

О. М. Крюков, Г. В. Сілін

## НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ОБРОБЛЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ГЕОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛІВ СТВОЛІВ ВОГНЕПАЛЬНОЇ ЗБРОЇ

*Розглянуто підхід до технічного діагностування каналів стволів вогнепальної зброї на основі визначення їхніх геометричних характеристик, який базується на використанні методів і засобів лазерної тріангуляції. Описано форму та особливості подання вимірювальної інформації, що формується за результатами лазерного сканування каналу ствола.*

*Запропоновано метод оброблення вимірювальної інформації про геометричні характеристики каналів стволів вогнепальної зброї, який забезпечує автоматизоване визначення виду, розмірів і просторового розташування дефектів каналів стволів. Наведено деталізований опис ключових операцій методу та особливостей його застосування для випадків технічного діагностування гладких і нарізних каналів стволів.*

**Ключові слова:** канал ствола, технічне діагностування, технічний стан, дефект каналу ствола, геометричні характеристики, метод оброблення інформації.

**Постановка проблеми.** У сучасних високоточних зразках вогнепальної зброї, зокрема в артилерії іноземного виробництва, ствол є основним елементом, що піддається пошкодженню. Ресурс зразка озброєння значною мірою визначається ресурсом його ствола. Неякісне технічне обслуговування, підвищена інтенсивність стрільби та використання некондиційних боєприпасів можуть призводити до передчасного досягнення стволом граничного стану (до вичерпання його призначеного ресурсу). Цьому також може опосередковано сприяти неналежне ведення формулярів на окремі зразки озброєння. Процес деградації каналу ствола (КС) супроводжується зменшенням дульної швидкості снаряда [1], погіршенням купчастості стрільби, а в деяких випадках – навіть руйнуванням ствола. З метою запобігання таких випадків керівні документи й посібники з експлуатації (наприклад, [2] і [3]) передбачають категорювання і вибракування стволів на основі встановлення наявності, виду та розмірів дефектів незалежно від вичерпання ними призначеного ресурсу за часом або кількістю здійснених пострілів («настрілом»). Реалізація такого підходу висуває високі вимоги до достовірності контролю технічного стану КС та якості їхнього технічного діагностування (ТД)[4].

Серед відомих методів технічного діагностування КС значними перевагами відзначається метод на основі визначення геометричних характеристик КС [5]. Він заснований на використанні методу і комплексу засобів лазерної тріангуляції і забезпечує високу оперативність та інформативність, що робить його ефективнішим порівняно з традиційними методами ТД КС, які базуються на механічних і оптичних принципах вимірювання [6].

Використання лазерного тріангуляційного комплексу засобів передбачає два етапи процесу діагностування – сканування КС та подальше оброблення отриманих даних [5].

На першому етапі за допомогою лазерного тріангуляційного засобу вимірювання виконується сканування поверхні КС із наперед заданими поздовжнім (осьовим) і кутовим кроками та вимірювання її радіуса у визначених точках. Це дає змогу отримати масив значень радіусів КС, який подається або як опис самої поверхні КС у циліндричній системі координат, або як опис поверхні його розгортки в декартовій системі координат.

Другий етап передбачає автоматизоване оброблення отриманої на попередньому етапі вимірювальної інформації, за результатами якої формується висновок щодо виду, розмірів та розташування наявних на поверхні КС дефектів.

Попри наявність окремих теоретично обґрунтованих моделей і принципів оброблення вимірювальної інформації про геометричні характеристики КС вогнепальної зброї [7], на сьогодні немає комплексного рішення у вигляді методу, який може бути алгоритмізований та, як наслідок, дасть можливість автоматизовано визначати вид, розмір і розташування дефектів на поверхні КС на основі даних, отриманих за допомогою лазерного тріангуляційного засобу вимірювання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання опису та дослідження методів оброблення інформації про геометричні характеристики каналів стволів порушені у низці вітчизняних та зарубіжних праць.

Зокрема, у статтях [5] і [8] розглянуто загальні принципи вимірювання геометричних характеристик каналів стволів із використанням методу лазерної тріангуляції, описано конструкцію та оптичну схему лазерного тріангуляційного датчика, а також деякі особливості його інтеграції у вимірювальний комплекс. Однак процес оброблення вимірювальної інформації у цих публікаціях переважно зосереджений на розв'язанні задачі тривимірної реконструкції контурної структури КС та передбачає подальший візуальний аналіз тривимірних моделей поверхонь, тоді як питання кількісного аналізу геометричних параметрів КС не розглядається.

У працях [9]–[12] досліджено застосування моделей машинного навчання, а саме згорткових нейронних мереж у задачах ТД поверхонь, зокрема КС. Головну увагу автори зосередили на процесі класифікації дефектів на поверхнях, а питання визначення розмірів та локалізації дефектів не висвітлювалося. Сам підхід до застосування нейронних мереж у процесі ТД КС має низку обмежень: високу залежність від якості навчальної вибірки, орієнтацію переважно на двовимірний простір вхідних даних і значну чутливість до шумових точок. Отже, навіть сучасні архітектури згорткових нейронних мереж не забезпечують достатньої точності та адекватності під час аналізу дефектів у каналах стволів вогнепальної зброї.

Аналіз розглянутих публікацій показав, що в більшості з них немає або лише стисло наведено опис методів і підходів до оброблення вимірювальної інформації про геометричні характеристики КС, які були б здатні забезпечити автоматизовану ідентифікацію дефектів та визначення їхніх основних параметрів.

**Метою статті** є розроблення методу оброблення вимірювальної інформації про геометричні характеристики каналів стволів вогнепальної зброї, який дасть можливість автоматизовано визначити вид, розміри та розташування дефектів на їхній поверхні.

**Виклад основного матеріалу.** Сканування каналу ствола вогнепальної зброї з використанням лазерного тріангуляційного засобу вимірювання забезпечує отримання інформації про його геометричні характеристики у вигляді матриці радіусів. У запропонованому в статті методі оброблення вимірювальної інформації про геометричні характеристики КС (метод) використовуються дві такі матриці: матриця  $R_d$ , яка відображає реальний стан поверхні КС, що є об'єктом поточного технічного діагностування, і сформована під час його лазерного сканування, та матриця  $R_e$ , яка відображає еталонний стан поверхні КС такого типу й надається виробником ствола або формується за результатами сканування нового КС, що не перебував в експлуатації. Оброблення зазначених матриць на основі запропонованого методу дає змогу визначити наявність, просторове розташування, розміри та види дефектів на поверхні КС.

Перед застосуванням методу вся вхідна інформація у вигляді значень радіусів КС підлягає обов'язковому приведенню до єдиної системи одиниць вимірювання. Це зумовлено тим, що виробники конструктивних компонентів лазерних засобів вимірювання можуть задавати лінійні розміри у різних одиницях і форматах подання.

Для спрощення алгоритмізації методу кожному виду дефекту із попередньо визначеного переліку  $K$  дефектів, характерних для відповідного виду КС, завчасно присвоюється умовний номер. Для гладкого КС такий номер позначається як  $t_s$ , а для нарізного – як  $t_r$ . Нумерація типових дефектів КС, що надалі використовується у статті, наведена в табл. 1 та 2. Зазначимо, що динаміка стирання поля і прилеглих граней нарізів у казенній частині нарізного КС пов'язана з утворенням і динамікою прогресування іншого дефекту – збільшення об'єму зарядної камери. Тому в статті розглядається лише перший із зазначених дефектів, тоді як опис взаємозв'язку між ними виходить за межі цього дослідження.

Таблиця 1 – Види дефектів гладкого КС та відповідні їм номери

Номер виду дефекту, $t_s$	1	2	3	4
Вид дефекту	Діаметральний знос	Роздуття	Тріщина	Раковина

Таблиця 2 – Види дефектів нарізного КС та відповідні їм номери

Номер виду дефекту $t_r$	1	2	3	4	5
Вид дефекту	Стирання поля та прилеглих граней нарізів	Роздуття	Тріщина	Раковина	Викол поля нарізу

Послідовний набір операцій методу відрізняється для випадків технічного діагностування нарізних і гладких КС. Також передбачено окреме оброблення вимірювальної інформації для середньої, казенної та дульної частин КС, оскільки форма дефектів і критерії вибракування для цих ділянок відрізняються. Поверхні, що відображають розгортки зазначених частин КС, подаються у декартовій системі координат, у якій вісь  $X$  орієнтована паралельно повздовжній осі КС, вісь  $Y$  спрямована перпендикулярно до осі  $X$  у площині розгортки, а вісь  $Z$  є ортогональною до площини  $XOY$  і відповідає нормалі до будь-якої точки поверхні КС у вихідній (циліндричній) системі координат.

Відзначимо, що деякі групи операцій під час реалізації методу виконуються неодноразово. Тому для зручності до початку загального опису методу доцільно відокремити низку тих операцій, які забезпечують ідентифікацію виду дефекту, та об'єднати їх в одну загальну операцію  $ident(arg)$ , де як операнд  $arg$  виступає матриця радіусів  $R$ , що описує ділянку поверхні з реальним дефектом, вид якого необхідно встановити. Також у цій операції використовуються матриці  $Q_k$ , що інтерпретуються як ділянки поверхні, змодельовані для  $k$ -го виду дефекту з наявного набору  $K$  можливих видів. Матриці  $Q_k$  формуються за допомогою операції  $Z_k(arg)$ , де  $arg$  – математична модель  $k$ -го виду дефекту з попередньо визначеного списку  $K$  типових дефектів, та матриці  $R$  [7].

Операція ідентифікації  $ident$  виконується шляхом застосування заздалегідь визначених критеріїв до основного показника, який характеризує ступінь розбіжності між елементами матриці  $R$  та відповідних матриць  $Q_k$  [13]. Номер дефекту  $t_s$  або  $t_r$  (у заздалегідь визначеному їхньому переліку) визначається як  $k$  у тому випадку, коли значення основного показника під час порівняння  $Q_k$  та  $R$  задовольняє критерій належності до цього виду дефекту. Якщо кілька видів дефектів одночасно задовольняють критерій за основним показником, послідовно застосовуються додаткові показники та відповідні їм критерії. У такому випадку рішення приймається за першим додатковим показником, що демонструє відповідність встановленому критерію. Якщо ж значення першого додаткового показника не відповідає жодному критерію з визначеного переліку, здійснюється перехід до наступного додаткового показника. Порядок застосування додаткових показників та критеріїв до них, а також можливе встановлення вагових коефіцієнтів може визначатися за результатами дослідної експлуатації засобу діагностування виробником ствола (зразка зброї) або уповноваженою структурою експлуатанта зразка зброї. Отже, в результаті застосування операції  $ident$  отримується номер  $t_s$  ( $t_r$ ), що відповідає виду дефекту на поверхні, відтвореній на основі матриці  $R$ .

### 1. Особливості реалізації методу під час технічного діагностування гладких каналів стволів

1.1. Віднімання матриці  $R_e$  від матриці  $R_d$  виконується для визначення поелементних відхилень між результатами вимірювання радіуса нового (з номінальними значеннями параметрів) та зношеного каналів ствола. Результатом віднімання є матриця відхилень  $R_{dif}^*$ , кожен елемент якої відображає зміну радіуса у відповідній точці поверхні КС. Геометричний сенс цієї матриці полягає у відтворенні поверхні, що відображає зношені або частково зруйновані (із втратою певного об'єму матеріалу) під час експлуатації ділянки поверхні КС на його розгортці.

1.2. На цьому етапі стає можливим визначити діаметральний знос досліджуваної ділянки каналу ствола та віднести ствол до однієї з визначених категорій за технічним станом згідно з вимогами нормативної документації. При цьому критерії оцінювання технічного стану за цим дефектом ураховують не лише абсолютне значення діаметрального зносу, але й відносний розмір площі поверхні, на якій спостерігається діаметральний знос, що відповідає встановленим допустимим значенням для заданої категорії за технічним станом.

З цією метою за розмірами досліджуваної ділянки КС (ширина та довжина) і максимальною глибиною дефекту  $a_D$  (що в цьому випадку відповідає середньоарифметичному значенню, обчисленому для певної частки елементів матриці  $R_{dif}^*$  з найбільшими значеннями та на певній

частині ділянки, наприклад, для 30 % найбільших елементів на ділянці КС, що примикає до перехідного конуса) на основі математичної моделі діаметрального зносу  $M_1$  формують матрицю  $Q_1$  (індекси математичної моделі  $M_k$  та матриці  $Q_k$  відповідають порядковому номеру  $k$  для дефекту діаметрального зносу). Застосувавши запропонований у статті підхід до ідентифікації дефекту до матриць  $R_{dif}^*$  та  $Q_1$ , визначають, чи відповідає форма ділянки поверхні КС, яка описана матрицею  $R_{dif}^*$ , моделі діаметрального зносу для відповідної частини КС. Якщо висновок позитивний, значення  $a_D$  приймається як значення діаметрального зносу й використовується відповідно до інструкції з категорювання КС, також інформація про виявлення на ділянці КС діаметрального зносу та його геометричні параметри заноситься до підсумкової таблиці  $T$ , яка використовується для зберігання даних, необхідних для подальшого визначення технічного стану каналу ствола. Якщо висновок негативний – переходять до наступного етапу.

1.3. Для пошуку і виділення на досліджуваній поверхні КС інших (крім діаметрального зносу) дефектів необхідно позбутися впливу такого діаметрального зносу на результати подальших перетворень, розрахунків показників та застосування критеріїв. Цього можна досягти шляхом віднімання елементів  $Q_1$  від відповідних елементів  $R_{dif}^*$ . У результаті такого віднімання отримують матрицю  $R_{dif}^{**}$ .

1.4. Матриця  $R_{dif}^{**}$  підлягає додатковому обробленню за допомогою операції  $denoise(arg)$ , де як  $arg$  виступає сама матриця  $R_{dif}^{**}$ . Це пов'язано з можливою наявністю на поверхні незначних слідів корозії та подряпин. Для цього елементи  $R_{dif}^{**}$  (що фактично є аплікатами точок поверхні досліджуваної ділянки), які не перевищують за модулем заздалегідь встановленої границі  $\chi$ , прирівнюються до нуля. Значення  $\chi$  при цьому фактично виступає як поріг, у межах якого нехтують шорсткістю поверхні КС та іншими незначними випадковими викидами аплікат її точок. У результаті отримується матриця  $R_{dif}$ , яка являє собою у певному сенсі гладку поверхню з локальними дефектами (раковини, тріщини тощо), які виступають над умовною опорною (нульовою) площиною і яким відповідають ненульові елементи цієї матриці.

1.5. Для подальшого визначення розмірів, просторового розташування та виду дефектів на поверхні, поданій матрицею  $R_{dif}$ , точки, які належать окремим дефектам, об'єднуються у групи (кластери) за допомогою операції кластеризації  $clast(arg)$ . Операндом  $arg$  цієї операції є матриця  $R_{dif}$ . Класичним підходом до розв'язання зазначеної задачі є використання алгоритму DBSCAN, який визначає належність точок до окремих областей поверхні за умови їхнього розташування на малих евклідових відстанях одна від одної [14]. Такі ділянки інтерпретуються як локально заповнені області простору координат, що можуть відповідати окремим дефектам каналу ствола. Точки, які лежать у таких локально заповнених областях, вважаються ядровими. Алгоритм DBSCAN має два основні параметри: радіус окола  $\epsilon$  та мінімальну кількість точок  $min\_samples$ . Якщо в межах  $\epsilon$ -окола деякої точки міститься принаймні  $min\_samples$  точок, ця точка вважається ядровою. Ядрові точки, відстані між якими не перевищують значення  $\epsilon$ , алгоритм об'єднує в один і той самий кластер.

Робота алгоритму починається з вибору довільної точки. Для неї визначають усі точки, які розташовані на відстані, не більшій за  $\epsilon$ . Якщо таких точок менше, ніж  $min\_samples$ , поточна точка позначається як шум, тобто як елемент, що не належить жодному кластеру і може відповідати ізольованому або випадковому відхиленню. Якщо ж кількість сусідніх точок перевищує значення  $min\_samples$ , вибрана точка оголошується ядровою та отримує мітку нового кластера. Далі послідовно розглядаються усі її сусіди: якщо вони ще не належать жодному іншому кластеру – їх відносять до поточного; якщо вони також є ядровими, алгоритм рекурсивно розширює кластер, перевіряючи їхні околиці. Розширення кластера триває доти, доки в межах  $\epsilon$ -окола не залишаться необроблених ядрових точок. Після цього алгоритм переходить до наступної, ще не розглянутої, точки та повторює процедуру, доки всі точки поверхні, які мають ненульові значення у матриці  $R_{dif}$ , не будуть опрацьовані [15].

Після завершення операції кластеризації для кожного виявленого локального дефекту формується окремий масив координат, який містить точки, що належать лише одному дефекту. Далі метод передбачає індивідуальне оброблення кожного такого дефекту, який подано у вигляді матриці  $R_u$  (де

індекс  $u$  відповідає порядковому номеру матриці із загальної кількості  $U$  матриць, отриманих під час кластеризації), повністю сумісної за розмірністю з матрицею  $R_{dif}$ . У цій матриці ненульові значення мають лише ті елементи, що відповідають координатам точок конкретного дефекту: індекси стовпців та рядків матриці задають координати  $x$  та  $y$  точки, а значення відповідного елемента – координату  $z$ , тобто глибину локального ушкодження. Такий підхід еквівалентний тому, що основа кожного дефекту розгортається на плоску поверхню розміром зі скановану ділянку каналу ствола, що дає змогу виконувати подальший аналіз.

1.6. На цьому етапі вводиться операція  $params(arg)$ , яка визначає геометричні характеристики кожного дефекту, поданого матрицею  $R_u$ , де  $R_u$  і є операндом  $arg$  цієї операції. Зокрема, обчислюється максимальна глибина дефекту  $a_D$  як екстремальне значення ненульових елементів матриці. Далі визначаються довжина основи  $L$  та ширина основи  $W$ , що відповідають розмірам мінімального описуючого прямокутника, який охоплює усі точки основи дефекту. Також розраховується кут повороту основи  $\alpha$ , який характеризує орієнтацію повздовжньої осі дефекту відносно осі абсцис від  $0$  до  $\pi$ . Крім того, встановлюється зміщення центру основи відносно осей абсцис і ординат –  $x_\Delta$  та  $y_\Delta$ .

1.7. За визначеними на попередньому етапі геометричними характеристиками та з використанням описаного в статті механізму ідентифікації встановлюється вид дефекту, поданого матрицею  $R_u$ .

1.8. Отримана інформація щодо розташування, геометричних розмірів та встановленого виду дефекту вноситься до підсумкової таблиці  $T$ .

1.9. У разі, якщо на етапі 1.7 на поверхні, поданій матрицею  $R_u$ , ідентифіковано дефект типу роздуття, після занесення відповідних даних до таблиці  $T$  здійснюється компенсація цього дефекту. Компенсація виконується шляхом віднімання матриці  $Q_2$ , що моделює роздуття відповідно до його математичної моделі, від матриці  $R_u$ . Отримана в результаті нова матриця  $R_{u-dif}$  відображає поверхню з дефектами, які можуть формуватися у зоні роздуття. Надалі  $R_{u-dif}$  підлягає повторному обробленню згідно з етапами 1.5–1.8.

Блок-схему, що відображає принцип застосування методу під час технічного діагностування гладких каналів стволів, наведено на рис. 1.

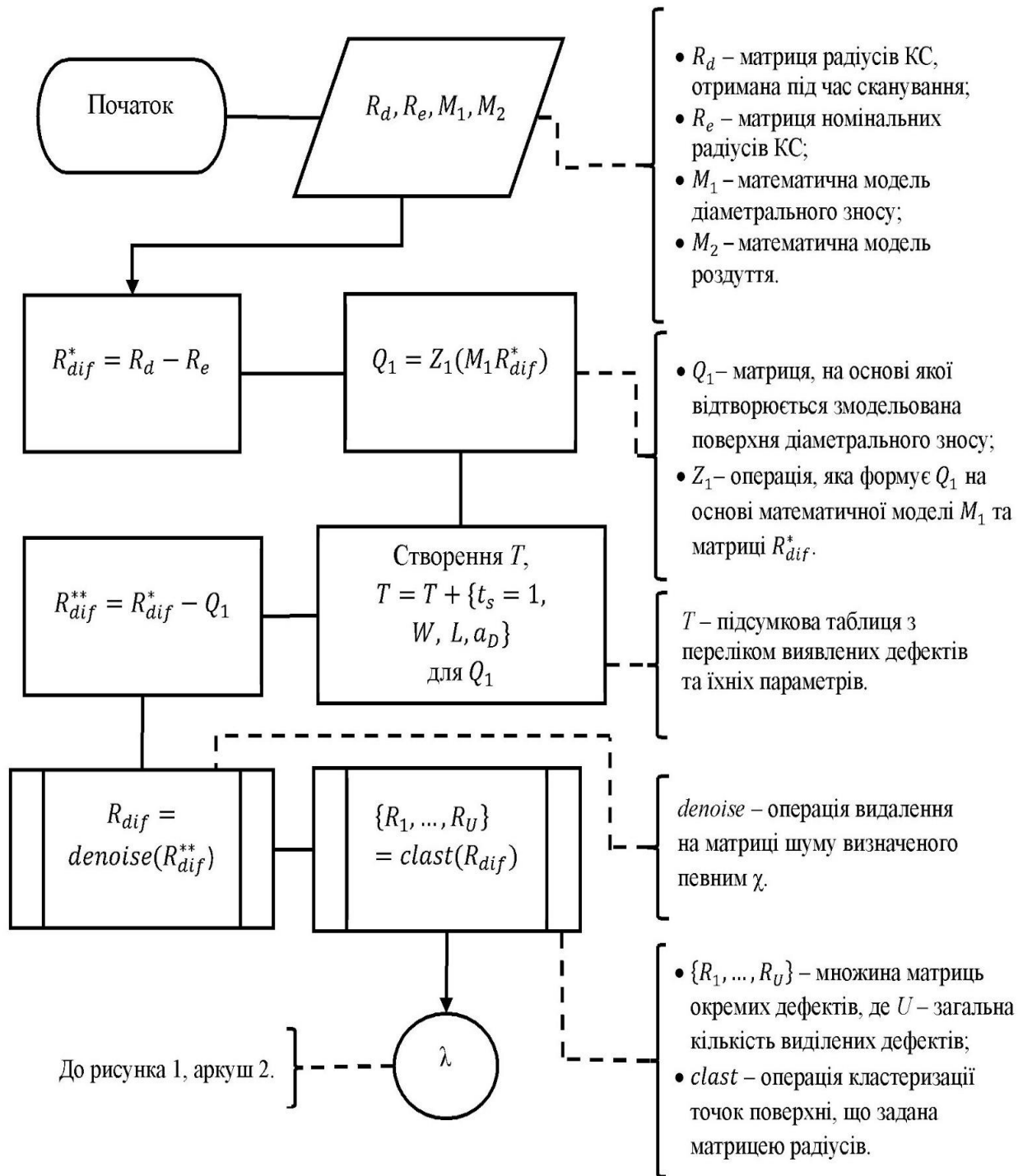


Рисунок 1 – Блок-схема, що відображає принцип застосування методу під час технічного діагностування гладких каналів стволів

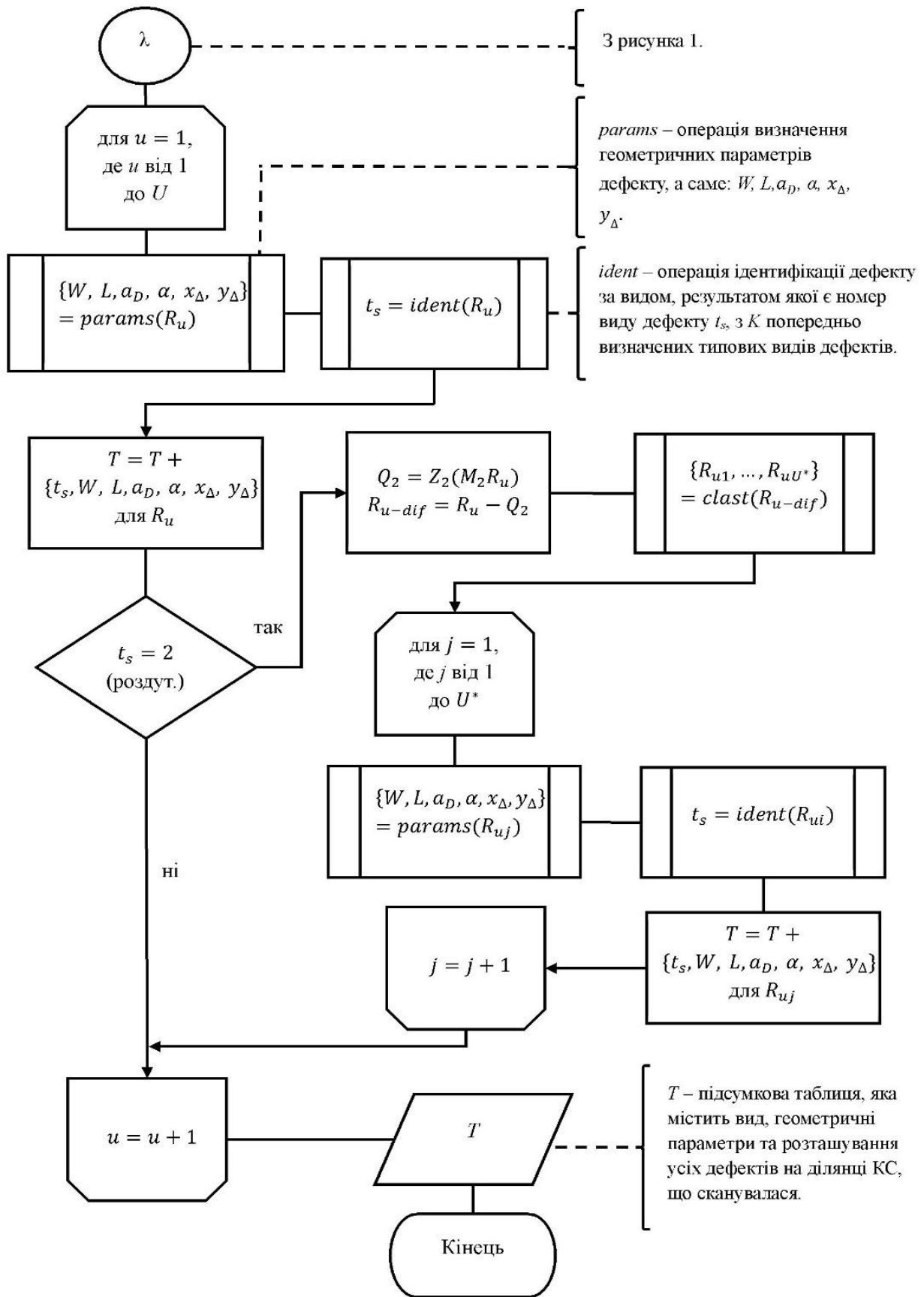


Рисунок 1, аркуш 2

## 2. Особливості реалізації методу під час технічного діагностування нарізних каналів стволів

2.1. Перший етап методу під час реалізації ТД нарізного КС аналогічний до першого етапу, що застосовується під час ТД гладкого КС, та передбачає формування матриці відхилень  $R_{dif}^*$  шляхом віднімання матриці радіусів нового КС  $R_e$  від матриці радіусів досліджуваного КС  $R_d$ .

2.2. Отримана матриця  $R_{dif}^*$  підлягає додатковому обробленню за допомогою операції *denoise* (див. п. 1.4), яка передбачає приведення до нульового значення тих елементів матриці, що інтерпретуються як незначні за глибиною дефекту (подряпини, незначні сліди корозії тощо). У результаті формується матриця  $R_{dif}^{**}$ .

2.3. Ділянка КС, описана матрицею  $R_{dif}^{**}$ , досліджується на наявність стирання поля та прилеглих граней нарізів. Зазначений дефект проявляється у вигляді смуг, нахилених до осі  $X$  під кутом, що відповідає куту нарізки. За наявності таких смуг визначаються координати  $x$ ,  $y$ ,  $z$  точок їхнього початку та кінця. На їхній основі визначається ступінь стирання поля та формується, згідно з математичною моделлю стирання поля та прилеглих граней нарізів, матриця  $Q_1$ . Якщо таких смуг немає, то відбувається перехід до етапу 2.5 цієї послідовності операцій.

2.4. Для виокремлення на  $R_{dif}^{**}$  інших дефектів (крім стирання поля і прилеглих граней нарізів) необхідно усунути вплив цього виду стирання на результати подальших перетворень, розрахунків показників та застосування критеріїв. З цією метою від відповідних елементів матриці  $R_{dif}^{**}$  віднімаються елементи матриці  $Q_1$ , унаслідок чого формується матриця  $R_{dif}^{***}$ . Далі до отриманої матриці  $R_{dif}^{***}$  застосовується операція *denoise* і, як результат, отримується матриця  $R_{dif}$ .

2.5. Шляхом застосування операції кластеризації *clast* (див. п. 1.5) точки на поверхні, поданій матрицею  $R_{dif}$  (або  $R_{dif}^{**}$  у випадку переходу з етапу 2.3 на етап 2.5), виокремлюються у кластери, що відповідають окремим дефектам. У результаті формуються матриці  $R_u$ , кожна з яких описує один дефект, поверхня якого виступає над умовною опорною площиною  $XOY$ . Отримані матриці  $R_u$  надалі опрацьовуються індивідуально аналогічно до пп. 1.6–1.9.

Блок-схему, що відображає принцип застосування методу під час технічного діагностування нарізних каналів стволів, наведено на рис. 2.

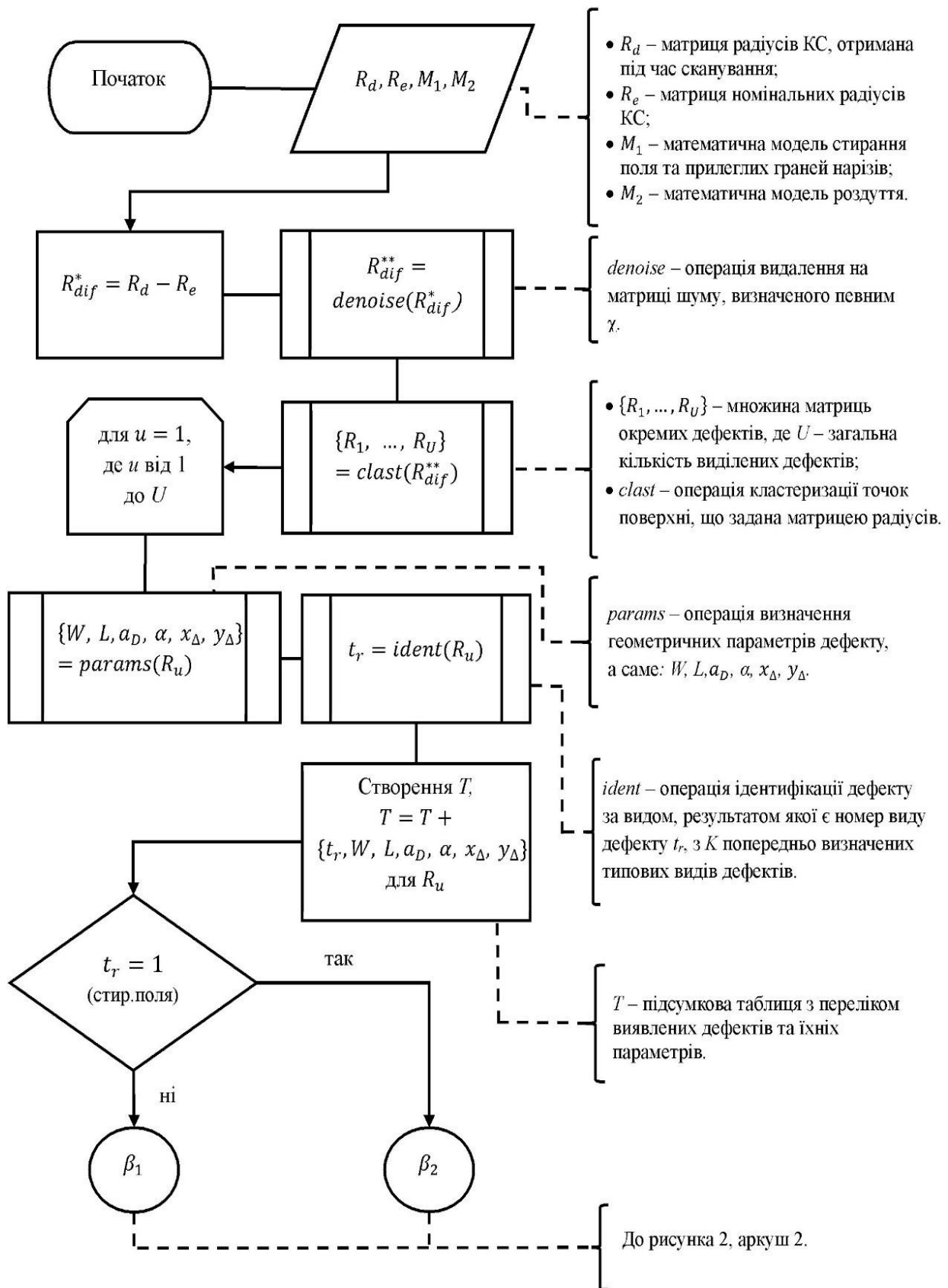


Рисунок 2 – Блок-схема, що відображає принцип застосування методу під час технічного діагностування нарізних каналів стволів

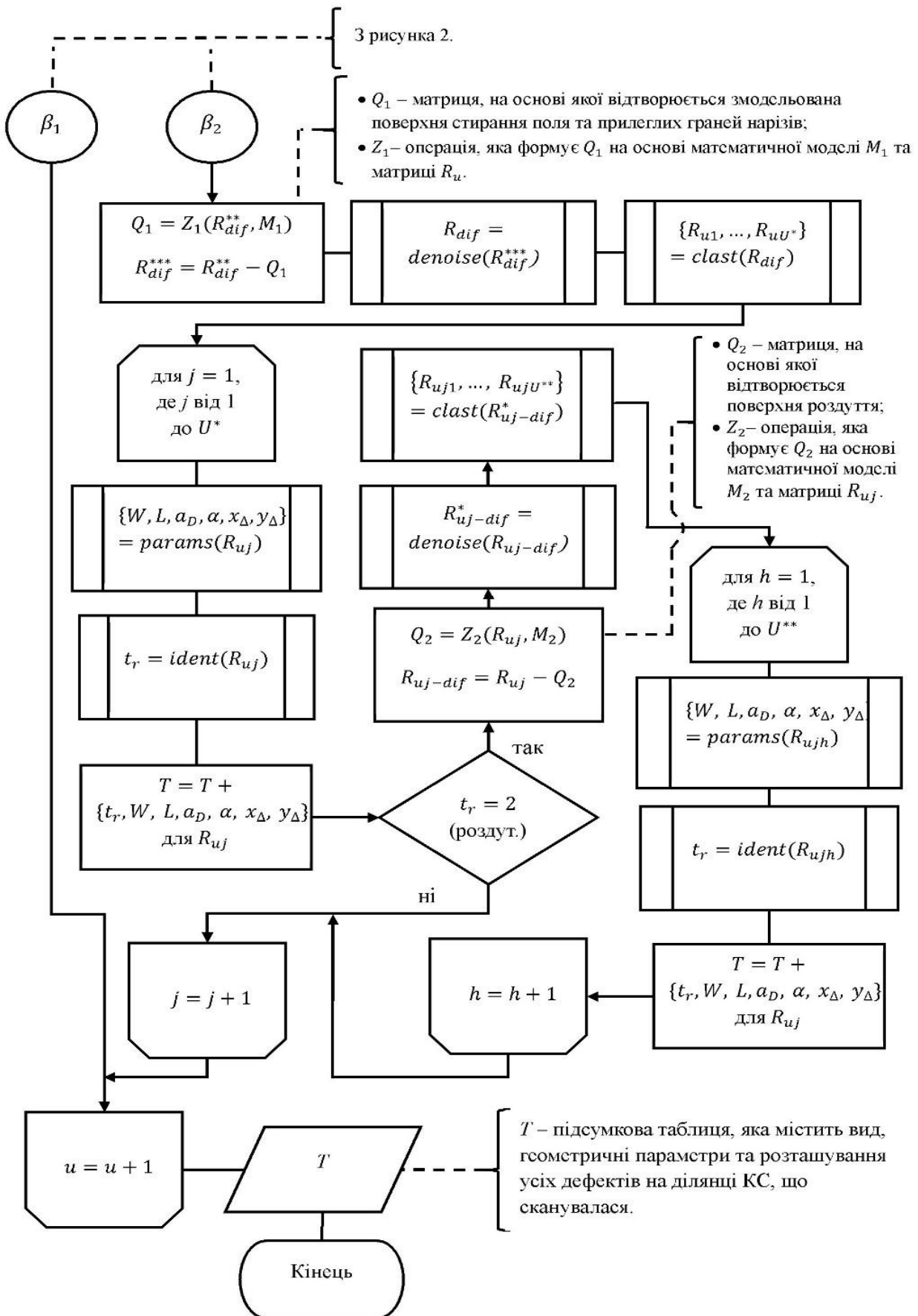


Рисунок 2, аркуш 2

Отже, у результаті застосування описаних операцій методу, призначених для технічного діагностування гладких і нарізних каналів стволів, отримується підсумкова таблиця  $T$ , що містить інформацію про вид, розміри та розташування усіх дефектів на поверхні досліджуваного КС. Дані з цієї таблиці надалі використовуються під час розрахунків показників для категорювання стволів відповідно до критеріїв, викладених у чинних інструкціях або інших керівних документах, що регламентують порядок оцінювання технічного стану стволів визначеного зразка озброєння. Крім того, отримана інформація може слугувати вихідними даними для прогнозування залишкового ресурсу КС і дослідження впливу на нього умов заряджання та режимів ведення вогню.

## Висновки

Висвітлений у статті метод оброблення вимірювальної інформації про геометричні характеристики каналів стволів вогнепальної зброї забезпечує автоматизоване виділення на поверхні каналу ствола дефектів, ідентифікацію їхнього виду, а також визначення їх розташування і розмірів.

Ідентифікація виду дефекту досягається шляхом застосуванням критеріїв до показника, який характеризує ступінь розбіжності між геометричними характеристиками ділянки каналу ствола, що містить реальний дефект, і відповідними характеристиками моделі дефекту певного виду, яка являє собою поверхню, побудовану на основі його математичної моделі.

Для визначення розташування та розмірів (геометричних параметрів) дефектів матриця радіусів каналу ствола, яка розглядається як масив координат точок його поверхні, підлягає попередньому очищенню від шумових точок і подальшій кластеризації точок, що залишилися. При цьому формуються кластери точок, які відповідають окремим дефектам. Подальше використання методів векторного числення для цих кластерів дає змогу визначити геометричні параметри та просторове розташування відповідних дефектів.

Під час реалізації розглянутого методу при технічному діагностуванні гладких і нарізних каналів стволів виникають суттєві особливості, що зумовлюються розбіжностями математичного опису проявів діаметрального зносу циліндричних поверхонь та стирання елементів (граней і полів) нарізів складної форми.

З урахуванням зазначених особливостей у праці висвітлено перелік, послідовність виконання та детальний зміст операцій, які забезпечують необхідні перетворення матриць, ідентифікацію виду дефекту, видалення шумових і кластеризацію значущих точок поверхонь, визначення геометричних характеристик (розмірів і розташування) кожного дефекту, та які зрештою в сукупності становлять суть запропонованого методу оброблення вимірювальної інформації, що пропонує комплексний підхід до автоматизованого опрацювання вимірювальної інформації.

Практична цінність розробленого методу визначається його придатністю до алгоритмізації та програмної реалізації у складі автоматизованих систем технічного діагностування, що дасть змогу суттєво підвищити оперативність їхнього застосування.

Подальші наукові дослідження доцільно спрямувати на експериментальну апробацію запропонованого методу з метою оцінювання ефективності його застосування на реальних зразках каналів стволів вогнепальної зброї з різними видами та ступенями прояву дефектів.

## Перелік джерел посилання

1. Крюков О. М., Александров О. А. Математична модель датчика для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї. *Системи озброєння і військова техніка*. 2010. № 4 (24). С. 71–74.

2. Про затвердження Інструкції з категорювання ракетно-артилерійського озброєння : наказ МО України від 04.01.2019 р. № 4. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0004322-19#Text> (дата звернення: 02.11.2025).

3. TM 9-1000-202-14. Evaluation of cannon tubes: technical manual. – Washington, DC : Headquarters, Department of the Army, 1999. 164 p. URL: <https://www.scribd.com/document/831116187/Tm9100020214-Evaluation-of-Canon-Tubes> (дата звернення: 21.12.2025).

4. Крюков О. М., Флорін О. П. Основи метрологічного забезпечення : навч. посіб. Харків : ХНАДУ, 2010. 208 с.

5. Крюков О. М., Мігура О. О. Метод технічного діагностування каналів стволів вогнепальної зброї на основі визначення їх геометричних характеристик. *Честь і закон*. 2023. № 3 (86). С. 101–109. DOI: <https://doi.org/10.33405/2078-7480/2023/3/86/287124>.

6. Крюков О. М., Сілін Г. В., Мігура О. О. Оцінювання ефективності засобів технічного діагностування каналів стволів вогнепальної зброї. *Честь і закон*. 2025. № 1 (92). С. 79–91. DOI: <http://dx.doi.org/10.33405/2078-7480/2025/1/92/332043>.
7. Крюков О. М., Сілін Г. В. Дослідження та математичне моделювання дефектів каналів стволів: діаметральний знос, стирання поля і граней нарізів, викол поля. *Честь і закон*. 2025. № 2 (93). С. 85–96. DOI: [10.33405/2078-7480/2025/2/93/339372](https://doi.org/10.33405/2078-7480/2025/2/93/339372).
8. Zhang P., Jin W., Ren D., Lyu Y. Measurement and reconstruction of geometric parameters of the barrel bore based on the laser scanning strategy. *Frontiers in Physics*. 2023. Vol. 10 (2022). № 1115544. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.1115544>.
9. Chen C., Lee H., Chen M. Steel surface defect detection method based on improved YOLOv9. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. № 25098. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10647-1>.
10. Shanmugamani R., Sadique M., Ramamoorthy B. Detection and classification of surface defects of gun barrels using computer vision and machine learning. *Measurement*. 2015. Vol. 60. № 1. P. 222–230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.10.009>.
11. Tang Y., Wang H., Zhou Q., Sun B. A method for surface defect detection based on multiscale feature fusion and pyramid attention. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. № 1. P. 36457–36465. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3374131>.
12. Pang G., Shen C., Cao L., van den Hengel A. Deep learning for anomaly detection: A review. *ACM Computing Surveys*. 2022. Vol. 54. № 1. P. 1–38. DOI: <https://doi.org/10.1145/3439950>.
13. Крюков О. М., Сілін Г. В. Обґрунтування та дослідження комплексу показників для ідентифікації видів дефектів каналів стволів вогнепальної зброї. *Випробування та сертифікація*. 2025. № 4 (10). С. 100–109. DOI: <https://doi.org/10.37701/ts.10.2025.11>.
14. Ester M., Kriegel H., Sander J., Xiaowei X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery in Databases and Data Mining*. Portland, OR : AAAI Press, 1996. P. 226–231.
15. Müller A., Guido S. Introduction to Machine Learning with Python: A Guide for Data Scientists. Sebastopol, CA : O'Reilly Media, 2016. 392 p.

*Стаття надійшла до редакції 22.12.2025 р.  
Прийнято до друку після рецензування 20.01.2026 р.  
Дата публікації 29.05.2026 р.*

**UDC 623.[482+4]**

**O. Kriukov, H. Silin**

### **SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF PROCESSING MEASUREMENT INFORMATION ON THE GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF FIREARM BARREL BORES**

*The features of technical diagnosis of firearm barrel bores based on determining their geometric characteristics using a laser triangulation measuring device are examined. An analysis of scientific publications describing this approach to technical diagnosis of barrel bores has been conducted. It has been established that, despite the considerable number of studies in this field, the issue of processing measurement data on the geometric characteristics of barrel bores remains insufficiently explored. Therefore, the purpose of this article is to develop and substantiate a method for processing measurement data on the geometric characteristics of firearm barrel bores.*

*The method proposed in the article provides for the processing of measurement data on the geometric characteristics of barrel bores, represented as radius matrices, and enables automated determination of the type, dimensions, and spatial location of defects on the unwrapped surface of the barrel bore. In particular, the method includes the following operations for processing the scanned (examined) surface represented by a radius matrix: comparison with a reference barrel bore surface; removal of noise points; extraction of defects through point clustering; determination of defect geometric parameters using vector calculus methods; and identification of the defect type, performed by applying criteria to an indicator that characterizes the degree of discrepancy between the geometric characteristics of the barrel bore section with an actual defect and the corresponding characteristics of a defect model of a certain type constructed on the basis of its mathematical model.*

*Implementation of the method in the technical diagnosis of smooth and rifled barrel bores takes into account the specific manifestations and shapes of defects inherent to each of these barrel bore types.*

*The practical value of the proposed method lies in its algorithmic nature and suitability for integration into automated technical diagnosis systems, ensuring the determination of the type, dimensions, and spatial location of defects on the unwrapped surface of the barrel bore.*

**Keywords:** *barrel bore, technical diagnosis, technical state, barrel bore defect, geometric characteristics, information processing method.*

**Крюков Олександр Михайлович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління логістикою, Національна академія Національної гвардії України  
<https://orcid.org/0000-0003-4194-6081>

**Сілін Григорій Вікторович** – ад'юнкт, Національна академія Національної гвардії України  
<https://orcid.org/0009-0008-2059-3962>