світла з такими параметрами, що $L_0 = (0, 0, 1)$, $L_1 = (L_{x1e}, 0, L_{z1e})$, $L_2 = (0, L_{y2e}, L_{z2e})$, де $k = L_{z1e} = L_{z2e}$. За таких умов фотозйомки отримано тріаду зображень поверхні $I_{\lambda i} = I_a + \iota(N \cdot L_i)$, $i=0,1,2$, а також затінене зображення I_a . Додатково забезпечено $k = I_{p\lambda j}/I_{p\lambda 0}$, $j=1,2$. На основі інформації про зображення $I_{\lambda i}$ та I_a отримуємо реконструкцію похідних p , q у такому вигляді $p = \delta I_1$, $q = \delta I_2$, $\delta I_m = L_{z1e}(I_{\lambda 0} - I_{\lambda m})/((I_{\lambda 0} - I_a)L_{x1e})$ $m=1,2$. З використанням розкладу в ряд Тейлора, в якому враховано основні вагомні члени ряду, аналітично знайдена абсолютна похибка визначення горизонтальної похідної

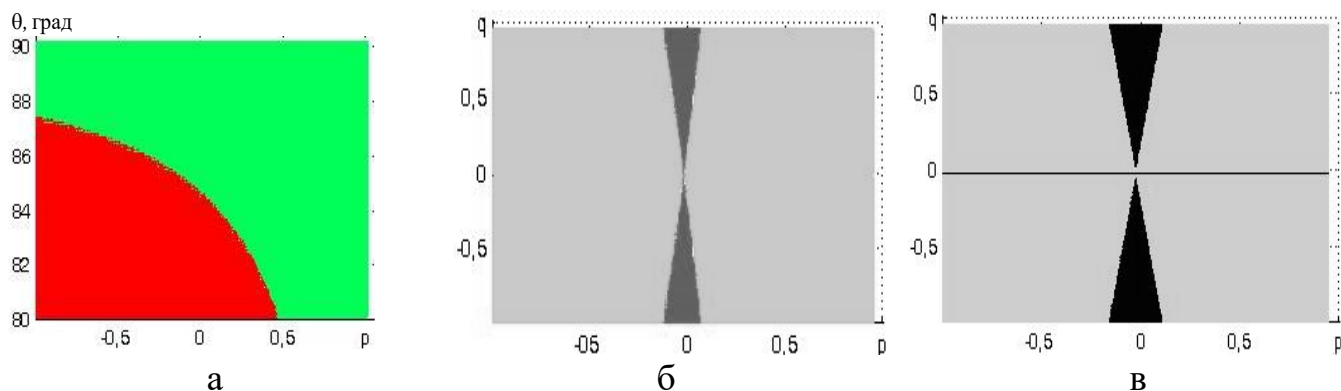


Рисунок 4 – Залежність кута θ від горизонтальної похідної p (а). Бінарний розподіл відхилення $Q_0(p, q)$ для ПВП(б). Бінарний розподіл відхилення $Q_0(p, q)$ для ПБП(в).

досліджуваної поверхні обумовлена відхиленням бокового напрямку освітлення $L = L(P, Q)$ від технологічно запланованого значення $L(P_e, Q_e)$ (в виразі (2), L визначено в точці з $P = P_e = -1$, $Q = Q_e = 0$). На цій основі визначена відносна похибка $\delta r_+ = \delta r_P + \delta r_Q$, де $\delta r_P = (1 + P)(1 + p) / 2\sqrt{2}p$, $\delta r_Q = Qq / \sqrt{2}p$. Аналогічно була обчислена відносна похибка δr реконструкції за тріадою зображень (1) при не контрольованих змінах бокового напрямку. Коли порівняли відносну похибку δr_+ і відносну похибку δr , то виявилось, що відносна похибка реконструкції δr_+ має в $1/\sqrt{2}$ менше значення. Результати розрахунків розподілу абсолютної похибки визначення параметра $\Delta P = P_0 \leq 0, 2\sqrt{2}p / (1 + p)$ показують, що в діапазоні значень горизонтальної похідної $[-0,0325, 0,0350]$ реконструкція відбувається з похибкою, яка перевищує задану відносну похибку $\delta r_{P_0} = 0,1$. Подібно до першого етапу аналізу точності показано, що умови безвтратної реконструкції похідної p під впливом параметра Q_0 наступні $0,01 \leq Q_0 \leq -0,01$, де $Q_0 = 0,1p / \sqrt{2}q$. Результати розрахунків розподілу Q_0 представлено на рис. 4, в. Тут точки безвтратної реконструкції в яких можна реконструювати похідні p та q представлено сірим кольором. Видно, що в околі $p=0$ та $q=0$ заплановані діапазони реконструкції похідних p та q зменшено. Заходи покращення точності та використання результатів для похідної q аналогічні запропонованим на першому етапі аналізу точності. Показано, що в зонах безвтратної реконструкції похідних точність прогнозу тріщиностійкості на основі коефіцієнта інтенсивності напружень K_σ складає $\delta K_\sigma = \pm 0,1$.

Для визначення сфери застосування ІТ тривимірної реконструкції за одним зображенням в режимі визначення форми та глибини пітинга необхідно встановити похибку цієї технології. Проаналізуємо точність реконструкції вертикальної похідної q . Перший етап полягає в оцінці похибки визначення похідної q при її реконструкції в залежності від напрямку освітлення. Можна показати, що шляхом алгебраїчних перетворень з виразу $I_\lambda = I_a + \iota(N \cdot L)$ отримується квадратне рівняння корні якого є функцією $q_{1,2} = f(P, Q)$ від двох незалежних змінних параметрів P, Q . З використанням розкладу цієї функції в ряд Маклорена, в якому враховано основні вагомні члени ряду, аналітично знайдено

$$q(Q) = \sqrt{\xi^2 - 1} - Q\xi^2, \quad (6)$$

де $\xi = \iota / (I_\lambda - I_a)$. Прийmemo, що існує абсолютна похибка ΔQ формування запланованого значення параметра Q , яка викликає $Q_1 = Q + \Delta Q$. А це ланцюгово викликає спотворення реконструкції $q(Q_1)$, яке можна оцінити абсолютною похибкою $\Delta q = q(Q_1) - q(Q) = -\Delta Q \xi^2$. Коли в перерізі диференціальна аналітична модель пітинга відома $q = q(y)$, де $y \in [y_e, y_U]$, тут y_e – точка краю пітинга, y_U – точка максимальної глибини пітинга, тоді можна визначити аналітичну модель зображення вертикального перерізу пітинга $I_\lambda = I_a + \iota / \xi$, де $\xi = [(Q^2 + 1)(q^2 + 1)]^{1/2} / (qQ + 1)$. Нехай $Q \ll 1$, $q = ky$, $y_U = 0$, $y_e < 0$, тоді можна визначити відносну похибку визначення глибини пітинга $\delta z_U = -2\Delta Q(q_e^2 + 3) / 3q_e$, де $q_e = -ky_e$. Результати розрахунків розподілу δz_U з аналізом виконання умови $|\delta z_U| \leq 0,1$ представлено на рис. 5 (q_e позначено як q , тобто точки в яких можна реконструювати похідні q представлено сірим кольором). Щоб визначити існуючі обмеження діапазону безвартної реконструкції D зверху представимо відносну похибку δz_U у такій формі $q_e^2 + 1,5(\delta z_U / \Delta Q)q_e + 3 = 0$. Задаючись похибкою ΔQ і $\delta z_U = 0,1$, знайдемо корні цього рівняння q_{e1} , q_{e2} та діапазон $D = q_{e1} / q_{e2}$ (рис. 6). З представлених залежностей можна зробити висновок, що для того, щоб забезпечити практично безвартну реконструкцію глибини пітинга з похибками $|\delta z_U| \leq 0,1$ і $|\Delta Q| \leq 0,01$ параметри системи обробки зображень повинні лежати в діапазоні $q_e \in [0,2, 14,8]$, що відповідає $D=74$. Наступний етап аналізу точності полягає в оцінці похибки визначення похідної q при її реконструкції (6) в залежності від фону та дифузного коефіцієнта. З використанням розкладу функції $q = f(I_a, \iota)$ (6) в ряд Тейлора, в якому враховано основні вагомні члени ряду, аналітично знайдена відносна похибка

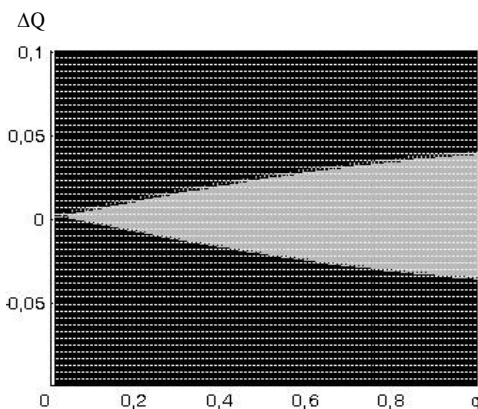


Рисунок 5 – Бінарний розподіл відносної похибки визначення глибини пітинга

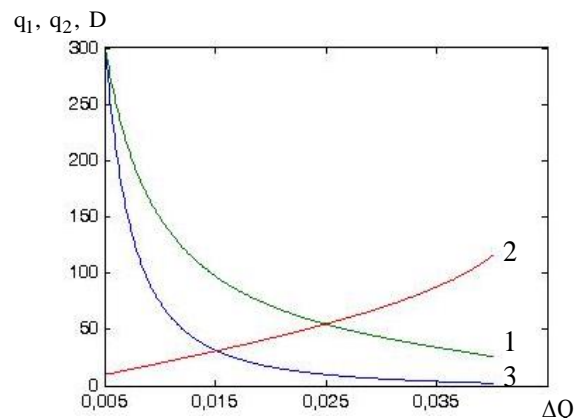


Рисунок 6 – Залежність параметрів максимального значення $q_{e1} = 0,1 \cdot q_1$ (1) мінімального $q_{e2} = 0,01 \cdot q_2$ (2) та діапазону безвартної реконструкції D (3) від величини абсолютної похибки ΔQ

визначення похідної q , обумовлена відхиленням параметрів I_{a0} , ι_0 отриманих під час реконструкції від дійсних значення цих параметрів I_a , ι : $\delta q = \delta q_{I_a} + \delta q_{\iota}$, де $\delta q_{I_a} = \Delta q_{I_a} / q$ і $\delta q_{\iota} = \Delta q_{\iota} / q$, тут Δq_{I_a} і Δq_{ι} – відповідно абсолютна похибка визначення похідної q під впливом фону та зваженого дифузного коефіцієнта ($\Delta q_{I_a} = \delta_{I_a} \eta \xi_0^3 \varepsilon$, де $\delta_{I_a} = (I_a - I_{a0}) / I_a$, $\eta = I_{a0} / \iota_0$; $\varepsilon = (\xi_0^2 - 1)^{-1/2} - 2Q$, $\xi_0 = \sqrt{q^2 + 1} / (\sin \varphi - q \cos \varphi)$); $\Delta q_{\iota} = \delta_{\iota} \xi_0^2 \varepsilon$ де $\delta_{\iota} = (\iota - \iota_0) / \iota$). Кількісну оцінку δq отримано за $\varphi = 60^\circ$, $\eta = 0,1$ і припущення, що $\delta_{I_a} = \delta_{\iota}$. На основі δq встановлено, що якщо працювати з експлуатаційно привабливим значенням $\delta_{I_a} = -0,1$, то діапазон реконструкції похідної q є наступний $D = [0,47; 2,9]$. Для розширення меж цього діапазону D пропонується наступний двокроковий алгоритм. Нехай при використанні кута φ_1 забезпечується діапазон D_{φ_1} . Нехай реконструйовано оцінку $\tilde{q} \notin D_{\varphi_1}$. Залишаємо положення площини зразка XOY незмінним і нахиляємо джерело освітлення по відношенню до площини XOY під кутом φ_2 так, що забезпечує $\Delta q_{I_a} + \Delta q_{\iota} = 0$. Підставивши в це рівняння складові Δq_{I_a} , Δq_{ι} та виконавши алгебраїчні перетворення, отримаємо рівняння $4Q^4 + 8Q^3\tilde{q} + 3\tilde{q}^2Q^2 + 2\tilde{q}Q - 1 = 0$. Один з коренів $Q_{1,2,3,4}$ дозволяє встановити кут нахилу джерела світла φ_2 , необхідний для отримання зображення $I_{\lambda_0}(\varphi_2)$, на основі якого можна провести реконструкцію похідної q з заданою точністю. Приклад розробленого двокрокового алгоритму з результатами розрахунків розподілу $\delta q(\varphi, q)$ для випадку, коли $\eta = 0,1$ і діє припущення, що $\delta_{I_a} = \delta_{\iota} = 0,1$, представлено у бінарній формі на рис. 7, де зони в яких не виконується умова $|\delta q(\varphi, q)| < 0,15$ подано чорним, а пунктиром наведено параметри двокрокового алгоритму. Діапазон реконструкції $[q_{im}, q_{iM}]$, де $i=1,2$ відповідає куту φ_i . Щоб уникнути появи діапазону, де заборонено реконструкцію, пропонується застосовувати освітлення в таких напрямках, які гарантують перекриття діапазонів реконст

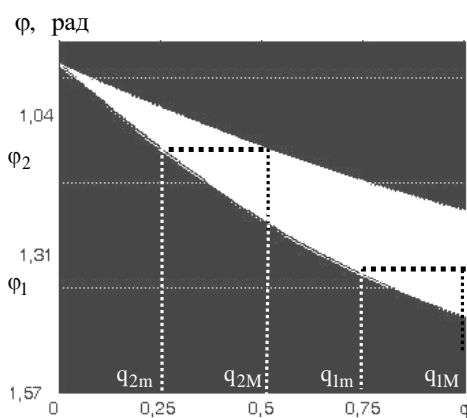


Рисунок 7 – Бінарний розподіл відносної похибки визначення вертикальної похідної $\iota = I_{p\lambda} k_d \delta q(\varphi, q)$

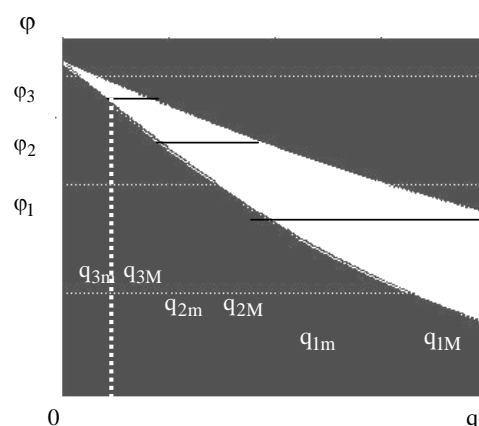


Рисунок 8 – Приклад неперервного діапазону реконструкції

рукції, що дозволяє збільшити діапазон реконструкції і тим самим зменшити похибку визначення глибини пітинга. Такий приклад наведено на рис. 8.

Четвертий розділ присвячений результатам застосування розроблених методів та ІТ тривимірної реконструкції зображень металографічних дефектів, таких як пітинги для оцінки характеристик дефектостійкості.

Представлено результати практичного застосування ІТ відновлення форми і оцінки глибини дефекту (пітинга) за тріадою зображень. Схему освітлення поверхні зразка наведено на рис. 1. Запропонована інформаційна технологія складається з реконструкції похідних, яка проведена за виразами (1). Для підвищення точності застосовано двокроковий алгоритм встановлення мінімально можливого значення кута θ . Глибину пітинга z_{ik} знаходимо апроксимацією інтегрального накопичення похідних p, q , починаючи від апріорі заданої опорної точки.

Апробацію алгоритму тривимірної реконструкції пітинга здійснили на електрозварній трубі (сталь 17ГС) для газонафтопродуктогонів. Для фотозйомки пітинга, дислокованого на трубі, використовували фотокамеру 10mp CANON EOS 40D Body. Під час першої фотозйомки тріади зображень забезпечували напрямок освітлення джерелом світла з такими координатами $L_0 = (0,0,1)$, $L_{1+} = (0,17;0;0,98)$, $L_{2+} = (0;0,17;0,98)$, що відповідає куту $\theta = \phi = 80^\circ$. Отримали тріаду зображень $I_{\lambda 0}(L_0), I_{\lambda 1+}(L_{1+}), I_{\lambda 2+}(L_{2+})$, де $\{I_{\lambda m} | \lambda \in \{r, g, b\}; m \in \{0, 1+, 2+\}\}$. На основі отриманої інформації (червона компонента, яка мала найбільшу інтенсивність) реалізували двокроковий алгоритм, розрахувавши масиви параметрів s, t , де визначили максимальний елемент $s_{ik, \max}$, по якому обчислили значення похідної $p_{ik, \max}$ і визначили уточнений кут освітлення $\theta_{\max} = 70^\circ$. Знаючи величину кута під час повторної фотозйомки використовували бокові напрямки освітлення з координатами $L_1 = (0.34;0;0,94)$, $L_2 = (0;0,34;0,94)$. За таких умов отримали тріаду зображень $I_{\lambda m}(L_m)$, де $\{I_{\lambda m} | \lambda \in \{r, g, b\}; m \in \{0, 1, 2\}\}$. На рис. 9 а-в представлено напівтонову проекцію I_{gm} кольорових зображень пітинга. Окрім того, зіставляючи розміри об'єктів (рис. 9, в) у міліметрах (метрична біла смуга) і пікселях, оцінили крок $\Delta x = \Delta y = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ mm/pixel}$. Для визначення інтенсивності фону I_a використовували штучне затінення пітинга прямокутником. На рис. 9 г наведена напівтонова проекція I_{ga} . На основі компонент I_{gm} , $m=0,1,2$, а також червоної компоненти інтенсивності фону I_{ra} за алгоритмом (1) реконструювали оцінку похідних p_{ik}, q_{ik} , де $i = \overline{1, 732}$, $k = \overline{1, 532}$. Глибину пітинга отримано інтегральним накопиченням похідних p, q . Результати відновлення форми дефекту подано на рис. 9, д.

Крім того, проведена апробація запропонованої двоетапної ІТ визначення глибини пітинга за 2D зображенням поверхні матеріалу (рис. 10). Для отримання фотоінформації про дефект використали фотоапарат Canon, встановивши напрямок

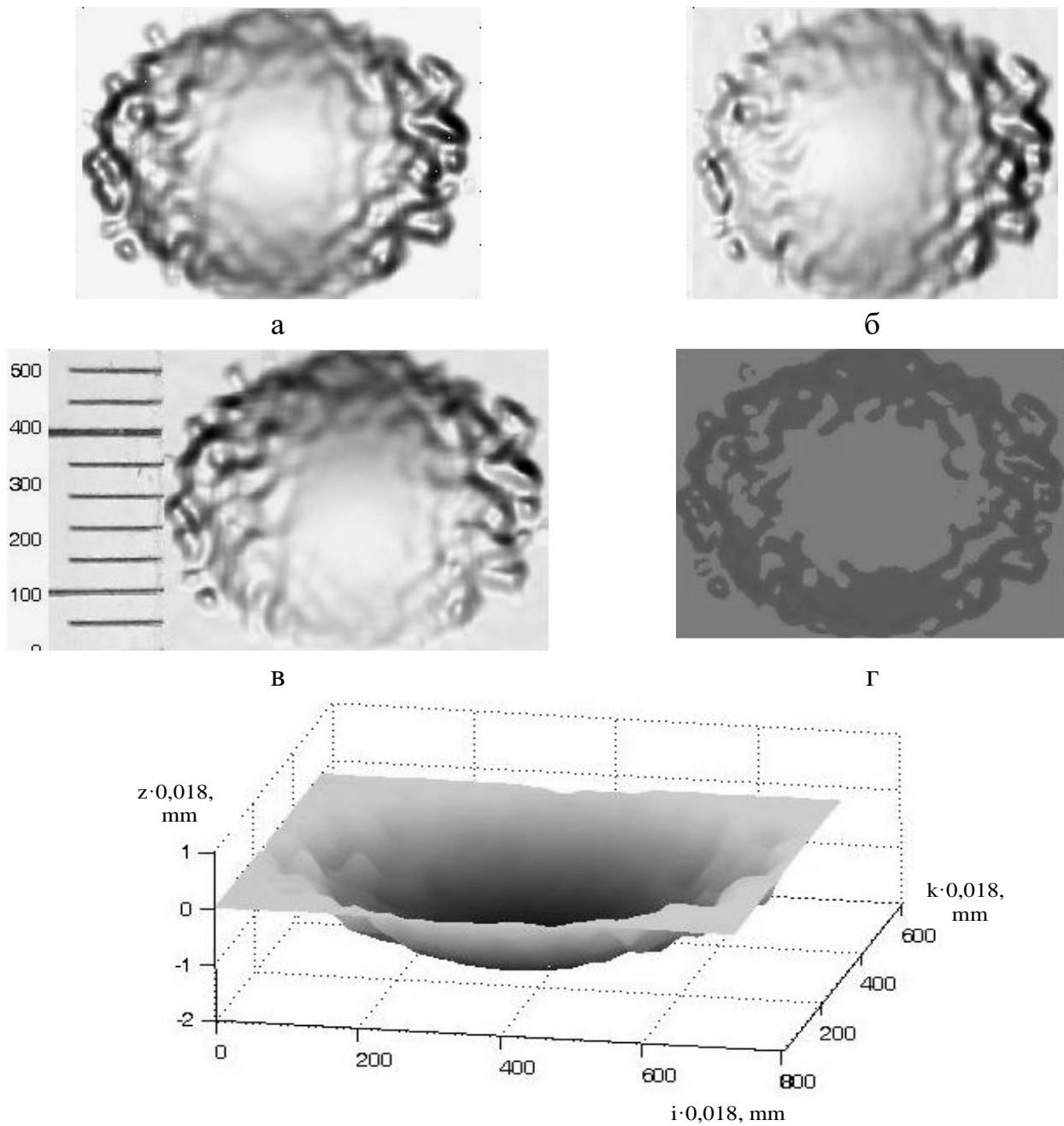


Рисунок 9 – Тріада зображень пітинга під різними кутами освітлення (а, б, в), інтенсивність фону (г) та реконструйований пітинг (д)

освітлення джерелом світла $L = (0; 0,88; 0,47)$, кут $\varphi = 0,49$ пітинга, дислокованого на трубі зі сталі 17ГС (рис. 10, I). На першому етапі реконструюємо вертикальну похідну вектора нормалі в точках вертикального перерізу, де спостерігається, що глибина пітинга $z(x, y)$ є незмінна на горизонтальному відрізку в околі цих точок. На зображенні пітинга (рис. 10, I (штрихова лінія)) горизонтальну дислокацію фрагмента носія вертикального перерізу позначено прямокутником, який окреслений білою штриховою лінією. Для підсилення ефекту повільнозмінності ($p=0$) застосовується фільтрація зображення в околі перерізу по горизонтальному

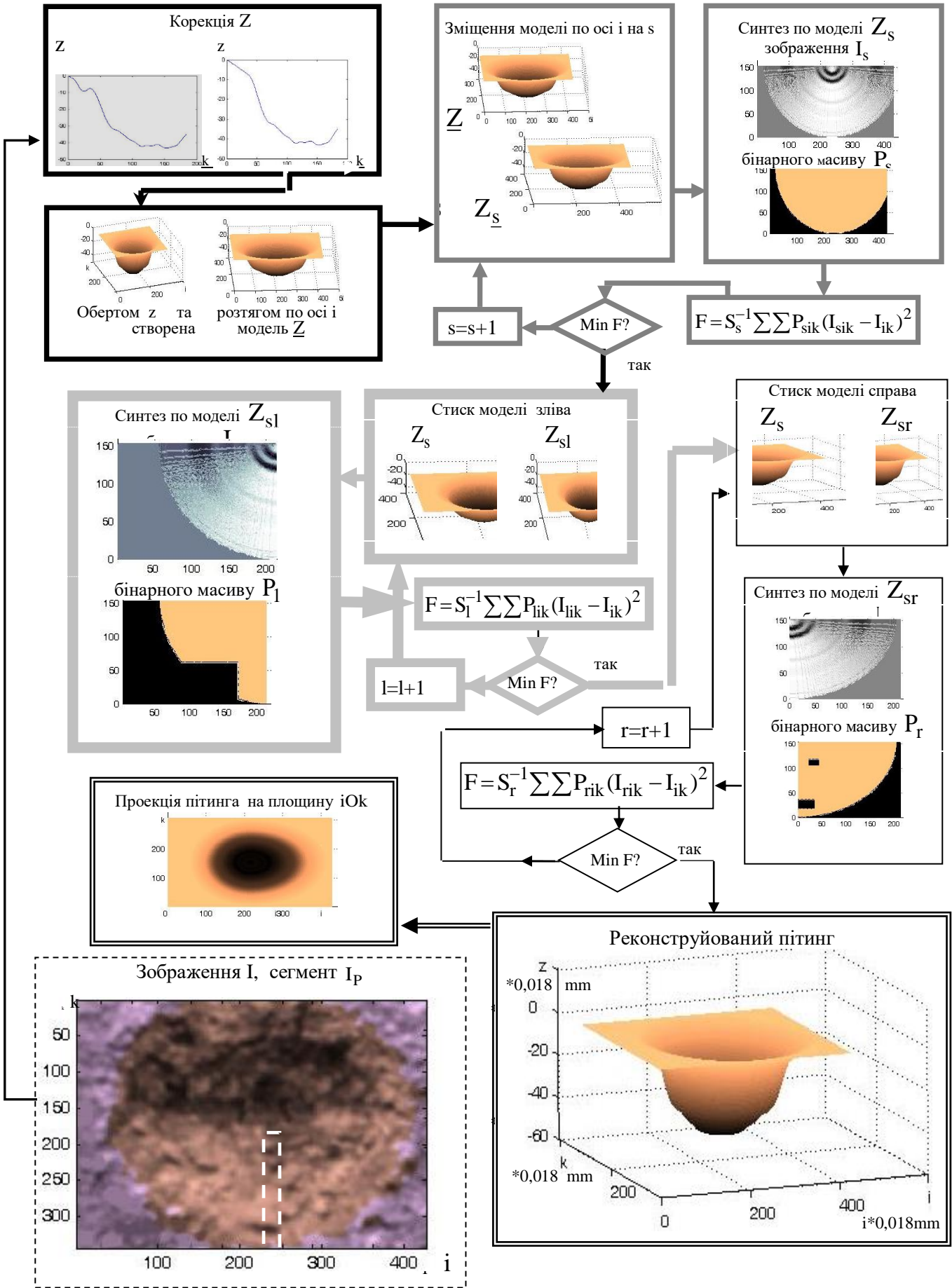


Рисунок 10 – IT оцінки глибини пітинга за зображенням поверхні матеріалу, ураженого корозією

напрямку \bar{I}_p . З масиву профільтованих точок \bar{I}_p виділили вертикальний переріз $\bar{I}_{\Delta k}$. Використовуючи $\bar{I}_{\Delta k, r}$ (найінтенсивніша червона компонента), а також визначений фон $\hat{I}_a = 30,4$ і інтенсивність відбиття $\hat{I}_{\lambda O} = 141,4$ отримали реконструкцію вертикальної похідної (6) у вигляді масивів q_1 (реконструйовано модуль і знак) та q_2 . Інтегральним накопиченням масиву q_1 було розраховано масив оцінок глибини пітинга Z (рис. 10, в блоці операторів з товстою чорною лінію), де знайдено максимальну глибину пітинга $Z_{\max} = 0,78 \text{ mm}$. Другий етап розробленої ІТ полягає у реалізації алгоритмів, які наведені на рис. 10. Структура алгоритму штучної моделі знаходиться в блоці операторів з товстою чорною лінію. Спочатку здійснюється лінійна корекція отриманого перерізу Z у нетиповому для всього пітингу розподілі. Далі на основі скоректованого вертикального перерізу z поверхня пітинга утворюється шляхом виконання двох операцій, а саме обертанням його скоректованого вертикального перерізу $z = f(k) = f(i_{\max}, k)$ відносно вертикальної осі Oz , яка проходить через точку максимальної глибини (i_{\max}, k_{\max}) і має таку форму $Z = f(\rho)$, де $\rho = \sqrt{(i - i_{\max})^2 + (k - k_{\max})^2}$, та розтягом $Z = f(\rho)$ у горизонтальному напрямку оператором інтерполяції. Структура алгоритму зміщення подана в блоці операторів темно сірою лінію. На основі моделі пітинга \underline{Z} виконується зміщення моделі Z_s . Задаючись її похідними, оцінками фону \hat{I}_a і інтенсивності відбиття $\hat{I}_{\lambda O}(k_d)$ за дифузною моделлю здійснюється синтез зображення I_s . Далі по всіх незатінених точках визначаємо квадратичну форму F та заходимо її мінімум. Аналогічну структуру має алгоритм оптимального стиску зліва η_1 . Це блок операторів з світло сірою лінію (справа η_r , блок операторів з тонкою чорною лінію). Результат реконструкції реального пітинга, дислокованого на газопроводі, наведено подвійною чорною лінією.

При використанні моделі тривимірної реконструкції за стереопарою зображень (4) необхідно програмно реалізувати цей метод, а також оцінити похибки реконструкції. В якості досліджуваного дефекту реконструкції обрано поверхневу тріщину (ПТ). Щоб контролювати точність роботи цього методу, розглянемо його структуру під час синтезу зображень ПТ. Проведемо комп'ютерне моделювання дефекту. Оскільки зразок є фіксований, то можна вважати похідні $p(x, y)$, $q(x, y)$ визначеними. Для спрощення на стадії комп'ютерного моделювання зображень приймаємо, що інтенсивність фону $I_a = 0$ і вважаємо відомим зважений дифузний коефіцієнт $\iota = I_{p\lambda} k_d$. За виразом ламбертівської відбиття світла зображення дефекту синтезуємо з кутом освітлення $L_0 = (0, 0, 1)$, $L_1 = (0, 45, 0, 45, 0, 77)$. Тестова модель ПТ, похідні p , q та синтезовані зображення $I_{\lambda i}$ наведені на рис. 2. На основі $I_{\lambda i}$ за системою (4) реконструйовано масиви похідних p , q і визначено їх відносну похибку $\delta u_{ik} = (u_{ik} - u_{ik}) / u_{ik}$, де $u \in \{p, q\}$. Для підвищення точності реконструкції похідні векторів нормалі коректуються систематичними похибками.

У таблиці 1 наведені результати порівняння розроблених ІТ за критерієм усунення впливу артефактів: загороджених пікселів (ЗП), та зміни дифузного

коефіцієнту (ДК) на поверхні дефекту. До уваги прийнято зменшення трудоемності ІТ та зменшення розмірів пристрою фотозйомки, що має практичне значення. Як видно з табл. 1 запропоновані ІТ усувають вплив ЗП, а розроблена 3D реконструкція (п. 4) дозволяє підвищити швидкість реконструкції в порівнянні з іншими, але може бути уражена змінами ДК.

Таблиця 1 – Порівняльна оцінка розроблених ІТ.

N	ІТ 3D реконструкції	Недоліки	Переваги	Час роботи хвилини
1	ІТ реконструкції за тріадою зображень (три технологічно задані напрямки освітлення)		не залежить від ДК, усуває ЗП	7
2	ІТ 3D реконструкції за тріадою зображень (три довільні напрямки освітлення)		не залежить від ДК, усуває ЗП, зменшує трудомісткість ІТ і розміри пристрою фотозйомки	4
3	ІТ 3D реконструкції за парою зображень при двох технологічно заданих напрямках освітлення	при 3D пітинга ІТ блокується змінами ДК	не залежить від ДК при 3D реконструкції тріщини, усуває ЗП	5
4	ІТ 3D реконструкції за одним зображенням (при технологічно заданому напрямку освітлення).	ІТ блокується змінами ДК	усуває ЗП	3

В роботі була проведена порівняльна оцінка розроблених інформаційних технологій з існуючими на даний момент методами. Дослідження якості реконструкції презентованої ІТ здійснювалось на тестовому зображенні поверхні Bottle. У таблиці 2 наведені результати порівняння презентованої ІТ з відомими методами реконструкції, яке проведено за критерієм pmse.

Таблиця 2 – Порівняння представленої ІТ з відомими методами реконструкції.

Метод реконструкції	Похибки реконструкції	Метод реконструкції	Похибки реконструкції
Вудхем	0,1142	Гетзман Сейтз	0,0952
Тсаї	0,1057	Горн	0,0921
Галл	0,1012	Дамілідіс	0,0915
Зенг	0,0972	Презентована ІТ	0,0891
Кашел Вайс	0,0961		

Як видно з таблиці, запропонована реконструкція дозволила підвищити якість реконструкції в середньому на 11,5% в порівнянні з відомими методами.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу, пов'язану з розробленням методів, алгоритмів та створення на їх основі інформаційних технологій для зменшення впливу артефактів на реконструкцію форми і визначення глибини дефектів при їх використанні для моніторингу технічного стану металевих конструкцій, уражених корозією. Зокрема, отримано такі результати:

1. Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку методів тривимірної реконструкції показав, що основними недоліками існуючих підходів є наявність на зображеннях дефектів зон загороджених пікселів та зон зі змінним дифузним коефіцієнтом відбиття поверхні. Показано, що одним з напрямків вдосконалення таких систем є використання при реконструкції ламбертівської моделі відбиття.

2. Вперше розроблено метод тривимірної реконструкції дефекту на основі інформації про тріаду та затінене зображення поверхні, застосовуючи наперед задані вертикальний та два бокові напрямки освітлення з використанням ламбертівської моделі відбиття світла. На основі методу створено інформаційну технологію, яка усуває вплив артефактів на процес відтворення форми дефекту, а також дозволяє проводити завадостійку реконструкцію для довільно заданих напрямків освітлення поверхні.

3. Запропоновано новий метод визначення напрямку освітлення на основі інформації про зображення поверхні тріади площин з відомими векторами нормалі та затіненим зображенням поверхні з використанням ламбертівської моделі відбиття світла. Метод дає можливість здійснювати дистанційний оптичний моніторинг напрямків світла в запропонованих інформаційних технологіях. Проаналізовано точність кутових параметрів напрямку світла для запропонованого методу і оцінено абсолютну похибку розрахункової частини алгоритму визначення похідних вектора нормалі, яка становить $\pm 0,028$.

4. Базуючись на ламбертівській моделі відбиття світла удосконалили метод тривимірної реконструкції за двома зображеннями. На основі методу створено інформаційну технологію, яка усуває вплив загородження пікселів та зменшує вплив зміни дифузного коефіцієнта на процес відновлення форми і глибини дефекту в технічній діагностиці. Використовуючи пластину з тріщиною для штучно згенерованої пари зображень, проаналізували точність реконструкції з оцінкою відносної похибки розрахункової частини програми для визначення глибини тріщини, яка становить $\pm 0,5\%$.

5. Практично реалізовано нову двоетапну інформаційну технологію тривимірної реконструкції дефектів, зокрема тріщин та пітингів, за одним зображенням. Для корекції точності реконструкції використано згенероване на оптичній платформі ламбертівській моделі відбиття світла зображення дефекту. Експериментально перевірено роботоздатність запропонованої інформаційної технології для відтворення форми пітингів та оцінено її похибки.

6. Розроблені алгоритми та інформаційні технології реконструкції дефектів реалізовані у вигляді програмного забезпечення, яке прийнято для впровадження у філії БМФ “Укргазпромбуд”, АТ “Укртрансгаз” та Долинському ЛВ УМГ філії “Прикарпаттрансгаз” для неруйнівного контролю стану газопроводів, уражених корозійними пітингами та тріщинами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г., Лисак Ю.В. Дистанційне визначення напрямку світла в тривимірній реконструкції за тріадою зображень. *Наукові праці ДонНТУ Серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка"*. 2017. №1 (24). С. 36–44.
2. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г. Метод тривимірної реконструкції поверхні за тріадою зображень та оцінка його точності. *Вісник НУ Львівська політехніка "Інформаційні системи та мережі"*. 2017. №872. С. 49–61.
3. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г., Корній В.В. Оцінка точності тривимірної реконструкції зображень корозійного тріщиноподібного дефекту. *Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. випуск. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів*. 2016. №11. С. 297–300.
4. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г. Похибка тривимірної реконструкції поверхні за тріадою її зображень. *Радіоелектроніка і інформатика*. 2016. № 1. С. 39–46.
5. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г. Оцінка глибини тріщини за її стереозображенням на основі ламбертівської моделі відбиття. *Радіоелектроніка і інформатика*. 2015. №4. С. 46–53.
6. Rusyn B., Hrabovska N., Ivaniuk V., Lysak Y., Varetsky J. Information Technology of the Pitting Three-Dimensional Reconstruction by Halftone Images. *Mechanik*. 2015. № 3. P. 372–376.
7. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г., Капшій О.В. Похибка тривимірної реконструкції поверхні тріщини за тріадою зображень. *Радіоелектроніка та інформатика*. 2015. №2. С. 58–63.
8. Rusyn B., Hrabovska N., Ivaniuk V. Evaluation of Error Pitting Depth in Three – Dimensional Reconstruction. *Application of information technologies-theory and practice*. Poland. 2015. P. 197–204.
9. Rusyn, B.P., Anufriyeva N.P., Hrabovska N.R., Ivaniuk V.H. Nondestructive Testing of the State of Surfaces Damaged by Corrosion Piting. *Materials Science*. 2014. 49 (4). P. 516–524. (Scopus, WEB of Science).
10. Грабовська Н.Р., Лисак Ю.В. Похибка тривимірної реконструкції пітинга за його двовимірним зображенням. Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи. XXV Відкрита науково технічна конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, 27-29 вересня 2017 р., Львів. 2017. С. 197–200.
11. Грабовська Н.Р., Лисак Ю.В., Торська Р.В. Оцінка точності тривимірної реконструкції поверхні за тріадою її зображень. VIII Всеукраїнська науково-практична конференція "Інформатика та системні науки", 16-18 березня 2017 р., Полтава: праці конференції. Полтава, 2017. С. 60–62.
12. Грабовська Н.Р., Русин Б.П., Іванюк В.Г. Оцінка точності тривимірної реконструкції зображення корозійного пітинга. VIII Міжнародна науково-практична конференція "Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій", 21-23 вересня 2016 р., Запоріжжя: праці конференції. Запоріжжя, 2016. С. 210–214.

13. Грабовська Н.Р., Лисак Ю.В., Торська Р.В. Тривимірна реконструкція поверхні за тріадою її зображень. IV наук.-тех. конф. “Обчислювальні методи і системи перетворення інформації”, 28-30 вересня 2016 р., Львів: збірник тезисів. Львів, 2016. С. 197–200.

14. Грабовська Н.Р. Оцінка глибини тріщини за її зображенням Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи, XXIV Відкрита науково технічна конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, 20-22 жовтня 2015 р., Львів. 2015. С. 228–231.

АНОТАЦІЇ

Грабовська Н.Р. Інформаційні технології тривимірної реконструкції зображень поверхневих дефектів для ламбертівської моделі відбиття світла.
Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології. – Тернопільський національний економічний університет, Тернопіль, 2019.

Дисертація присвячена розробці та удосконаленню методів, алгоритмів і інформаційних технологій тривимірної реконструкції, яка базована на ламбертівській моделі відбиття світла. Удосконалення реконструкції відбувається шляхом підвищення автоматизації та зменшення впливу похибок і артефактів на процес реконструкції. Проаналізовано властивості ламбертівської моделі відбиття світла під впливом напрямку освітлення і дифузного коефіцієнту, що дало можливість отримати метод та алгоритм тривимірної реконструкції на основі тріади зображень який гарантує відсутність впливу загородження пікселів та змінності дифузного коефіцієнту на процес тривимірної реконструкції, та визначити його похибки. Для підвищення автоматизованості у складі методу запропоновано застосовувати метод оптичного моніторингу напрямку освітлення з інформації зображення тестового зразка, що має відомі вектори нормалі. Проаналізовані інформаційні технології тривимірної реконструкції при скороченні фотоінформації до двох та одного зображення.

Ключові слова: тривимірна реконструкція, похибки, артефакти, зображення.

Hrabovska N.R. Information technologies of three-dimensional reconstruction from images of surfaces defects are for the lambertian reflection model of the light.
Manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences after speciality of 05.13.06 – Information technologies. – Ternopil national economic universitet, Ternopol', 2019.

Dissertation is sanctified to development and improvement of methods, algorithms and information technologies of a three-dimensional reconstruction that is based on the lambertian reflection model of light. The improvement of reconstruction it takes place by the increase of automation and reduction to influence of errors and artefacts on the process of reconstruction.

Properties of lambertian reflection model of light are analysed under act of direction

of illumination and diffuse coefficient, that gave an opportunity to get a method and algorithm of three-dimensional reconstruction on the basis of triad of images that guarantees absence of influence of epy barrage pels and changeability of diffuse coefficient on the process of three-dimensional reconstruction, and to define his errors. For the increase of automation in composition the method it is suggested to apply the method of the optical monitoring of direction of illumination from information of image of test standard that has the known normal vectors Information technologies of three-dimensional reconstruction are analysed at reduction of video information to two and one image.

A new method and algorithm of three-dimensional reconstruction are offered after two images, that is based on the lambertian reflection model of light. The analysis of exactness of reconstruction is conducted, using a plate with a crack for artificially created pairs of images. The relative is appraised error of calculation part of algorithm of reconstruction of the crack depth.

New information technology of three-dimensional reconstruction of defects is offered, in particular cracks and pitting, after one image. For the correction of exactness to the reconstruction the generated is used on the optical platform of the lambertian reflection model of light of image of defect. The capacity of the offered information technology is experimentally tested for the reconstruction of pitting and her errors are appraised.

Key words: three-dimensional reconstruction, errors, artefacts, images.

Грабовська Н.Р. Інформаційні технології трохмерної реконструкції зображень поверхневих дефектів для ламбертовської моделі отраження світла. Рукопись.

Дисертація на отримання научної ступені кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології. – Тернопільський національний економічний університет, Тернопіль, 2019.

Дисертація присвячена розробці і удосконаленню методів, алгоритмів і інформаційних технологій трохмерної реконструкції, яка базирована на ламбертовській моделі отраження світла. Удосконалення реконструкції происходит путем підвищення автоматизації і зменшення впливу погрешностей і артефактів на процес реконструкції.

Проаналізовані свойства ламбертовської моделі отраження світла под воздействием напрямлення освітлення і диффузного коефіцієнта, що дало можливість отримати метод і алгоритм трохмерної реконструкції на основі триади зображень, який гарантує відсутність впливу заграждєння пікселів і змінчивості диффузного коефіцієнта на процес трохмерної реконструкції, і визначити його погрешности. Для підвищення автоматизації в складі методу предложєно применяти метод оптичного моніторингу напрямлення освітлення по інформації зображення тестового зразка, який має відомі вектори нормалі. Проаналізовані інформаційні технології трохмерної реконструкції при сокращєнні відеоінформації до двох і одного зображення.

Ключевые слова: трохмерная реконструкция, погрешности, артефакты, зображення.

Підписано до друку 18.03. 2019 р.
Формат 60x90/16. Гарнітура Times.
Папір офсетний. Друк на дублюванні.
Умов. друк. арк. 1,0. Обл.-вид. арк. 1,0.
Зам. № А016-19. Тираж 100 прим.

Видавець та виготовлювач

Тернопільський національний економічний університет
вул. Львівська, 11, м. Тернопіль, 46009

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців ДК № 3467 від 23.04.2009 р.*

Видавничо-поліграфічний центр «Економічна думка ТНЕУ»
вул. Бережанська, 2, м. Тернопіль, 46009

тел. (0352) 47-58-72

E-mail: edition@tneu.edu.ua