

УДК 665.7:658.787:621.642.3:004.92(086.4) <https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.234>

© І.В. Акользін¹, О.М. Самойленко², Є.А. Коровяка¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

²Науково-виробничий інститут ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ», Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ФОРМУВАННЯ ХМАРИ ТОЧОК РЕЗЕРВУАРІВ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЕВИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛАЗЕРНИХ 3D СКАНЕРІВ ТА ІНТЕГРОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

© I. Akolzin¹, O. Samoilenko², Ye. Koroviaka¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

²Scientific and insearch institute SE «UKRMETRTESTSTANDART», Kyiv, Ukraine

RESEARCH ON THE ACCURACY OF POINT CLOUD FORMATION FOR VERTICAL STEEL TANKS USING LASER 3D SCANNERS AND INTEGRATED SOFTWARE

Мета. Підвищення точності обліку нафти та нафтопродуктів шляхом удосконалення методів визначення місткості резервуарів вертикальних сталевих.

Методика дослідження. Аналіз різних методів формування хмари точок в інтегрованому програмному забезпеченні лазерних 3D сканерів Leica та Faro, за результатами реальних вимірювань під час калібрування резервуара вертикального сталевих.

Результати дослідження. Виявлено суттєві розбіжності у точності формування єдиної хмари точок об'єкта залежно від застосованого методу їх формування. Запропоновано методи формування хмар точок, які забезпечують необхідну точність для розрахунку інтервальних місткостей резервуарів під час їх калібрування.

Наукова новизна. Вперше проведено експериментальне дослідження впливу методів формування хмар точок у інтегрованому програмному забезпеченні лазерних 3D сканерів різних виробників на точність визначення інтервальних місткостей резервуарів вертикальних сталевих. Встановлені нові закономірності формування хмари точок залежно від використаного методу та алгоритмів, реалізованих у програмному забезпеченні різних виробників, визначено аналіз їх впливу на точність обчислення інтервальних місткостей резервуарів. Обґрунтуванні рекомендації щодо вибору найбільш точних методів формування хмари точок для застосування у практичних задачах калібрування резервуарів.

Практичне значення. Об'єктом вимірювань обрано резервуар вертикальний сталевий РВС-20000, номінальною місткістю 20000 м³, що використовується для обліку нафтопродуктів. Похибка визначення його інтервальних місткостей не має перевищувати 0,05%. Попередні дослідження були зосереджені на теоретичному моделюванні очікуваних похибок, що брали за основу заявлені технічні характеристики сканерів. Отримані в цьому дослідженні результати експериментальних досліджень дозволяють оцінити реальний вплив методів формування хмари точок на точність визначення інтервальних місткостей резервуарів, що має практичне значення для метрологічного забезпечення калібрування резервуарів.

Ключові слова: калібрування, резервуар вертикальний сталевий, електронно-оптичний віддалемірний метод, скан, хмара точок, формування хмари точок.

Вступ. ДСТУ 7473 [1] та ISO 7507 [2] не регламентують методи формування хмар точок, та методики їх підготування до обчислення місткості. Однак точність визначення інтервальної місткості резервуарів вертикальних сталевих (далі – резервуар) значною мірою залежить від точності формування хмари точок, створеної за допомогою лазерного 3D сканера.

Процес формування хмари точок об'єкту – ключовий етап у калібруванні резервуарів, оскільки від точності формування хмари точок залежить точність обчислення інтервальних місткостей. Проте більшість користувачів розглядають формування хмари точок як процес, який реалізується автоматично інтегрованим до лазерних 3D сканерів програмним забезпеченням без будь-яких похибок. Такий підхід, на нашу думку, є помилковим, оскільки різні методи формування хмар точок можуть мати суттєвий вплив на точність координат точок у сформованій хмарі. Це потребує детального вивчення.

Дослідження точності різних методів формування хмар точок, у інтегрованому до лазерних 3D сканерів програмному забезпеченні, дозволить визначити оптимальні підходи до обробки даних та забезпечити відповідність вимогам нормативної документації [1–3].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Проблема оцінки впливу методів формування хмар точок, отриманих з декількох сканів, на точність кінцевих хмар точок та, відповідно, обчислюваних інтервальних місткостей резервуарів залишається недостатньо дослідженою. Попередні дослідження, здебільшого, зосереджувались на теоретичному моделюванні похибок, що можуть виникати при калібруванні резервуарів, та оцінці їх впливу на обчислення місткості резервуарів. Зокрема, у [4] описано дослідження, в якому моделювався вплив систематичних похибок сканера на точність обчислення інтервальних місткостей горизонтального резервуара.

Дослідження демонструє, що імітовані похибки, такі як адитивна похибка віддалеміра, похибка вимірювання нахилу осі обертання сканера, колімаційна похибка, а також похибка зенітної точки, можуть істотно впливати на точність результатів визначення інтервальних місткостей резервуара. Наприклад, виявлено, що похибки визначення висоти референсної точки сканера можуть призводити до значних відхилів обчислюваних місткостей резервуарів, тоді як певні похибки, наприклад, відхил від перпендикулярності осей обертання сканера, не мали впливу в конкретному моделюванні. В [5] описана методика визначення метрологічних характеристик лазерних 3D сканерів, які необхідно враховувати під час обчислення інтервальних місткостей резервуара.

Попри значущість таких теоретичних досліджень, вони не враховують особливостей методів формування хмари точок, які застосовуються у програмному забезпеченні різних виробників лазерних 3D сканерів, у нашому випадку таких як Leica та Faro.

Таким чином, залишається актуальною потреба в експериментальних дослідженнях. Вони дозволять оцінити вплив різних підходів до формування єдиної хмари точок під час сканування з кількох станцій на точність визначення інтервальних місткостей резервуару. Це особливо важливо для складних об'єктів,

таких як резервуари. Проведення досліджень не лише розширить наявні теоретичні уявлення, а й сприятиме підвищенню точності оцінки інтервальних місткостей резервуарів у реальних умовах експлуатації.

Метою дослідження є експериментальна оцінка впливу різних методів формування хмар точок, реалізованих у програмному забезпеченні, інтегрованому з лазерними 3D сканерами Leica та Faro, на точність визначення інтервальних місткостей під час калібрування резервуарів.

Дослідження охоплює:

- Перевірку впливу метода формування хмар точок – оцінку впливу ступеня очистки сканів від непотрібних точок на точність кінцевої хмари точок:

- Необроблені скани – містять всі отримані точки, включаючи шуми (рослинність, сторонні об'єкти, перешкоди).

- Очищені скани – після видалення шумів та зайвих елементів, залишають тільки точки, що належать поверхні резервуара.

- Методи вирівнювання та суміщення точок сканування – вплив методу формування хмари точок на точність кінцевого результату:

- Вирівнювання – об'єднання сканів, виконаних з різних станцій, шляхом використання жорстко визначених опорних точок.

- Суміщення – автоматичне вирівнювання сканів на основі аналізу геометрії перекриття між ними. У цьому методі програмне забезпечення зв'язує (корелює) хмари точок, використовуючи алгоритми мінімізації відстаней між відповідними фрагментами поверхонь.

Дослідження спрямоване на:

- Визначення відмінностей у результатах формування хмари точок залежно від використаного методу;

- Аналіз впливу цих відмінностей на точність обчислення інтервальних місткостей резервуарів;

- Обґрунтування рекомендацій щодо вибору найбільш точних методів формування хмари точок для застосування у практичних задачах калібрування резервуарів.

Обґрунтування застосування і опис вибраної автором методики

У сучасній практиці калібрування резервуарів лазерне 3D-сканування є одним із найточніших і найефективніших методів вимірювання. Однак, точність отриманих інтервальних місткостей резервуару значною мірою залежить від точності формування хмари точок з окремих сканів, яка виконується за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, інтегрованого з лазерними 3D сканерами.

Обраний для проведення досліджень резервуар вертикальний сталевий (РВС-20000) номінальною місткістю 20000 м³. Загальні технічні вимоги до резервуарів описані в [1, 2, 6]. Даний резервуар має бути відкалібровано з максимально допустимою похибкою визначення інтервальних місткостей, що не перевищує 0,05 % за ДСТУ 7473 [1]. Одним із факторів, що впливає на загальну похибку, є точність формування хмари точок. За проведеними розрахунками,

максимально допустима похибка формування хмари точок не повинна перевищувати 0,021 %.

Попередні дослідження, наприклад [7], переважно зосереджувалися на теоретичному моделюванні впливу окремих похибок, пов'язаних із технічними характеристиками сканера, на загальну точність вимірювань. Проте формування хмари точок отриманої з декількох сканів – це багатофакторний процес, що включає в себе перехід з локальних систем координат сканів до єдиної системи координат. Вибір методу формування хмари точок може суттєво вплинути на точність. Особливо у випадках, коли сканування виконується на об'єктах складної геометрії, таких як резервуари.

Експериментальний підхід у цьому дослідженні дозволяє оцінити вплив методів формування хмар точок не лише в рамках теоретичного аналізу, а й у реальних умовах експлуатації:

- використання експериментальних даних дозволяє виявити всі можливі похибки, зокрема ті, що виникають через людський фактор, вплив навколишнього середовища або технічні обмеження обладнання;
- дозволяє безпосередньо на реальних результатах вимірювань порівняти ефективність різних методів формування хмари точок, реалізованих у програмному забезпеченні сканерів Leica та Faro;
- об'єктивність результатів які забезпечуються використанням реальних даних сканування забезпечує високу достовірність отриманих результатів;
- практичну значущість яка забезпечується використанням результатів експерименту для розробки рекомендацій щодо вибору оптимальних методів формування хмари точок, що сприятиме підвищенню точності калібрування резервуарів.

Таким чином, використання експериментального підходу є найбільш доцільним для оцінки впливу методів формування хмари точок на її точність, оскільки він враховує реальні умови проведення сканування та забезпечує надійні дані для практичного застосування.

1. Методи високоточного сканування об'єктів вимірювання та формування хмар точок

Проблема полягає в тому, що локальні координати точок, виміряні лазерним 3D сканером (далі сканер) з декількох станцій сканування, необхідно перерахувати до одної єдиної системи координат об'єкту, наприклад резервуару. Методи таких перерахунків описані у Розділі 5 [8]. Початком кожної локальної системи координат є референтна точка сканера - точка перетину його осей. На кожній станції сканування, сканер вимірює не вертикальність своєї осі обертання, та автоматично обчислює просторові координати в локальній системі координат. У такій системі за вісь Z приймається прямовисна лінія. Обравши один скан, як основний (базовий), треба визначити параметри переходу з локальних систем координат усіх інших сканів до системи координат базового скана. Вона фактично є системою координат об'єкта вимірювань.

До параметрів переходу з системи координат кожного скана в систему координат об'єкта вимірювань відносяться:

- координати референсних точок сканера для кожного окремого скана x_i, y_i, z_i в системі координат базового скана;
- азимут – кут повороту навколо осі Z кожного скана в системі координат базового скана, щоб вісі X сканів стали паралельними.

Визначити параметри переходу можна виключно за координатами точок, спільних для двох суміжних сканів. Тобто, одні і ті самі точки повинні мати координати в локальних просторових системах координат двох, а краще трьох або чотирьох сканів.

Якщо базовий скан, та деякі інші не мають спільних точок, то задача все одно вирішується, якщо скани утворюють ланцюг у якому всі суміжні скани мають спільні точки.

Найкраще, коли перший і останній скани мають спільні точки. Саме так будується система сканів навколо резервуара (рис. 1), інакше стовідсоткової надійності і прийнятної точності формування хмари точок досягти неможливо.

Зрозуміло, що визначення місткості резервуара залежить від кількості точок на його поверхні, і точності координат цих точок у хмарі, де координати перераховані в єдину просторову систему координат. Тобто, точність координат залежить не тільки від точності прямих вимірювань сканером, а й від точності процесу формування хмари точок. Точність перерахунку залежить не тільки від точності координат спільних точок в двох системах координат, а й від ряду інших факторів:

- кількості спільних точок;
- геометрії розташування спільних точок;
- кількості станцій стояння в замкнутому ланцюгу;
- відстаней від станцій стояння до спільних точок.

Ці фактори залежать від наявності достатніх зон перекриття між сканами.

Способи створення єдиної системи координат на об'єкті вимірювань:

- використання координат опорних пунктів геодезичної мережі створеної тахеометром, у якій координати опорних пунктів мають точність більш високу, ніж точність вимірювання сканером;

- створення опорної геодезичної мережі самим сканером та засобами комплектними до сканера (сфери та марки). Також використання стандартних спільних об'єктів – циліндри та площини;

- автоматичний пошук спільних точок, програмним забезпеченням фірми-виробника сканерів, на двох чи більше сканах, та використання їх як опорних.

Кожен спосіб має свої переваги та недоліки:

- опорна мережа створена тахеометром має максимальну точність, але потребує великої кількості допоміжного обладнання, що збільшує тривалість вимірювань і знижує продуктивність. Неможливо виконати вимірювання одному спеціалісту.

- опорна мережа створена сканером має оптимальну точність, але створення геодезичної мережі з опорними точками за допомогою комплектного обладнання сканера займає багато часу.

- автоматичний пошук спільних точок має високу продуктивність, проте існує ризик, що програмне забезпечення не розпізнає всі необхідні точки для достатньо точного формування хмари.

2. Опис експериментальних досліджень

Визначення оптимальної послідовності операцій щодо формування хмари точок під час калібрування резервуару проводилось шляхом порівняння результатів вимірювань, отриманих за допомогою двох лазерних 3D сканерів Leica RTC 360 та FARO Focus S70.

Вимірювання для отримання хмари точок проведено протягом одного дня за допомогою двох комплектів лазерних 3D сканерів за сталої температури. Обробка отриманих даних виконувалась програмним забезпеченням Leica REGISTER 360 PLUS та Faro Scene, застосовуючи різні послідовності операцій щодо формування хмар точок.

Об'єктом вимірювань став резервуар вертикальний сталевий загальною місткістю 20 000 м³. Його радіус становить, приблизно, 40 м, довжина кола – 125 м, а загальна висота – майже 17 м. Для таких розмірів навіть незначні похибки у формуванні хмари точок можуть суттєво вплинути на точність визначення місткості резервуара, що робить цей об'єкт показовим для дослідження.

3. Схема вимірювань сканером Faro та формування хмари точок інтегрованим програмним забезпеченням

Технічні характеристики Faro Focus 3D S70:

- дальність вимірювання: до 70 м
- стандартний відхил вимірювань просторових координат:
 - в діапазоні до 25 м - 2,0 мм;
 - в діапазоні від 25 м до 70 м - 3,0 мм;
- швидкість сканування: до 976 000 точок/сек;
- діапазон вимірювань кута: 300° × 360°;
- діапазон робочої температури: від мінус 5 °C до 40 °C;
- вбудовані сенсори: акселерометр, компас, висотомір, GPS;
- формування хмар точок проводиться в програмному забезпеченні Scene.

Особливості використання даного сканера в умовах резервуарного парку полягають в тому, що автоматичне формування хмари точок без використання опорних пунктів геодезичної мережі майже неможливе. Дослідження щодо роботи з опорними пунктами проведено в [9]. Для отримання хмари точок навколо резервуару з високою точністю, необхідно створити геодезичну мережу наступним чином:

- рівномірно розмістити станції сканування навколо резервуару (рис. 1);
- з кожної станції сканування необхідно забезпечити перекриття попереднього сканування, мінімум 20 % поверхні резервуару;
- між станціями сканування повинно бути розміщено мінімум три опорні пересувні пункти геодезичної мережі (рис.1) у вигляді сфер, марок, циліндрів, площин;
- остання станція сканування захоплює мінімум 20 % поверхні резервуару, відсканованої з першої станції, та має спільні опорні точки.

Для формування хмари точок резервуару в інтегрованому програмному забезпеченні Faro Scene доступні три варіанти:

- автоматичне;

- візуальне;
- ручне.

Найточніші результати забезпечує ручне формування з використанням таких методів як:

- Cloud to Cloud (суміщення сканів),
- Target Based (вирівнювання по опорним пунктам).

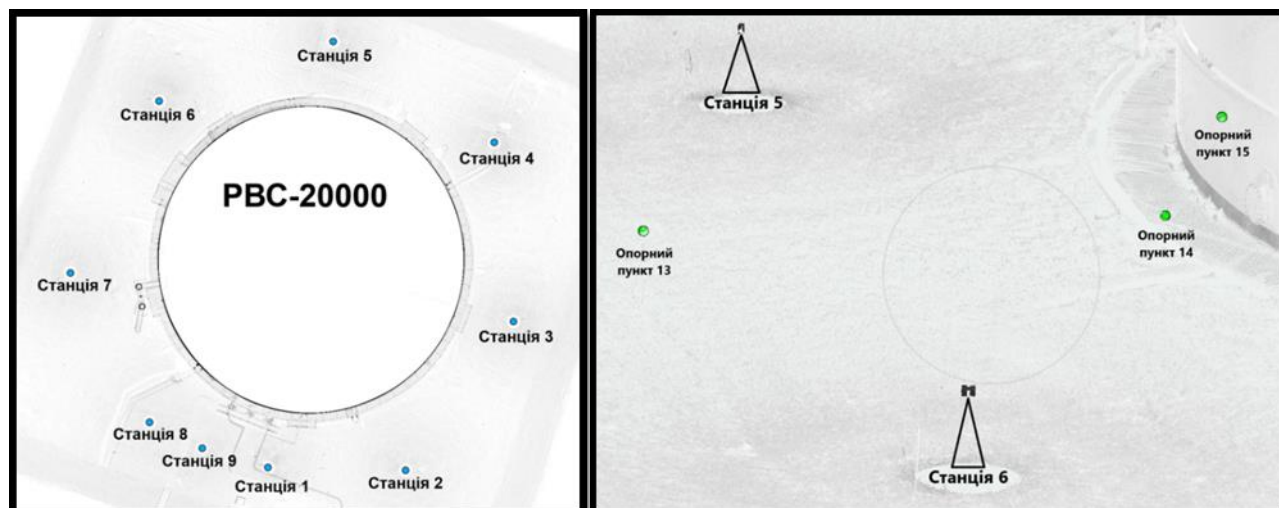


Рис. 1. Схема геодезичної мережі під час вимірюваннях сканером FARO

Під час формування хмари точок за допомогою функції **Target Based**, яка бере за основу зшивання по опорним пунктам, отримана хмара точок з стандартним відхилом в 1.4 мм, що оцінено програмою Faro Scene як відмінне зшивання. Назвемо цей результат «**FARO Target Based**». (рис. 2)

Registration Report

Overview

Target Statistics

Max. Distance Error

3.5 mm

Mean Distance Error

1.4 mm

Max. Horizontal Error

2.0 mm

Mean Horizontal Error

0.8 mm

Max. Vertical Error

3.2 mm

Mean Vertical Error

1.1 mm

Scan Errors

Target Statistics

Cluster/Scan	Connections	Max. Dist. [mm]	Mean Dist. [mm]	Max. Hor. [mm]	Mean Hor. [mm]	Max. Vert. [mm]	Mean Vert. [mm]	Max. Angle [deg]	Mean Angle [deg]
RVS20000.240	2	2.9	1.6	1.3	0.9	2.9	1.2	-	-
RVS20000.247	1	1.9	1.3	0.3	0.2	1.9	1.3	-	-
RVS20000.239	2	3.5	1.9	2.0	1.1	3.2	1.4	-	-
RVS20000.241	3	3.5	1.8	2.0	1.1	3.2	1.4	-	-
RVS20000.242	2	2.2	1.4	1.3	0.8	1.8	1.0	-	-
RVS20000.243	2	2.1	1.3	0.8	0.5	2.0	1.1	-	-
RVS20000.244	2	2.1	1.2	1.4	0.7	2.0	0.7	-	-
RVS20000.245	2	1.4	0.8	1.4	0.7	0.4	0.2	-	-
RVS20000.246	2	1.9	0.9	0.5	0.3	1.9	0.7	-	-

Рис. 2. Звіт з формування хмари точок **FARO Target Based**

Під час формування хмари точок за допомогою функції **Cloud to Cloud**, яка використовує накладання сканів з пошуком спільних точок. Отримана хмара точок з стандартним відхилом в 4.3 мм (рис. 3), що оцінено програмою Scene як відмінне зшивання. Назвемо цей результат «**FARO Cloud to Cloud**».

Registration Report

Overview

Maximum Point Error

6.5 mm

Mean Point Error

4.3 mm

Scan Errors

Scan Point Statistics

Cluster/Scan	Connections	Max. Point Error [mm]	Mean Point Error [mm]	Min. Overlap
RVS20000.24.240	5	6.5	4.2	18.9 %
RVS20000.24.247	5	6.5	4.2	21.9 %
RVS20000.24.239	5	3.8	3.0	19.7 %
RVS20000.24.241	5	6.3	4.2	17.6 %
RVS20000.24.242	4	5.9	4.5	19.7 %
RVS20000.24.243	3	6.3	4.7	17.6 %
RVS20000.24.244	2	4.5	3.9	44.8 %
RVS20000.24.245	3	6.5	5.4	21.9 %
RVS20000.24.246	4	6.5	4.8	18.9 %

Рис. 3. Звіт з формування хмари точок **FARO Cloud to Cloud**

Далі проводимо формування хмари точок за допомогою функції **Cloud to Cloud**, але перед зшиванням видаляємо надлишкові дані зі сканів, залишивши тільки стінки резервуару та опорні пункти (рис. 4). Отримана хмара точок з максимальним відхилом в 2.9 мм (рис. 5), що оцінено програмою Scene як відмінне зшивання. Назвемо цей результат «**FARO Cloud to Cloud Clean**».

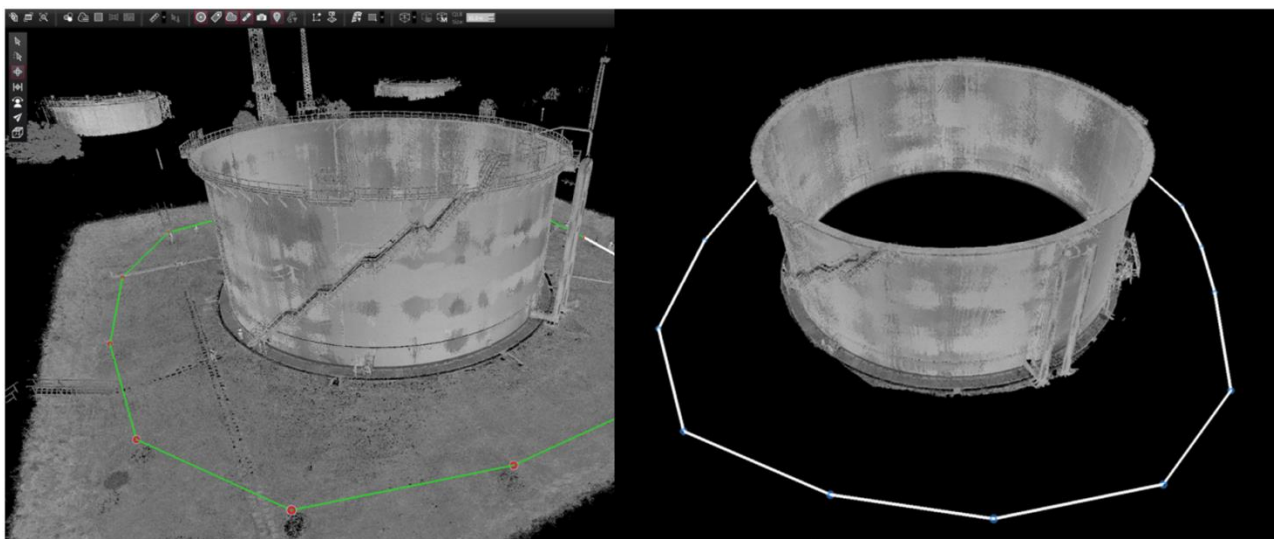


Рис. 4. Загальний вигляд непідготовленої та підготовленої хмари точок, за результатами сканування сканером Leica

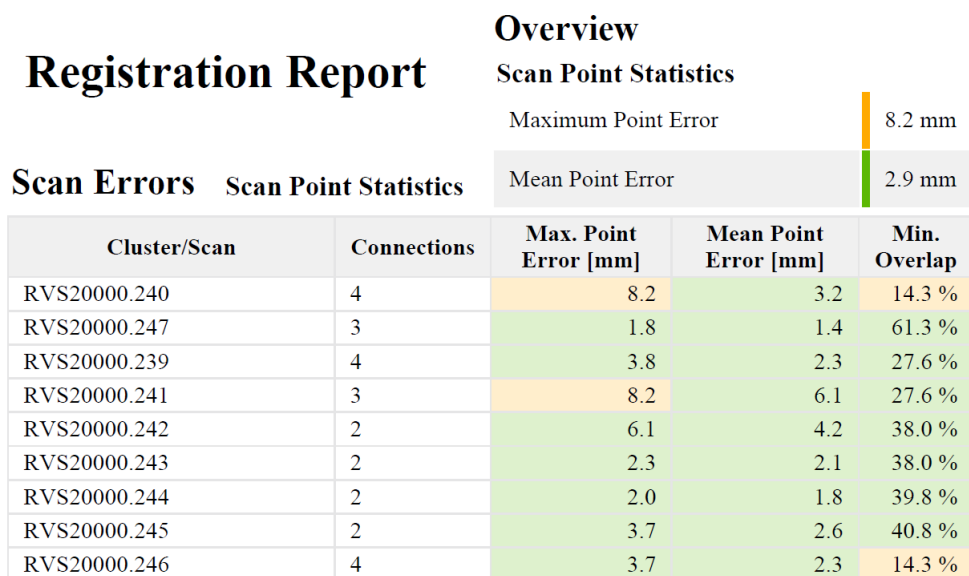


Рис. 5. Звіт з формування хмари точок FARO Cloud to Cloud Clean

4. Схема вимірювань сканером Leica та формування хмари точок інтегрованим програмним забезпеченням

Технічні характеристики Leica RTC 360:

- Дальність вимірювання: до 130 м;
- СКП вимірювання просторових координат:
 - в діапазоні до 10 м – 2,0 мм;
 - в діапазоні від 10 м до 50 м – 3,0 мм;
 - в діапазоні понад 50 м – 5,0 мм.
- Швидкість сканування: до 2 000 000 точок/сек;
- Діапазон вимірювань кута: $300^{\circ} \times 360^{\circ}$;
- Діапазон робочої температури: від мінус 5°C до 40°C ;
- Вбудовані сенсори: IMU, компас, GPS, камери HDR (5 шт.);
- Формування хмар точок проводиться в програмному забезпеченні Leica REGISTER 360 PLUS.

Основною перевагою цього приладу є автоматичне формування хмар точок безпосередньо під час вимірювань. Підвищений контроль отриманих даних за допомогою візуально інерційної системи VIS, що дає змогу формувати хмару точок в режимі реального часу. Прилад не потребує використання опорних пунктів. Сканування приладом Leica виконується значно швидше. Станції сканування необхідно ставити частіше за FARO, для більшого перекриття попередньої станції сканування (див. рис. 5). Під час сканування виконано хід з 15 станцій, рівномірно розташованих навколо резервуару. Під час вимірювання Faro, знадобилось 9 станцій сканування.

Формування хмари точок проводиться за допомогою візуально-інерціальної системи (VIS). Аналогічно до роботи з Faro, виконано формування хмари точок як на основі непідготовлених сканів, так і після їх попередньої обробки, під час якої залишено лише стінки резервуару. У результаті формування хмари точок із

непідготовлених сканів отриманий стандартний відхил 5.0 мм (рис. 6), що оцінено як відмінне зшивання. Назвемо цей результат «Leica VIS».

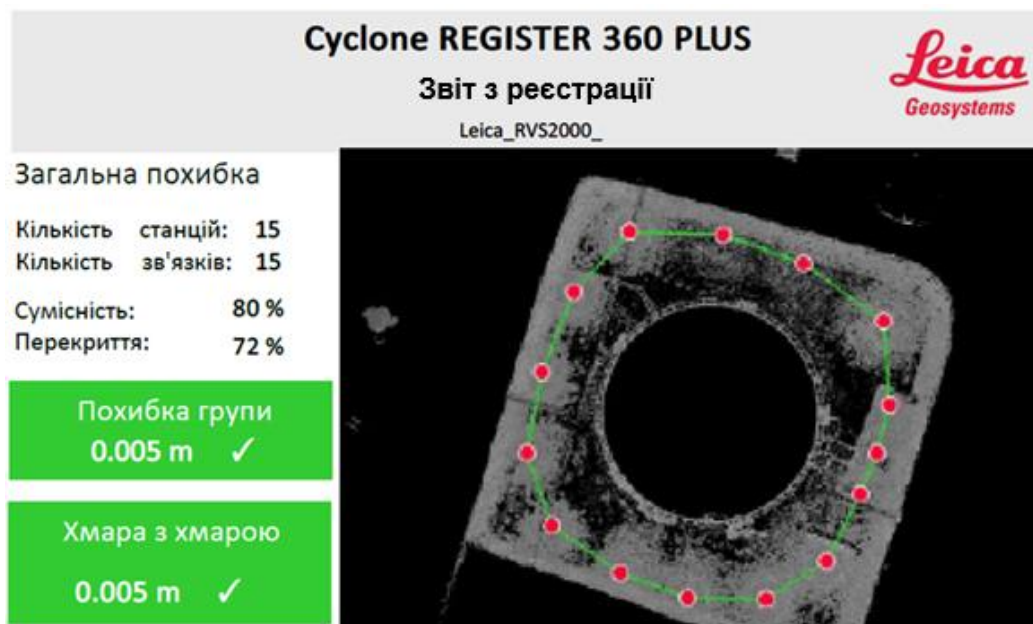


Рис. 6. Звіт з формування хмари точок **Leica VIS**

Результатом формування хмари точок з підготовлених сканів, на яких залишили тільки стінки резервуару, отримали хмару точок з стандартним відхилом 5.0 мм (рис. 7), що оцінено як відмінне зшивання. Назвемо цей результат «**Leica VIS Clean**».

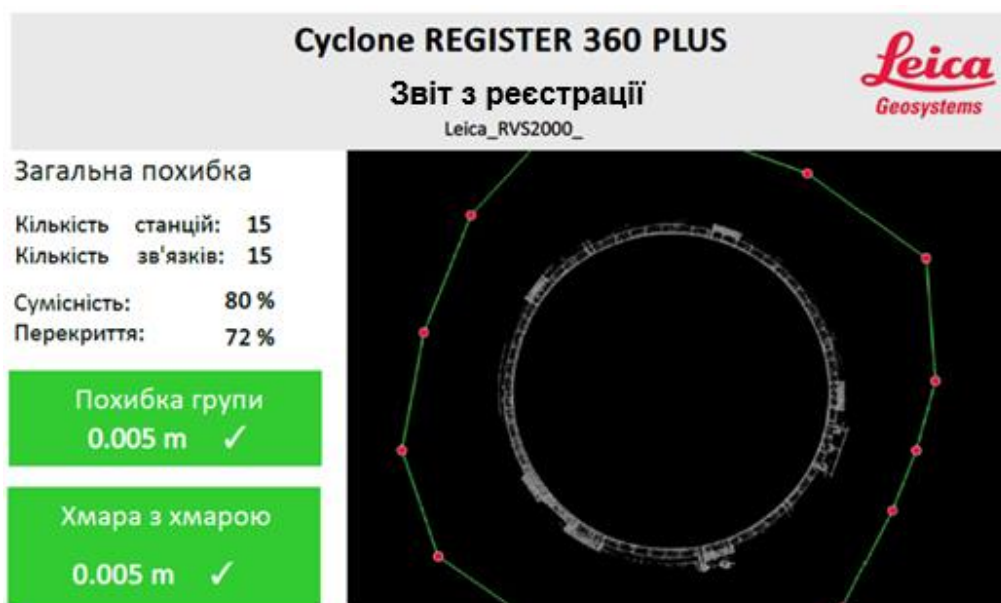


Рис. 7. Звіт з формування хмари точок **Leica VIS Clean**

5. Методика підготування хмари точок до обчислення інтервальних місткостей

Для продовження дослідження було обрано програмне забезпечення Geomagic WRAP, який виконується тріангулюванням за хмарию точок. Отримані хмари точок обробляємо в Geomagic WRAP в наступній послідовності:

- груба чистка хмари точок, щоб залишились тільки стінки резервуару;
- рівномірне розрідження точок по поверхні стінок резервуару. Для експерименту лишаємо приблизно 550–600 тис. точок, що створює сітку з відстанями приблизно 5 см між ними;
- формування поверхні стінки резервуару шляхом тріангулювання отриманої хмари точок (рис. 8);
- видалення шумів – точок, які не належать стінкам резервуару;
- визначення внутрішньої місткості отриманої фігури на кожен метр наповнення (рис. 8).

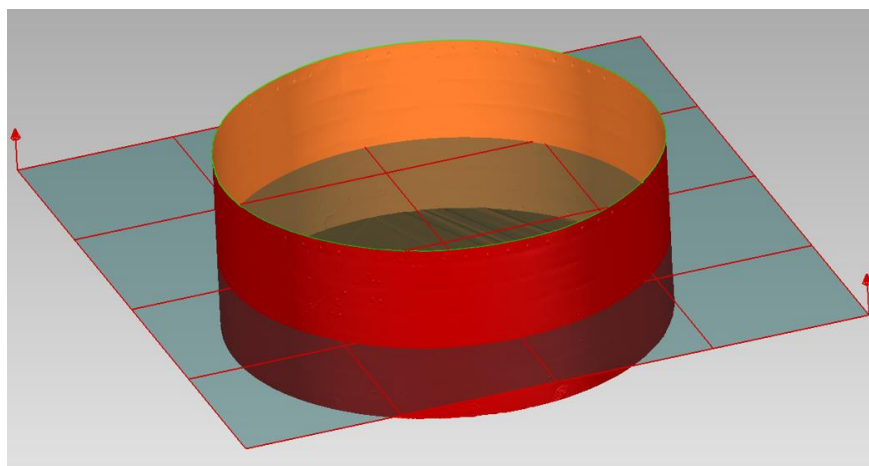


Рис. 8. Визначення внутрішньої місткості тріангульованої хмари точок

6. Аналіз отриманих результатів

За допомогою отриманих даних побудовано графік (рис. 9), на якому зображено різницю місткості резервуару відносно середнього значення їх місткостей без урахування значень **FARO Cloud to Cloud** у зв'язку з його значними відхиленнями. На графіку вісь **X** – рівень наповнення резервуару (1–16 м), а вісь **Y** – відхили місткостей резервуару (м³) від середнього.

На графіку (рис. 9) видно, що різниця інтервальних місткостей для всіх використаних методів, окрім **FARO Cloud to Cloud**, залишається в межах допустимого відхилення $\pm 0,021\%$. Видалення надлишкових даних по-різному вплинуло на результати: для сканувань **FARO** це суттєво покращило точність, тоді як для **Leica** спостерігається незначне погіршення.

Метод **FARO Cloud to Cloud**, своєю чергою, демонструє значне перевищення допустимого відхилення, що унеможлиблює його використання для калібрування резервуарів.

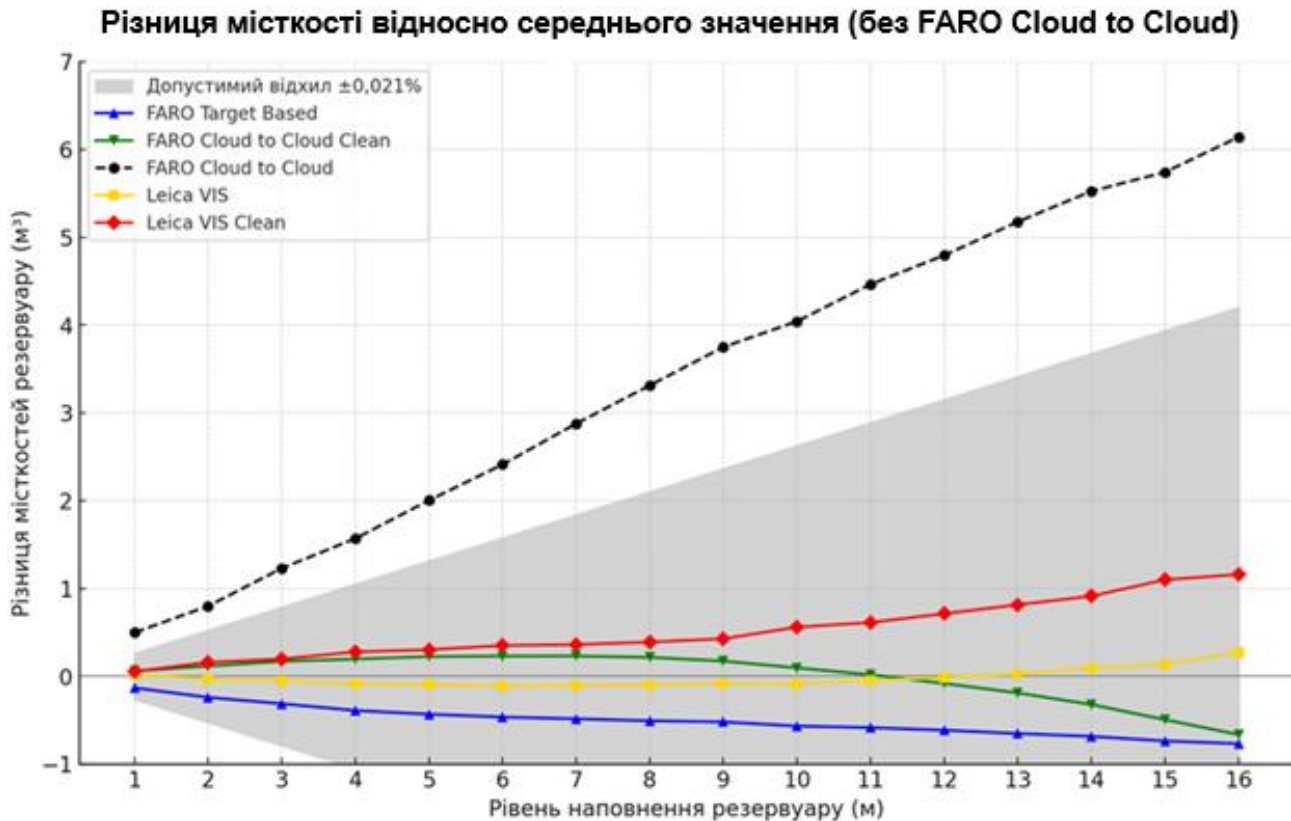


Рис. 9. Різниця місткості обчислених за хмарами точок відносно середнього значення місткості, без впливу FARO Cloud to Cloud

Окремо варто звернути увагу на те, що відхили, зазначені у звітах з формування хмари точок, жодним чином не корелюються з отриманими на графіку результатами. Тобто, за звітом з формування хмари точок можна виявити лише грубі помилки (наприклад, коли формування хмари взагалі не пройшло успішно), але цей звіт не відображає реальної точності отриманої хмари точок.

У роботі [10] досліджується проблема фактичних деформацій стінок резервуарів, які не відповідають теоретичним моделям їх врахування. Фактично деформація стінок під час обчислення місткості враховується за результатами сканування пустого та повного резервуара. Для застосування цього дуже перспективного особливу роль грає точність формування хмари точок. Інакше за деформацію стінки може бути прийнята похибка формування хмари.

Висновки.

Усі досліджені методи формування хмари точок, за винятком стандартного методу суміщення FARO Cloud to Cloud (без попередньої обробки даних), забезпечили точність, яка відповідає нормативним вимогам. Метод FARO Cloud to Cloud дещо перевищив допустиму похибку, що свідчить про його обмежену придатність без додаткової обробки.

Методи вирівнювання сканів, такі як FARO Target Based та FARO Cloud to Cloud Clean (із попередньо обробленими даними), не лише відповідають нормативним вимогам точності, а й демонструють результати з значним запасом за точність.

Використання автоматичного суміщення даних Leica VIS та Leica VIS Clean також забезпечило високу точність. Однак у випадку програмного забезпечення Leica REGISTER 360 PLUS видалення надлишкових даних, на відміну від FARO Cloud to Cloud, призвело до зниження точності формування хмари точок.

Встановлено, що вплив підготовки даних на точність хмари точок суттєво залежить від алгоритмів, реалізованих у програмному забезпеченні різних виробників. Це вказує на необхідність детального вивчення методів формування хмари точок.

Результати досліджень також демонструють потребу в розробці методики контролю програмного забезпечення для лабораторій, які займаються калібруванням резервуарів. Це сприятиме стандартизації процесів обробки сканів та підвищенню точності результатів калібрування.

Перелік посилань

1. Метрологія. Резервуари стаціонарні вимірювальні вертикальні. Методика повірки (калібрування) геометричним методом із застосуванням геодезичних приладів: ДСТУ 7473:2016. (2017). Державне підприємство Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів (Укрметртестстандарт). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=66443
2. ISO 7507-2:2022. Petroleum and liquid petroleum products – Calibration of vertical cylindrical tanks – Part 2: Optical-reference-line method or electro-optical distance-ranging method.
3. Measuring systems for the mass of liquids in tanks. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF LEGAL METROLOGY. OIML R 125 Edition 1998 (E). Bureau International de Métrologie Légale 11, rue Turgot – 75009 Paris – France.
4. Samoilenko, O., & Zaets, V. (2022). Calibration of Tanks and Ships' Tanks for Storage and Transportation of Liquids by Laser Scanning. *Applied Aspects of Modern Metrology*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.100565>
5. Адаменко, О.В., & Акользін, І.В. (2015). Контроль метрологічних характеристик лазерного сканера Faro Focus 3D S1210. *Містобудування та територіальне планування*, 57, 10–15. <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/02/2015/201557.pdf>
6. Fixed storage tanks. General requirements. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF LEGAL METROLOGY. OIML R 71 Edition 2008 (E). Bureau International de Métrologie Légale 11, rue Turgot – 75009 Paris – France.
7. Samoylenko, O., & Zaets, V. (2015). Evaluation by least square method of geometrical parameters and capacity of all tank types by the results of laser scanning. *Paris. OIML Bulletin, LVI*(3), 14–21.
8. Shah, T.R. (2006). *Automatic reconstruction of industrial installations using point clouds and images*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:64713129>
9. Адаменко, О., Анненков, А., Медведський, Ю., Циколенко, О., & Гаврилов, Є. (2023). Дослідження точності визначення координат сфер лазерним сканером Faro Focus S 120. *Просторовий розвиток*, 5, 240–257. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.5.240-257>
10. Akolzin, I., Samoilenko, O., Koroviaka, Ye., & Adamenko, O. (2024). A weighted average empirical model for determining the capacity of vertical steel tanks during their calibration using the electronic-optical remote measurement method. *Coll.res.pap.nat.min.univ*, 78, 225–235. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/78.225>

ABSTRACT

Purpose. Improving the accuracy of accounting for oil and petroleum products by enhancing methods for determining the capacity of vertical steel tanks.

Research methodology. Analysis of different methods for point cloud formation in the integrated software of Leica and Faro laser 3D scanners based on real measurement results during the calibration of a vertical steel tank.

Research results. Significant discrepancies in the accuracy of forming a unified point cloud of the object were identified, depending on the chosen method. Methods for point cloud formation have been proposed to ensure the required accuracy for calculating the interval capacities of tanks during their calibration.

Originality. For the first time, an experimental study has been conducted on the influence of point cloud formation methods in the integrated software of laser 3D scanners from different manufacturers on the accuracy of determining the interval capacities of vertical steel tanks. New regularities of point cloud formation depending on the method used and algorithms implemented in software from different manufacturers are established, an analysis of their impact on the accuracy of calculating interval tank capacities is determined. Recommendations are substantiated for choosing the most accurate point cloud formation methods for use in practical tank calibration tasks.

Practical implications. The object of measurement is a vertical steel tank (VST-20000) with a nominal capacity of 20,000 m³, used for petroleum product accounting. The error in determining its interval capacities must not exceed 0.05%. Previous studies focused on theoretical modeling of expected errors based on the declared technical characteristics of scanners. The experimental results obtained in this study make it possible to assess the real impact of point cloud formation methods on the accuracy of determining the interval capacities of tanks, which is of practical importance for the metrological assurance of tank calibration.

Keywords: *calibration, vertical steel tank, electronic-optical distance measurement method, scan, point cloud, point cloud formation.*