

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-48>

УДК 006.91:681.2:004.9

ПРОСКУРЕНКО Денис

Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-0673-5708>

pdm-vp-pbf21@iit.kpi.ua

БЕЗУГЛИЙ Михайло

Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0003-0624-0585>

m.bezuglyi@kpi.ua

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КАЛІБРУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ

У статті розглянуто програмну реалізацію автоматизованої системи калібрування горизонтальних сталевих резервуарів на основі даних лазерного 3D-сканування. Система забезпечує повний цикл обробки вимірювальної інформації — від імпорту хмари точок до автоматичного формування поміліметрових градувальних таблиць та звітної документації. Описано архітектуру програмного забезпечення, основні програмні модулі та використані інструменти реалізації. Розрахункові алгоритми побудовані відповідно до вимог ДСТУ 7475:2016 з їх адаптацією та удосконаленням для застосування тривимірних хмар точок. Для виділення конструктивних елементів резервуара використано комбінований підхід до сегментації, що поєднує метод RANSAC і кластеризацію DBSCAN. Особливу увагу приділено опису графічного інтерфейсу користувача, логіці взаємодії з системою та автоматизації процесу калібрування. Представлено можливості автоматичного формування градувальних таблиць у форматі Excel та звітів у форматі Word відповідно до нормативних вимог. Запропонована програмна реалізація може бути використана в практиці промислової метрології для підвищення рівня автоматизації та відтворюваності результатів калібрування резервуарів.

Ключові слова: автоматизація, калібрування, резервуар, 3D-аналіз, хмара точок, автоматизована система, вимірювання, система управління, комп'ютерно-інтегровані технології.

PROSKURENKO Denis, BEZUGLY Mykhailo

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF AN AUTOMATED CALIBRATION SYSTEM

The paper presents the software implementation of an automated calibration system for horizontal steel tanks based on laser 3D scanning data and a geometric calibration method. Accurate calibration of storage tanks is a critical task in industrial metrology, as it directly affects the reliability of commercial accounting of liquids and compliance with regulatory requirements. Traditional geometric calibration methods are often limited by simplified models and local linear measurements, which do not fully reflect real geometric deviations, deformations, or manufacturing tolerances of tanks in operation.

The proposed system provides a complete automated workflow for processing measurement data, starting from the import of three-dimensional point clouds and ending with the generation of sub-millimeter calibration tables and standardized reporting documentation. The software architecture is designed using a modular approach, ensuring scalability, flexibility, and ease of maintenance. The system is implemented in Python and integrates open-source scientific and engineering libraries for numerical computation, 3D data processing, and document generation.

Special attention is paid to the development of calculation algorithms that comply with the requirements of DSTU 7475:2016, with adaptations for the use of dense three-dimensional point clouds. A combined segmentation approach is applied to identify the structural elements of the tank, including the cylindrical body and end caps. This approach combines the RANSAC method for surface fitting with DBSCAN clustering, enabling robust segmentation even in the presence of noise, uneven point density, and local geometric distortions.

The system automatically determines the geometric parameters of the tank and calculates its volume for each filling level with a resolution of 1 mm. The results are presented in the form of calibration tables generated in Microsoft Excel format and comprehensive calibration reports created in Microsoft Word format, fully compliant with metrological standards. A graphical user interface based on PyQt5 ensures intuitive interaction with the system and minimizes the influence of human error.

The developed software solution enhances the level of automation, accuracy, and reproducibility of tank calibration procedures and can be effectively applied in industrial metrology practice for the calibration of horizontal steel tanks using modern 3D measurement technologies.

Keywords: automation, calibration, tank, 3D analysis, point cloud, automated system, measurement, control system, computer-integrated technologies.

Стаття надійшла до редакції / Received 30.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 01.12.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Калібрування сталевих резервуарів є однією з базових метрологічних процедур у системах зберігання та обліку рідин, зокрема нафтопродуктів, хімічних речовин і технічних рідин. Від точності калібрування безпосередньо залежить достовірність комерційного обліку, результати інвентаризації та відповідність вимогам нормативних документів. Міжнародні стандарти, зокрема серія ISO 7507, регламентують

геометричні методи калібрування резервуарів та допускають застосування сучасних засобів вимірювань за умови забезпечення необхідної точності та відтворюваності результатів [1].

Застарілі геометричні методи калібрування горизонтальних резервуарів ґрунтуються на спрощених геометричних моделях та результатах локальних лінійних вимірювань, що не завжди дозволяє врахувати реальні відхилення форми, деформації стінок і особливості виготовлення або експлуатації ємностей. У зв'язку з цим в останні роки все більшого поширення набуває лазерне 3D-сканування, яке дозволяє отримувати повну просторову інформацію про геометрію об'єкта у вигляді хмари точок високої щільності [2]. Використання таких даних створює передумови для підвищення точності об'ємних розрахунків і розширення діапазону калібрувальних рівнів.

Разом з тим, практичне застосування 3D-сканування для калібрування резервуарів супроводжується значними обчислювальними труднощами. Хмари точок можуть містити мільйони вимірювальних даних, мати нерівномірну щільність, шум та надлишкову інформацію, що унеможливує їх ручну обробку. Тому ключовим елементом сучасних підходів до калібрування резервуарів є спеціалізоване програмне забезпечення, яке забезпечує автоматизовану обробку 3D-даних, виконання геометричних розрахунків та формування градувальних таблиць [2].

На сьогодні існують універсальні програмні засоби для обробки та візуалізації хмар точок, наприклад CloudCompare, які широко застосовуються для загального аналізу 3D-даних у геодезії та промислових вимірюваннях [3]. Однак такі програмні продукти не орієнтовані безпосередньо на задачі калібрування резервуарів і, як правило, не забезпечують автоматичного формування градувальних таблиць та звітної документації відповідно до метрологічних вимог. Це зумовлює необхідність розробки спеціалізованих програмних систем, які інтегрують обробку 3D-хмар, геометричні розрахунки та підготовку результатів у стандартизованих форматах.

У даній роботі представлено програмну реалізацію автоматизованої системи калібрування, що базується на використанні даних 3D-сканування та геометричного методу. Система реалізована мовою програмування Python [4] з графічним інтерфейсом користувача на основі PyQt5 [5] та із застосуванням відкритих математичних і інженерних бібліотек. Програмне забезпечення забезпечує повний цикл автоматизованої обробки вимірювальних даних — від завантаження хмари точок до формування градувальних таблиць у форматі Excel та звітної документації у форматі Word, що робить його придатним для практичного використання в умовах промислової метрології.

Вимоги до автоматизованої системи калібрування

Автоматизована система калібрування резервуарів, що базується на використанні даних 3D-сканування, повинна забезпечувати повний цикл обробки вимірювальної інформації — від імпорту вихідних даних до формування кінцевих результатів у вигляді градувальних таблиць і звітної документації. Формування вимог до такої системи є ключовим етапом її проєктування, оскільки саме вони визначають функціональні можливості програмного забезпечення, рівень автоматизації та придатність до практичного застосування в умовах промислової метрології.

До основних функціональних вимог автоматизованої системи калібрування належать:

- підтримка імпорту даних 3D-сканування у вигляді хмар точок формату *.xyz;
- попередня обробка вимірювальних даних, зокрема фільтрація шуму, нормалізація координат і підготовка даних до подальших геометричних розрахунків;
- автоматизований розрахунок геометричних параметрів резервуара на основі просторових даних;
- обчислення об'єму резервуара залежно від рівня наповнення з можливістю формування поміліметрової градувальної таблиці;
- збереження результатів калібрування у форматах електронних таблиць та текстових звітів.

Автоматизована система повинна забезпечувати точність обчислень, яка відповідає вимогам нормативних документів [3] щодо калібрування резервуарів. При цьому програмне забезпечення має коректно працювати з великими обсягами вимірювальних даних, що можуть налічувати мільйони точок, без втрати числової стабільності алгоритмів [6].

Особлива увага приділяється стійкості результатів до впливу похибок вимірювань, таких як шум хмари точок або нерівномірність її щільності. Система повинна забезпечувати надійну роботу за різних умов зйомки та геометричних особливостей резервуарів, що перебувають в експлуатації.

З огляду на практичне застосування, автоматизована система калібрування повинна мати інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс користувача, який дозволяє виконувати всі етапи обробки даних без необхідності спеціальної підготовки [6].

З точки зору програмної реалізації, система повинна бути побудована на основі модульної архітектури, що забезпечує можливість розширення та модифікації окремих компонентів без зміни всієї системи в цілому. Використання мови програмування високого рівня та відкритих бібліотек обробки даних сприяє підвищенню надійності програмного забезпечення та його адаптації до різних умов експлуатації.

Крім того, система повинна забезпечувати сумісність з поширеними операційними системами та можливість інтеграції з іншими програмними засобами, які застосовуються в метрологічній практиці.

Результати роботи автоматизованої системи калібрування мають бути представлені у вигляді, зручному для практичного використання та архівування. Зокрема, система повинна автоматично формувати градувальні таблиці у форматі електронних таблиць та звітні документи у текстовому форматі, що відповідають вимогам до оформлення результатів калібрування[3].

Таким чином, сформульовані вимоги визначають основні принципи побудови автоматизованої системи калібрування та слугують основою для подальшого опису її архітектури та програмної реалізації.

Архітектура програмної реалізації

Архітектура програмної реалізації автоматизованої системи калібрування побудована за модульним принципом, що забезпечує розширюваність, адаптивність і зручність підтримки. Такий підхід відповідає загальним принципам проєктування програмних систем, де компоненти поділені за відповідальністю та взаємодіють через чітко визначені інтерфейси, що сприяє масштабованості і модифікації в майбутньому.

Система складається з кількох основних логічних блоків:

- Імпорт та обробка вхідних даних — модуль відповідає за зчитування хмар точок у форматі *.xyz, їх первинну фільтрацію та підготовку до обчислень.
- Математичний та розрахунковий модуль — реалізує обчислення геометричних параметрів резервуара та об'ємних характеристик, що необхідні для побудови градувальної таблиці.
- Інтерфейс користувача — графічна оболонка на базі PyQt5, що забезпечує зручну взаємодію користувача з системою, налаштування параметрів обробки і перегляд результатів.
- Модуль формування вихідних документів — відповідає за експорт результатів у формати Excel та Word, забезпечуючи повний комплект звітності для метрологічних процедур.
- Архітектура передбачає чітке розділення обов'язків між компонентами, що полегшує тестування та підтримку, а також дозволяє за необхідності переносити окремі частини в окремі служби чи інтегрувати сторонні модулі без зміни основної логіки. Вибір мови програмування Python і використання відкритих бібліотек розширює можливості адаптації архітектури до різних платформ та сценаріїв використання.

Використані інструменти та програмні бібліотеки

Програмна реалізація автоматизованої системи калібрування виконана з використанням мови програмування Python, що зумовлено її широким застосуванням у наукових дослідженнях, наявністю розвинутої екосистеми математичних та інженерних бібліотек, а також можливістю швидкої розробки прикладних програмних рішень.

Для реалізації графічного інтерфейсу користувача використано бібліотеку PyQt5, яка забезпечує створення кросплатформних настільних застосунків із розвиненими можливостями взаємодії з користувачем та підтримкою подієво-орієнтованої архітектури. Графічний інтерфейс дозволяє виконувати всі етапи обробки даних — від завантаження хмари точок до збереження результатів калібрування.

Математичні обчислення та робота з масивами числових даних реалізовані із застосуванням бібліотеки NumPy [7], яка є базовим інструментом для високопродуктивних числових обчислень у Python. Для виконання наукових та інженерних розрахунків, зокрема чисельних методів і оптимізаційних процедур, використано бібліотеку SciPy [8], що доповнює функціональні можливості NumPy.

Обробка та аналіз тривимірних хмар точок виконуються із застосуванням бібліотеки Open3D [9], яка надає інструменти для роботи з великими наборами 3D-даних, геометричних перетворень і обчислення просторових характеристик. Це дозволяє ефективно працювати з результатами лазерного 3D-сканування резервуарів.

Для формування та збереження результатів калібрування у вигляді електронних таблиць використано бібліотеку openpyxl [10], яка забезпечує створення і редагування файлів формату Microsoft Excel. Генерація звітної документації у форматі Microsoft Word реалізована за допомогою бібліотеки docxtempl [11], що дозволяє автоматизувати заповнення шаблонів документів на основі результатів розрахунків.

З метою підвищення продуктивності обчислень при обробці великих обсягів даних у програмі використано модуль multiprocessing [12], який забезпечує паралельне виконання окремих обчислювальних задач та ефективне використання багатоядерних процесорів.

Застосування зазначених інструментів та бібліотек дозволило реалізувати повнофункціональну, масштабовану та ефективну автоматизовану систему калібрування резервуарів, придатну для практичного використання в умовах промислової метрології.

Реалізація алгоритмів розрахунку калібрувальника

Розрахункова частина автоматизованої системи калібрування реалізує геометричний метод визначення місткості горизонтальних сталевих резервуарів на основі даних 3D-сканування. Алгоритми

обчислень побудовані з урахуванням вимог та положень ДСТУ 7475:2016, який регламентує порядок калібрування резервуарів геометричним методом. При цьому класичні розрахункові залежності було адаптовано, уточнено та вдосконалено з урахуванням сучасних можливостей використання хмари точок.

Початковим етапом розрахунків є геометрична сегментація хмари точок резервуара на окремі конструктивні елементи — циліндричну частину та днища. Для цього використано комбінований підхід, що поєднує ітераційний метод RANSAC для виділення циліндричної поверхні та алгоритм кластеризації DBSCAN з подальшим уточненням меж кластерів на основі аналізу нормалей і кривизни поверхні. Такий підхід дозволяє автоматизовано відокремити елементи резервуара навіть за наявності шуму, локальних деформацій та нерівномірної щільності хмари точок [13].

Після сегментації для кожного конструктивного елемента окремо визначаються його геометричні параметри. Для циліндричної частини резервуара виконуються оцінювання положення осі, середнього радіуса та довжини на основі апроксимації відповідної частини хмари точок. Геометричні параметри днищ визначаються залежно від їх фактичної форми, встановленої за результатами аналізу просторових даних. Такий підхід дозволяє враховувати відхилення реальної геометрії резервуара від ідеалізованих моделей.

Обчислення об'єму резервуара виконуються шляхом послідовного визначення місткості для кожного рівня наповнення з дискретністю 1 мм. Розрахунок здійснюється окремо для циліндричної частини та днищ з подальшим підсумовуванням отриманих значень.

Результатом роботи розрахункового модуля є поміліметрова градуювальна таблиця місткості резервуара, яка формується у цифровому вигляді та передається до модуля експорту. Отримані дані використовуються для автоматичного створення електронних таблиць і звітної документації відповідно до вимог метрологічної практики.

Графічний інтерфейс користувача

Графічний інтерфейс користувача автоматизованої системи калібрування резервуарів розроблений з урахуванням вимог до зручності експлуатації, відтворюваності результатів та мінімізації впливу людського фактора на процес обробки вимірювальних даних. Інтерфейс забезпечує доступ до всіх основних функцій системи та підтримує послідовне виконання етапів калібрування у напівавтоматичному режимі.

Інтерфейс побудований за принципом логічного поділу процесу калібрування на окремі функціональні етапи, що відповідають послідовності обробки даних. Основне вікно програми містить панель керування, робочу область для відображення результатів та інформаційні елементи з відомостями про поточний стан обробки.

Структурно інтерфейс включає:

- головне вікно керування процесом калібрування;
- діалогові вікна завантаження та налаштування параметрів обробки хмари точок;
- інформаційні поля для відображення проміжних і підсумкових результатів;
- елементи керування для запуску обчислювальних процедур та експорту результатів.

Такий підхід дозволяє користувачу виконувати всі дії в межах одного програмного середовища без необхідності залучення сторонніх програмних засобів.

Головне вікно системи (Рис.1) забезпечує доступ до основних функцій: завантаження хмари точок, запуск алгоритмів сегментації, виконання геометричних розрахунків та формування вихідної документації. Для кожного етапу передбачені окремі елементи керування, що дозволяють задати необхідні параметри або використати значення за замовчуванням.

Рис.1 Головне вікно графічного інтерфейсу

Інтерфейс не вимагає спеціальної підготовки користувача та орієнтований на фахівців з метрології та технічних вимірювань.

Логіка взаємодії користувача з автоматизованою системою калібрування побудована за принципом послідовного проходження етапів обробки даних. Користувач виконує мінімально необхідні дії:

- завантажує файл хмари точок, отриманої в результаті 3D-сканування резервуара, та вказує базові відомості про резервуар (Рис.1). Візуальні та текстові повідомлення інформують про успішне завершення етапів або можливі помилки у вхідних даних;
- вводить додаткові дані вимірювань, запускає процедури попередньої обробки та сегментації геометричних елементів і обчислення геометричних параметрів і об'ємних характеристик (Рис.2), що після декількох хвилин відображає ескіз з деякими розрахованими параметрами (Рис.3);
- формує та зберігає результати калібрування у стандартизованих форматах (Рис.4).

Рис.2. Вікно «Формування таблиці»

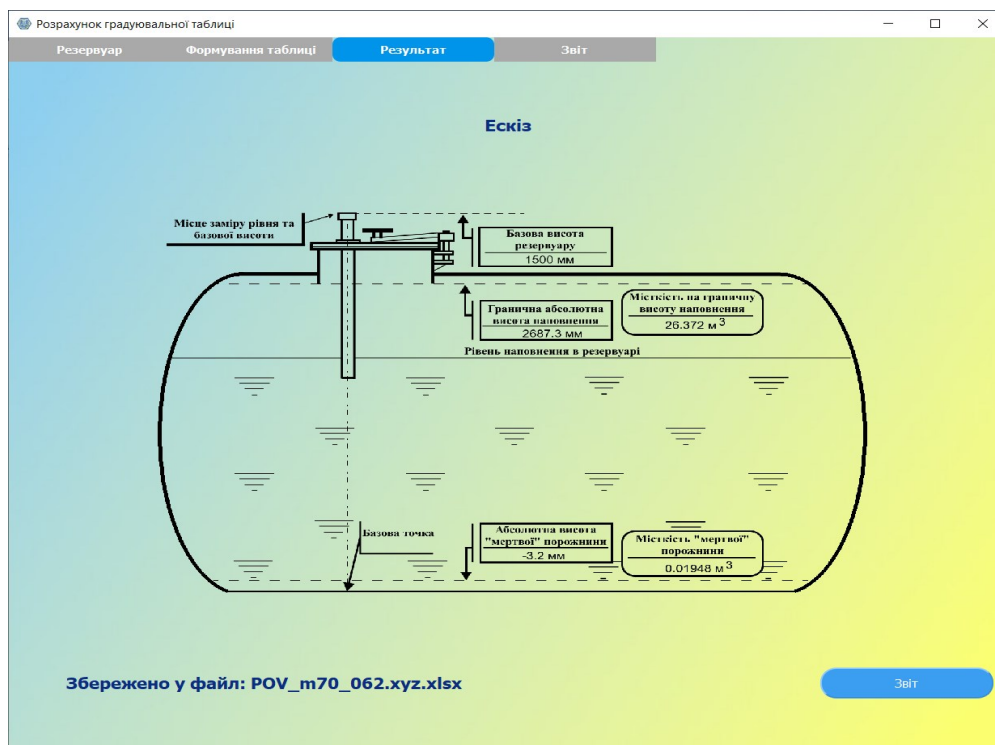


Рис.4. Вікно «Звіт»

Автоматизація процесу калібрування реалізована шляхом інтеграції всіх етапів обробки 3D-даних у межах єдиного програмного середовища. Після завантаження хмари точок система самостійно виконує сегментацію резервуара, оцінювання геометричних параметрів та обчислення об'ємів для заданих рівнів наповнення.

Користувачеві надається можливість контролювати перебіг обчислень і, за необхідності, повторно виконати окремі етапи з іншими параметрами, не порушуючи загальної логіки роботи системи. Це забезпечує гнучкість використання програмного забезпечення для резервуарів різних типів.

Автоматизована система калібрування забезпечує автоматичне формування результатів у вигляді електронних таблиць та текстових звітів, придатних для подальшого використання в метрологічній практиці (Рис.5) Градуовальні таблиці формуються у форматі Microsoft Excel та містять значення місткості резервуара для кожного міліметра рівня наповнення. Структура таблиці відповідає загальноприйнятим вимогам до представлення результатів калібрування та може бути безпосередньо використана для комерційного обліку рідин. Звітна документація автоматично генерується у форматі Microsoft Word на основі шаблонів, що містять структуровані розділи: загальні відомості про резервуар, опис методу калібрування, характеристики вимірювального обладнання, результати розрахунків та підсумкові висновки. Значення параметрів та таблиці заповнюються автоматично на основі результатів обчислень, що виключає необхідність ручного оформлення документів. Сформовані звіти відповідають вимогам чинних нормативних документів щодо оформлення результатів калібрування резервуарів, зокрема положенням ДСТУ 7475:2016, та можуть бути використані для архівування або подання до метрологічних служб.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Рівень	Місткість, м ³										Відсоток
2	наповне	см/10										місткості
3	ння, см	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	%
4	0	0,026374	0,028233	0,030148	0,032117	0,034151	0,036241	0,038397	0,040606	0,042871	0,045186	0,17
5	1	0,047545	0,049946	0,052398	0,054893	0,057431	0,060009	0,062622	0,065281	0,067978	0,070712	0,27
6	2	0,073486	0,076291	0,079135	0,082019	0,084924	0,087866	0,090841	0,093849	0,096889	0,099957	0,38
7	3	0,103055	0,106187	0,109343	0,112529	0,115744	0,118985	0,122255	0,125553	0,128877	0,132233	0,5
8	4	0,135609	0,139014	0,142447	0,145906	0,149391	0,152897	0,156428	0,159985	0,163568	0,167175	0,63
9	5	0,170807	0,17446	0,178138	0,181844	0,185572	0,189319	0,19309	0,196885	0,200708	0,204551	0,78
10	6	0,208413	0,212299	0,216212	0,220146	0,224105	0,228081	0,232076	0,236101	0,240147	0,244211	0,93
11	7	0,248296	0,252401	0,256534	0,26069	0,264864	0,269049	0,273262	0,277501	0,281759	0,286038	1,08
12	8	0,290333	0,294641	0,298979	0,303338	0,307717	0,312113	0,316534	0,320971	0,325431	0,329908	1,25

а) Заповнена таблиця;

Градуювальна таблиця на Резервуар горизонтальний циліндричний сталевий типу Резервуар	
Резервуар №	59
Організація-власник:	КПІ
Місце встановлення резервуару:	вул. Політехнічна
Призначення резервуару:	для зберігання
Номинальна місткість:	25 м ³
Гранична висота наповнення:	2687.3мм
Місткість на граничну висоту наповнення:	26.372м ³
Рівень, нижче якого обліковорозрахункові операції не виконуються:	-3.2мм
Місткість "мертвої" порожнини:	0.01948 м ³

б) Заповнений документ
Рис.5. Приклад сформованої документації

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У роботі представлено програмну реалізацію автоматизованої системи калібрування горизонтальних сталевих резервуарів, що базується на використанні даних лазерного 3D-сканування та геометричного методу визначення місткості. Реалізована система забезпечує повний цикл обробки вимірювальних даних — від завантаження хмари точок до автоматичного формування поміліметрових градуювальних таблиць і звітної документації у стандартизованих форматах.

Розглянута архітектура програмного забезпечення побудована за модульним принципом, що забезпечує гнучкість, розширюваність і зручність підтримки. Використання мови програмування Python та відкритих бібліотек дозволило реалізувати ефективну обробку великих обсягів просторових даних і інтегрувати обчислювальні алгоритми, графічний інтерфейс та засоби формування документації в єдине програмне середовище.

Розрахункові алгоритми реалізовано відповідно до вимог ДСТУ 7475:2016 з урахуванням особливостей застосування тривимірних хмар точок. Використання комбінованого підходу до сегментації резервуара на конструктивні елементи забезпечує автоматизоване визначення геометричних параметрів та коректне формування об'ємних характеристик.

Розроблений графічний інтерфейс користувача забезпечує послідовну логіку взаємодії з системою та мінімізує вплив людського фактора на процес калібрування. Автоматичне формування градуювальних таблиць і звітів підвищує зручність практичного застосування системи та забезпечує відповідність результатів чинним нормативним вимогам. Отримані результати підтверджують доцільність використання розробленого програмного забезпечення в задачах промислової метрології.

References

1. ISO 7507-4:2010, Petroleum and liquid petroleum products — Calibration of vertical cylindrical tanks — Part 4: Optical-triangulation method. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2010.
2. O. Samoilenko and V. Zaets, "Calibration of Tanks and Ships' Tanks for Storage and Transportation of Liquids by Laser Scanning," in *Applied Aspects of Modern Metrology*. IntechOpen, 2021, doi: 10.5772/intechopen.100565.
3. ДСТУ 7475:2016, Резервуари сталеві циліндричні горизонтальні. Методика повірки (калібрування) геометричним методом із застосуванням геодезичних приладів. Київ, Україна: ДП «УкрНДНЦ», 2016.
4. Python Software Foundation, Python Programming Language. [Online]. Available: <https://www.python.org>
5. Riverbank Computing, PyQt5 Documentation. [Online]. Available: <https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt5/>
6. Emerson Automation Solutions, The Engineer's Guide to Tank Gauging. Emerson Global, 2021. [Online]. Available: <https://www.emerson.com/documents/automation/engineer-s-guide-to-tank-gauging-en-175314.pdf>
7. NumPy Developers, NumPy. [Online]. Available: <https://numpy.org>
8. SciPy Developers, SciPy. [Online]. Available: <https://scipy.org>
9. Open3D Team, Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing. [Online]. Available: <https://www.open3d.org>
10. OpenPyXL Developers, openpyxl. [Online]. Available: <https://openpyxl.readthedocs.io>
11. docxtpl Developers, docxtpl. [Online]. Available: <https://docxtpl.readthedocs.io>
12. Python Software Foundation, multiprocessing — Process-based parallelism. [Online]. Available: <https://docs.python.org/3/library/multiprocessing.html>
13. D. Proskurenko and M. Bezuglyi, "Integrated Approach for 3D Point Cloud Segmentation in Tank Calibration," *Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute. Series Instrument Making*, no. 69(1), pp. 75–81, 2025, doi: [https://doi.org/10.20535/1970.69\(1\).2025.333512](https://doi.org/10.20535/1970.69(1).2025.333512)