УДК 004.421
UDC 004.421
DOI: 10.33744/2308-6645-2022-1-51-084-094

ВИЗНАЧЕННЯ МІСТКОСТІ СТАЦІОНАРНИХ РЕЗЕРВУАРІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ

Гавриленко О.В., кандидат фізико-математичних наук, КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна, gelena1980@gmail.com, orcid.org/0000-0003-0413-6274

Жданова О.Г., кандидат технічних, КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна, zhdanova.elena@hotmail.com, orcid.org/ 0000-0002-8787-846X

Назиров Р.Ш., товариство з обмеженою відповідальністю «Інноваційний центр Нове життя», Київ, Україна, info@novezhittya.com.ua, orcid.org/ 0000-0002-5102-3662

Пархоменко Д.А., КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна, rainbow77733327@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1735-5679

Шумейко О.А., Національний транспортний університет, Київ, Україна, shumeyko.ntu.edu.ua@gmail.com, orcid.org/0000-0003-2897-060X

Халус О.Г., КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна, Selena.ua@gmail.com, orcid.org/0000-0002-5485-7881

DETERMINATION OF STATIONARY TANK CAPACITY ACCORDING TO LASER SCAN RESULTS

Gavrylenko Olena, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Igor Sikorsky KPI, Kyiv, Ukraine, gelena1980@gmail.com, orcid.org/0000-0003-0413-6274

Zhdanova Olena, Candidate of Technical Sciences, Igor Sikorsky KPI, Kyiv, Ukraine, zhdanova.elena@hotmail.com, orcid.org/ 0000-0002-8787-846X

Nazirov Rodion, New Life Innovation Center Limited Liability Company, Kyiv, Ukraine, info@novezhittya.com.ua, orcid.org/0000-0003-1735-5681

Parkhomenko Dmytro, Igor Sikorsky KPI, Kyiv, Ukraine, rainbow77733327@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1735-5679

Shumeyko Oleksiy, National Transport University, Kiev, Ukraine, shumeyko.ntu.edu.ua@gmail.com, orcid.org/0000-0003-2897-060X

Khalus Olena, Igor Sikorsky KPI, Kyiv, Ukraine, Selena.ua@gmail.com, orcid.org/0000-0002-5485-7881

Вступ

На поточний момент багато підприємств та організацій мають необхідність зберігати для власних потреб пальне або інші рідини. Для цього використовуються резервуари, що зберігають нафтопродукти, воду та інші рідини на підприємствах [1]. Існує багато нормативно правових актів, що регулюють діяльність підприємств паливно-енергетичного комплексу (наказ Міністерства палива від 20.05.2008 N281/171/578/155 «Про затвердження Інструкції про порядок приймання, транспортування, зберігання, відпустки та обліку нафти та нафтопродуктів на підприємствах та організаціях України» [11] тощо). Для отримання ліцензії на зберігання палива для власних потреб, суб'єктів господарювання зобов'язали вказувати обсяг усіх ємностей (як стаціонарних, так і нестаціонарних), які використовуються для зберігання палива. На практиці такі вимоги за часту реалізувати дуже складно, адже зазвичай для зберігання палива використовуються резервуари, для яких або немає сертифікату, в якому вказана ємність, або які повинні пройти повторну сертифікацію, бо з плином часу за певних причин (пошкодження, поява вм'ятин, корозія) ємність може змінюватись). Щоб зробити таку сертифікацію резервуару, потрібен час, ресурси, тобто відповідна процедура тривала і фінансово витратна.

Постановка проблеми

Класичний варіант визначення місткості резервуарів полягає у наповненні їх рідиною, використовуючи лічильник кількості рідини, похибку якого визначають перед початком градуювання для заданої швидкості наповнення [2]. Такий метод є надійним, оскільки все залежить тільки від точності самого лічильника. Принцип роботи простий: використовується труба з лічильником для подачі рідини для наповнення резервуару до межі (висоти) наповнення. Значення, яке розрахував

лічильник і є об’ємом рідини в резервуарі. Даний метод потребує значної кількості часу і рідини для проведення експерименту і на практиці не завжди є можливим для реалізації.

Знаходження об’єму резервуарів, які мають форму ідеального циліндру, кубу, паралелепіпеду тощо не є проблемою. Але на практиці резервуари, що використовуються, мають форму, що відрізняється від ідеальних просторових тіл, або можуть мати конфігурацію, що принципово відрізняється від них.

В останньому випадку можна було б виконати ретельні зовнішні заміри резервуару і розрахувати ємність, базуючись на них. Але цей шлях має суттєві недоліки:

− резервуари можуть мати дуже великі розміри (до 100 метрів за однією з розмірностей) і їх поміліметрові/посантиметрові обміри є неможливими;

− форма резервуару може дуже ускладнювати або унеможливлювати аналітичні розрахунки об’єму;

− форми резервуарів зазвичай є унікальними, що унеможливлює розробку стандартного алгоритму розрахунків;

− за часту, всередині резервуарів знаходяться додаткові об’єкти (труби, драбини, елементи кріплення тощо) і їх наявність та розміри не можливо врахувати при зовнішніх замірах;

− товщина стінок резервуару не є сталою величиною;

− якщо резервуар розміщений під землею, то зовнішні заміри виконати неможливо.

Альтернативним варіантом є використання лазерного сканера для сканування внутрішньої поверхні резервуару. Обчислення його об’єму проводиться на основі отриманих масивів точок поверхні.

В цій статті буде розглянуто метод визначення місткості резервуарів, який використовує результати лазерного сканування внутрішньої поверхні, та враховує геометричні характеристики та особливості резервуару (граничну висоту наповнення максимальну глибину увігнутостей тощо), значення температури під час сканування; лінійний температурний коефіцієнт розширення матеріалу резервуару.

Опис методу

Вхідними даними задачі є результати лазерного сканування внутрішньої поверхні резервуару – тривимірна модель внутрішньої поверхі резервуара, а саме так звана хмара точок, кожна з яких має такі параметри:

− номер рівня;
− номер точки;
− значення координати x;
− значення координати y;
− значення координати z;
− інтенсивність кольору *R*;
− інтенсивність кольору *G*;
− інтенсивність кольору *B*.

В загальному випадку кількість цих точок залежить від щільності сканування – чим більша щільність, тим більша кількість точок для розрахунку. Для визначення об’єму використовуються значення координат x, y, z.

Узагальнена схема алгоритму розв’язання задачі

ЕТАП I

I.1 Розбити хмару тривимірних точок на підмножини, що відповідають горизонтальним рівням (перерізам).

I.2 Для кожного перерізу:

– побудувати опуклу оболонку точок перерізу, що дозволяє відфільтрувати «зайві» внутрішні точки та отримати упорядковану послідовність точок (УПТ), які відповідають множині зовнішніх точок резервуару;

– вбудувати в УПТ ті внутрішні точки, які відповідають деформаціям (увігнутостям, вм’ятинам тощо) резервуару;

– обчислити площі горизонтальних перерізів.

ЕТАП II

II.1. Обчислити об’єми частин резервуару (шарів), які обмежені сусідніми перерізами,

На кроці 1.1 відбувається розбиття хмари точок, що представляє тривимірну модель внутрішньої поверхі резервуара, на підмножини, тобто групування точок хмари за координатою z, що відповідає висоті, та сортування цих груп за збільшенням значення висоти. Цей крок потрібен для

отримання двовимірних площин (розрізів) досліджуваного об'єкта. Кількість розрізів буде дорівнювати кількості угрупувань точок. Представлення вигляду розрізів позначено на рисунку 1.

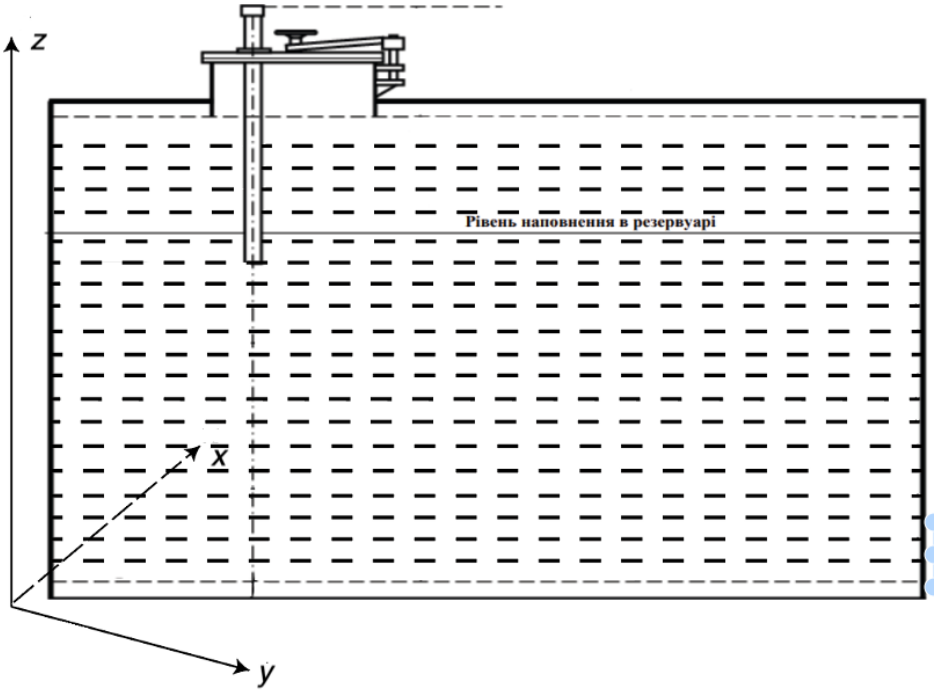

Рисунок 1 – Вигляд моделі резервуару з розрізами по висоті
(горизонтальним пунктиром виділено межі розрізу)
Figure 1 – View of the tank model with incisions in height
(horizontal dotted lines mark the boundaries of the incision)

Далі на кроці 1.2 для кожного горизонтального перерізу визначається опукла оболонка. Опуклою оболонкою деякої заданої множини точок називається мінімальна множина, що містить усі ці точки [12]. Для кінцевої множини точок опуклою оболонкою завжди буде опуклий багатокутник, всі вершини якого є точками вихідної множини [3]. Існує декілька алгоритмів пошуку опуклої оболонки. Перелік алгоритмів та відповідні часові складності представлено у таблиці 1.

В даній роботі використовуватиметься алгоритм Ендрю побудови мінімальної опуклої оболонки, оскільки він має одну з найкращих часову складність. Цей алгоритм є модифікацією алгоритму Грехема, який використовує лексикографічне сортування точок за координатами. Це є великою перевагою, оскільки не потребує використання тригонометричних операцій та операцій над дійсними числами. В процесі своєї роботи алгоритм Ендрю окремо визначає верхню та нижню частину оболонки з послідовних ланцюгів зовнішніх точок [4]. Графічна ілюстрацію результату роботи алгоритму представлена на рисунку 2.

Таблиця 1 – Відомі алгоритми побудови мінімальної опуклої оболонки та їх часова складність
Table 1 – Algorithms for constructing a minimal convex hull and their temporal complexity are known

Алгоритм	Складність
Джарвіса	$O(nh)$, де n – кількість точок, h - кількість точок в опуклій оболонці. Найгірший варіант $O(n^2)$.
Грехема	$O(n \log n)$, де n – кількість точок. Найкращий варіант $O(n)$.
Quickhull (алгоритм швидкого сортування)	$O(n \log n)$, де n – кількість точок. Найгірший варіант $O(n^2)$.
Кіркпатрика - Зейделя (алгоритм розділяй та володарюй)	$O(n \log h)$, де n – кількість точок, h - кількість точок в опуклій оболонці.
Ендрю	$O(n \log n)$, де n – кількість точок. Найкращий варіант $O(n)$.
Чана	$O(n \log n)$, де n – кількість точок.

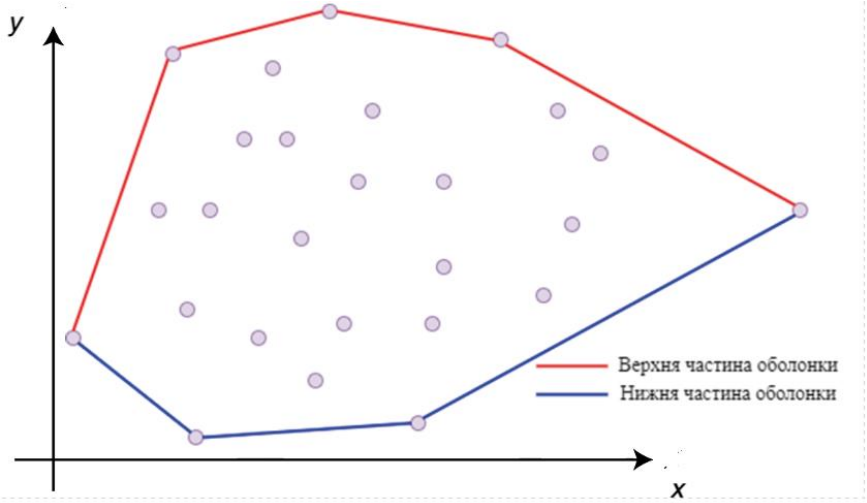

Рисунок 2 – Ілюстрація результату роботи алгоритму Ендрю
Figure 2 – Illustration of the result of Andrew's algorithm

Після застосування алгоритму Ендрю до множини точок кожного горизонтального перерізу резервуару отримуємо упорядковану множину точок, які відповідають деякій підмножині зовнішніх точок резервуару.

Включення увігнутостей в УПТ

З урахуванням мети досліджуваної задачі, недоліком алгоритму Ендрю (як і усіх алгоритмів побудови опуклої оболонки) є те, що він виключає можливість включення в УПТ точок, які належать увігнутостям резервуару, тим самим умовно збільшуючи об'єм.

Введемо позначення: $N = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – множина двовимірних точок аналізованого перерізу; $E = \{p_1, p_2, \dots, p_e\}$ – множина двовимірних точок опуклої оболонки, отриманих в результаті роботи алгоритму Ендрю, $E \subseteq N$; $M = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ – множина двовимірних точок, що не увійшли в множину E, $M \subseteq N$; Δ – числовий параметр максимально допустимої відстані між сусідніми точками; β – допустима глибина увігнутостей.

Нехай $p_1 \in E$ – стартова точка, яка є верхньою лівою точкою множини точок опуклої оболонки. Точка p_1 вважається неперевіреною з обох сторін – зі сторони наступної сусідньої точки і сторони попередньої точки. Наступною в УПТ точкою після стартової йде p_2. Відстані між точками p_1 і p_2 розраховується за формулою [5]:

$$d = \sqrt{(x_{p1} - x_{p2})^2 + (y_{p1} - y_{p2})^2} \quad (1)$$

Якщо $\Delta \geq d$, то будемо вважати точку p_1 перевіреною «справа», а точку p_2 – перевіреною «зліва», тобто будемо вважати, що між цими точками увігнутості немає (між ними нема точок, які потрібно включити до опуклої оболонки).

Якщо $\Delta \leq d$, то потрібно знайти точку A посередині відрізку $[p_1 ; p_2]$, координати якої дорівнюють: $x_A = \frac{x_{p1}+x_{p2}}{2}$, $y_A = \frac{y_{p1}+y_{p2}}{2}$. Далі в околі точки A радіусом β серед точок множини M шукається точка, що є найближчою то точки A (ці дії проілюстровано на рисунку 3).

Якщо така точка є, то включити її в УПТ між точками p_1 та p_2. Але нову точку p_{1-2} в оболонці не позначати як перевірену, оскільки відстань між нею та її сусідніми точками може бути не допустима ($\Delta \leq d$). Далі продовжити пошук, починаючи вже з точки p_{1-2}. Якщо такої точки нема – позначити пару точок p_1 та p_2 як перевірені. Приклад включення точки увігнутості в УПТ зображено на рисунку 4.

Ці дії виконуються циклічно для $p_1, p_2, \dots, p_n$, поки відстані між усіма сусідніми парами точок не будуть допустимими або всі точки будуть позначені як перевірені.

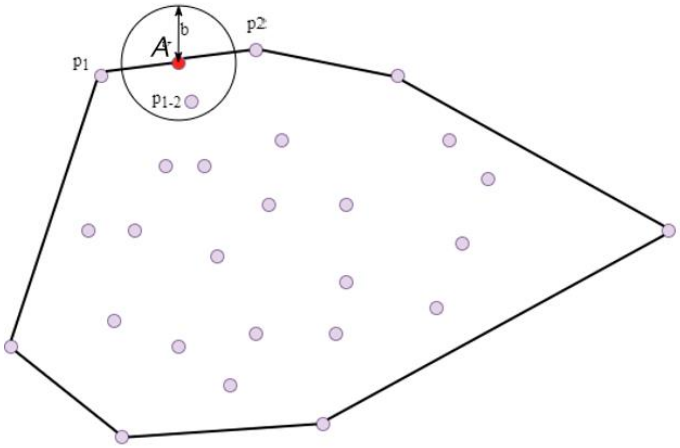

Рисунок 3 – Пошук точки для включення в УПТ
Figure 3 – Search for a point for inclusion in the UPT

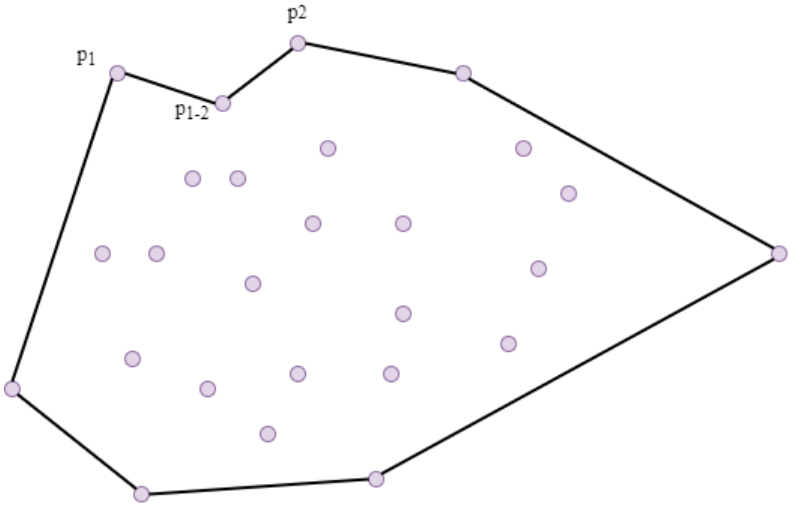

Рисунок 4 – Включення заглиблення в опуклу оболонку
Figure 4 – Inclusion of the recess in the convex hull

Алгоритм процедури включення точок у оболонку

Вхід: $N = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – множина двовимірних точок
$E = \{p_1, p_2, \dots, p_e\}$ – множина двовимірних точок опуклої оболонки, отриманих в результаті роботи алгоритму Ендрю, $E \subseteq N$
$M = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ – множина двовимірних точок, що не увійшли в множину E, $M \subseteq N, M \cap E = \emptyset$
Δ – числовий параметр максимально допустимої відстані між сусідніми точками оболонки
β – числовий параметр максимальної глибини увігнутостей

Вихід: X – упорядкована послідовність точок

$X \coloneqq E$

Помітити всі точки як не перевіреними «справа» та «зліва»

while відстань між усіма парами сусідніх точок не є допустимою

    $x \coloneqq |X|$

    for $i \coloneqq 1$ **to** x **do** // цикл по точках множини X

        if $p_i = p_x$ //поточна точка остання в множині E

            if відстань між p_1 і $p_i \leq \Delta$

                then позначити p_1 як перевірену «справа» і p_i як перевірену «зліва»

            else

12 **then** знайти A – точку, яка знаходиться посередині між p_1 та p_i
13 p:= (∞, ∞)
14 **for j** $\coloneqq 1$ **to** $|M|$ **do** **//цикл по точках множини *M***
15 **if** відстань між p_j та $A \leq \beta$ і відстань між A та p_j є мінімальною серед всіх точок множини M
16 **then** $p \coloneqq p_j$
17 **end if**
18 **end for**
19 **if** $p \in M$
20 **then** $X \coloneqq X \cup p$, де точка p включається після точки p_i, видалити з множини M точку p
21 **else** позначити p_1 як перевірену «справа» і p_i як перевірену «зліва»
22 **end if**
23 **end if**
24 **end if**
25 **if** $p_i \neq p_x$ і p_i не була позначена як перевірена «справа» або «зліва»
26 **if** відстань між p_i та $p_{i+1} \leq \Delta$
27 **then** позначити p_i як перевірену «справа» і p_{i+1} як перевірену «зліва»
28 **else**
29 **then** знайти A – точку, яка знаходиться посередині між p_i та p_{i+1}
30 p:= (∞, ∞)
31 **for j** $\coloneqq 1$ **to** $|M|$ **do**
32 **if** відстань між p_j та $A \leq \beta$ і відстань між A та p_j є мінімальною серед всіх точок множини M
33 **then** p:= p_j
34 **end if**
35 **end for**
36 **if** $p \in M$
37 **then** $X \coloneqq X \cup p$, де точка p включається після точки p_i, видалити з множини M точку p
38 **else** позначити p_i як перевірену «справа» і p_{i+1} як перевірену «зліва»
39 **end if**
40 **end if**
41 **end if**
42 **end for**
43 **end while**

Після виконання цієї процедури УПТ перерізу буде виглядати так, як це представлено на рисунку 5.

На наступному етапі, за формулою площі Гаусса (алгоритм шнурування), визначається площа перерізу. Ця формула дозволяє обрахувати площу багатокутника використовуючи координати його вершин [6]. Формула розрахунку площі застосовна для будь-якого багатокутника без самоперетинів, який може бути опуклим чи ввігнутим [7]. Для точок УПТ $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ формула площі Гаусса має вигляд:

$$S = 0.5 * (\begin{vmatrix} x_1 & x_2 \\ y_1 & y_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_2 & x_3 \\ y_2 & y_3 \end{vmatrix} + \cdots + \begin{vmatrix} x_n & x_1 \\ y_n & y_1 \end{vmatrix}) \quad (2)$$

де S – площа багатокутника, n – кількість вершин багатокутника.

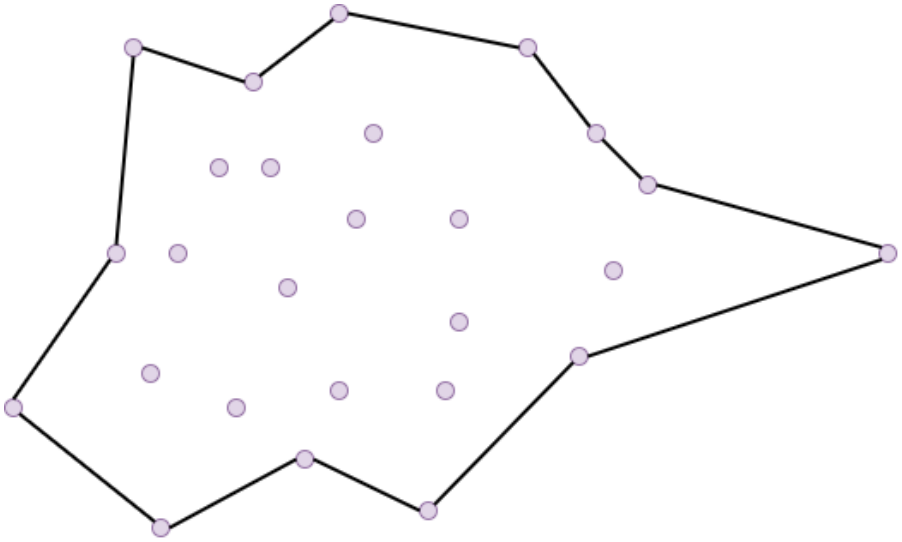

Рисунок 5 – Переріз з включеними заглибленнями в оболонку
Figure 5 – Algorithms for construction and minimal construction and development

Після отримання масиву значень площ горизонтальних перерізів резервуара треба розрахувати відстані між сусідніми перерізами. Для цього потрібно використати формулу:

$$l_i = |z_i - z_{i+1}| \quad i = 1, \dots, m-1, \tag{3}$$

де m – кількість перерізів, z_i – значення координати z для i-го перерізу.

Маючи площі кожного перерізу та відстані між сусідніми перерізами, можна обчислити об'єм резервуару. Об'єм такої не стандартної опуклої фігури можна порахувати за формулою знаходження об'єму усіченої піраміди [8]:

$$V_i = \frac{l_i}{3}\left(S_i + S_{i+1} + \sqrt{S_i S_{i+1}}\right), \quad i = 1, \dots, m-1, \tag{4}$$

де S_i – площа i-го перерізу.

Використавши (4) для знаходження об'єму шару між кожним перерізом, можна знайти загальний об'єм резервуару. Оскільки місткість резервуару обмежується висотою наповнення, отже об'єм потрібно шукати до цієї граничної висоти h:

$$V = \begin{cases} V = V + V_i, \ l_i + \alpha \le h, i = 1 \dots m-1 \\ V, \ l_i + \alpha > h, \end{cases} \tag{5}$$

де $\alpha = \sum_{j=1}^{i} l_j$, $i = 1 \dots m-1$, $j = 1 \dots i$.

Розрахувавши за формулою (5) значення об'ємів усіх шарів, можна знайти місткість резервуару до граничного значення висоти наповнення h. За умови, що на тривимірній моделі сканування було виявлено відсутність точок ззовні, які впливають на значення обрахованого об'єму, то можна експериментально визначити нижню та верхню границю $down^-, upper^+$ відповідно по висоті і помножити суму об'ємів, які відповідають тій частині загального об'єму на вказаній висоті, на коригуючий коефіцієнт μ.

Варто також зазначити, що місткість резервуару залежить від таких фізичних чинників як температура повітря під час проведення експерименту і матеріал поверхні резервуару. Для цього обчислюють поправку місткості θ сталевого резервуара, яка враховує деформацію стінки резервуара під дією температури приведеної до 15° за формулою [9]:

$$\theta = 1 + (15° - t) * \sigma, \tag{6}$$

де σ – лінійний температурний коефіцієнт розширення матеріалу (для сталі - $11{,}5 * 10^{-6}\ 1/°K$); t – середня температура резервуара під час проведення вимірювання, $°C$

Після обчислення коефіцієнту поправки місткості θ за (6) треба помножити знайдений об'єм резервуару V на θ, тим самим отримуючи більш точне значення об'єму.

На останньому кроці знаходиться розширена невизначеність U, яка є визначає інтервал навколо результату вимірювання, в межах якого ймовірно розташована більшість розподілу значень, які з достатнім обґрунтуванням можуть бути приписані вимірюваній величині [10].

$$U = k(p)u_c(V) \tag{7}$$

де $k(p)$ – коефіцієнт покриття, при $p = 0{,}95$ значення $k(p) \approx 2$,

$u_c(V)$ – сумарна стандартна невизначеність значення об'єму резервуару (в деяких джерелах називають комбінованою невизначеністю, що є звичайною стандартною невизначеністю):

$$u_c(V) = \sqrt{\frac{1}{(m-1)(m-2)}\sum_{i=1}^{m-1}(V_i - \bar{V})^2} \tag{8}$$

де $m-1$ – кількість визначених об'ємів шарів,

$\bar{V}$ – середнє значення об'єму шару між сусідніми перерізами, визначається як $\sum_{i=1}^{m-1}\frac{V_i}{m-1}$,

V_i – значення об'єму шару між i-м та $i+1$-м перерізом.

Результати практичного застосування

На рисунку 6 представлено результат розрахунку об'єму деякої цистерни у вигляді так званої градуювальної таблиці, в якій по міліметрах розписано відповідність рівню рідини в резервуарі її реального об'єму.

Градуювальна таблиця (поміліметрові інтервали, приведені до 15°C)

Організація

Тип: Резервуар №

Рівень наповнення, см	Місткість, м3 см/10										Відсоток місткості %
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0	1,8354E-08	5,4589E-05	0,00021515	0,00064668	0,00177024	0,00296626	0,00490758	0,00660565	0,00870882	0,01113662	0,00317507
1	0,01311163	0,01495112	0,01706885	0,020389	0,02339682	0,02662683	0,02968212	0,03362269	0,03713937	0,04192192	0,01128609
2	0,04660661	0,05059962	0,05561245	0,06135566	0,06695445	0,07694755	0,09077389	0,10362281	0,11815646	0,1342223	0,03617241
3	0,14937614	0,16495892	0,18147039	0,1974818	0,21700714	0,23523621	0,25927981	0,29013099	0,32170385	0,35296495	0,09387219
4	0,3876509	0,42233168	0,45988979	0,49481582	0,53217219	0,57118798	0,61265401	0,65839834	0,70488185	0,75188818	0,19342364
5	0,79875463	0,84678612	0,89556279	0,9457712	0,99833	1,05102658	1,10400497	1,15734302	1,21074185	1,26571617	0,31992314
6	1,32114201	1,37520166	1,43049359	1,48686804	1,54348971	1,6001447	1,65720734	1,71480953	1,77298346	1,83024983	0,45733703
7	1,88860096	1,94738798	2,00612316	2,0653617	2,12453188	2,18403892	2,24494216	2,30810939	2,3714897	2,43551018	0,60561486
8	2,50092326	2,56734875	2,63357417	2,70065452	2,76731043	2,83316524	2,9001549	2,96762112	3,03502142	3,1018872	0,7673464
9	3,16880344	3,2360978	3,30357688	3,37152714	3,43841834	3,50605106	3,57372167	3,64175269	3,71013563	3,77841734	0,93152371
10	3,84678362	3,91502149	3,98333446	4,05157762	4,11907468	4,18762873	4,25590261	4,32412454	4,39256864	4,46101306	1,09675489
...											
710	406,496981	406,553945	406,610879	406,66783	406,724794	406,781725	406,838679	406,895635	406,95262	407,009584	98,5738156
711	407,066544	407,123641	407,18051	407,237444	407,294401	407,351383	407,40841	407,465447	407,522372	407,5793	98,7117697
712	407,636234	407,693197	407,750157	407,807264	407,864204	407,9212	407,978193	408,035144	408,092104	408,149064	98,8497484
713	408,206025	408,263117	408,320032	408,376963	408,433899	408,490861	408,547952	408,604895	408,661805	408,718743	98,9877283
714	408,775822	408,83278	408,889734	408,946691	409,003655	409,06072	409,117659	409,174577	409,23152	409,288547	99,1256958
715	409,345567	409,402499	409,459427	409,516356	409,573287	409,630229	409,687173	409,744121	409,801158	409,858082	99,2635904
716	409,915011	409,971966	410,028902	410,085835	410,142759	410,199695	410,256757	410,313681	410,370641	410,427586	99,4015374
717	410,484672	410,54161	410,598521	410,655594	410,712529	410,769484	410,826444	410,883392	410,940455	410,997355	99,5394691
718	411,054269	411,111216	411,168154	411,225098	411,282032	411,338954	411,395869	411,452782	411,509719	411,566673	99,6773726
719	411,62375	411,680686	411,737597	411,794514	411,851415	411,90835	411,965295	412,022227	412,079295	412,136195	99,8152468
720	412,19311	412,250003	412,306927	412,363863	412,420922	412,477832	412,534745	412,591638	412,648523	412,705606	99,953136
721	412,762531	412,819469	412,876378	412,933289	412,956059						100

Рисунок 6 – Фрагмент градуювальної таблиці

Figure 6 – Fragment of grading table

На рисунку 7 представлено результат розрахунку границь похибок для загальної місткості деякого резервуара, для місткості «мертвої» порожнини та місткості неконтрольованої порожнини згідно вимог ДСТУ [9]. Висота неконтрольованої порожнини, «мертвої» порожнини і висота загальної місткості були взяті з паспорту резервуару.

Назва параметра	Числове значення м³	Границі похибки (розширена невизначеність)
Місткість неконтрольованої порожнини	0,123581357100929 м³	± 0,0036656034155986 м³
Місткість "мертвої" порожнини	10,0813160943075 м³	± 0,14555404614836 м³
Місткість на граничну висоту заповнення резервуара (загальна місткість)	412,956059296846 м³	± 2,07997706718331 м³

Рисунок 7 – Результати границь похибок (розширені невизначеності)

Figure 7 – Error limit results (extended uncertainties)

Слід також зазначити, що в разі наявності всередині резервуару додаткових перешкод (балок, патрубків тощо) або деформації поверхні резервуару для підвищення точності розрахунку слід використовувати «коригуючі коефіцієнти», значення яких підбираються експериментально.

Висновок

В даній роботі було розглянуто принцип розрахунку місткості стаціонарного резервуару на основі лазерного сканування внутрішньої поверхні.

Такий спосіб надає змогу отримати значення об'єму дуже точно (до 0,5% похибки для резервуарів менше 15м^3, до 0,4% похибки для резервуарів менше 50м^3, до 0,3% похибки для резервуарів менше 200м^3 і 0,2% похибки для резервуарів понад 200м^3) [9].

Використовуючи даний набір процедур, можна з легкістю знаходити об'єми не тільки стаціонарних резервуарів, а й інших об'ємних тіл. Потрібно мати тільки масив координат, який описує дане тіло і висоту наповнення.

В разі наявності всередині резервуару додаткових перешкод (балок, патрубків тощо) або деформації поверхні резервуару для підвищення точності розрахунку слід використовувати «коригуючі коефіцієнти».

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Резервуари горизонтальні [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://gazovik-pgo.ru/cat/rgs/.
2. Спосіб градуювання резервуарів [Електронний ресурс] / [В. І. Кабанов, О. В. Молчанов, Е. І. Алаторцев та ін.]. – 2004. – Режим доступу до ресурсу: https://www.freepatent.ru/patents/2240514.
3. Рубан М. М. Алгоритми побудови опуклої оболонки [Електронний ресурс] / М. М. Рубан. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: https://ddpu.edu.ua/fizmatzbirnyk/2010/p122-126.pdf.
4. Чаднов Р. В. Алгоритмы построения выпуклых оболочек и их применение в ГИС и САПР [Електронний ресурс] / Р. В. Чаднов. – 2004. – Режим доступу до ресурсу: http://www.inf.tsu.ru/library/DiplomaWorks/CompScience/2004/Chadnov/diplom.pdf.
5. Клепко В. Ю. Вища математика в прикладах і задачах: Навчальний посібник. 2-ге видання / В. Ю. Клепко, В. Л. Голець. – Київ: Центр учбової літератури, 2009. – 594 с.
6. Shoelace Theorem [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://artofproblemsolving.com/wiki/index.php?title=Shoelace_Theorem.
7. McDougal L. Geometry for enjoyment and challenge / L. McDougal, M. Houghton. – New York, 1991. – 771 с.
8. Об'єм усіченої піраміди [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://reshalkin.in.ua/94-obem-usechennoy-piramidy.html.
9. ДСТУ 7473:2016 Метрологія. Резервуари стаціонарні вимірювальні вертикальні. Методика повірки (калібрування) геометричним методом із застосуванням геодезичних приладів.
10. Основи теорії похибок: Практикум здобувачів освітнього ступеня «магістр» спеціальності 152 «Метрологія та інформаційновимірювальна техніка» усіх форм навчання / [Упоряд. : Трембовецька Р.В., Тичков В.В., Базіло К.В., Куницька Л.Г.,]; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ЧДТУ, 2018. – 170 с.
11. Про затвердження Інструкції про порядок приймання, транспортування, зберігання, відпуску та обліку нафти і нафтопродуктів на підприємствах і організаціях України [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0805-08#Text.
12. Гришко Ю. О. Алгоритми обчислювальної геометрії: Навчальний посібник для студентів факультету комп'ютерних наук та кібернетики / Ю. О. Гришко, О. С. Шкільняк. – Київ, 2020. – 153 с.

REFERENCES

1. Rezervuary ghoryzontaljni [Electronic resource]. https://gazovik-pgo.ru/cat/rgs/ [in Russian].
2. V. I. Kabanov, O. V. Molchanov, E. I. Alatorcev Sposib ghradujuvannja rezervuariv [Electronic resource]. https://www.freepatent.ru/patents/2240514 [in Russian].
3. Ruban M. M. Alghorytmy pobudovy opukloji obolonky [Electronic resource]. https://ddpu.edu.ua/fizmatzbirnyk/2010/p122-126.pdf [in Ukrainian].
4. Chadnov R. V. Algoritmy postroeniya vypuklykh obolochek i ikh primenenie v GIS i SAPR [Electronic resource]. http://www.inf.tsu.ru/library/DiplomaWorks/CompScience/2004/Chadnov/diplom.pdf [in Russian].
5. V. Ju. Klepko, V. L. Gholecj. (2009) Vyshha matematyka v prykladakh i zadachakh: Navchaljnyj posibnyk. 2-ghe vydannja [Higher mathematics in examples and problems: Textbook. 2nd edition]. Kyiv: Centr uchbovoji literatury [in Ukrainian].

6. Shoelace Theorem [Electronic resource]. https://artofproblemsolving.com/wiki/index.php?title=Shoelace_Theorem [in English].
7. L. McDougal, M. Houghton (1991) McDougal L. Geometry for enjoyment and challenge New York: Houghton Mifflin Harcourt Publishing Company [in English].
8. Ob'jem usichenoji piramidy [Electronic resource]. http://reshalkin.in.ua/94-obem-usechennoy-piramidy.html [in Ukrainian].
9. DSTU 7473:2016 Metrologhija. Rezervuary stacionarni vymirjuvaljni vertykaljni. Metodyka povirky (kalibruvannja) gheometrychnym metodom iz zastosuvannjam gheodezychnykh pryladiv [DSTU 7473: 2016 Metrology. Reservoirs are stationary measuring vertical. Method of verification (calibration) by geometric method with the use of geodetic instruments]. [in Ukrainian].
10. Trembovecjka R.V., Tychkov V.V., Bazilo K.V., Kunycjka L.Gh. (2018) Osnovy teoriji pokhybok: Praktykum zdobuvachiv osvitnjogho stupenja «maghistr» specialjnosti 152 «Metrologhija ta informacijnovymirjuvaljna tekhnika» usikh form navchannja [Fundamentals of the theory of errors: Workshop for applicants for the degree of «Master» specialty 152 «Metrology and Information Measurement Technology» of all forms of education]. Cherkasy: Cherkasjkyj derzhavnyj tekhnologhichnyj universytet. [in Ukrainian].
11. Pro zatverdzhennja Instrukciji pro porjadok pryjmannja, transportuvannja, zberighannja, vidpusku ta obliku nafty i naftoproduktiv na pidpryjemstvakh i orghanizacijakh Ukrajiny [Electronic resource]. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0805-08#Text [in Ukrainian].
12. Ghryshko Ju.O., Shkiljnjak O.S. (2020) Alghorytmy obchysljuvaljnoji gheometriji: Navchaljnyj posibnyk dlja studentiv fakuljtetu komp'juternykh nauk ta kibernetyky [Computational Geometry Algorithms: A Textbook for Students of the Faculty of Computer Science and Cybernetics]. Kyiv. [in Ukrainian].

РЕФЕРАТ

Гавриленко О.В. Визначення місткості стаціонарних резервуарів за результатами лазерного сканування / О.В. Гавриленко, О.Г. Жданова, Р.Ш. Назиров, Д.О. Пархоменко, О.А. Шумейко, О.А. Халус // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий журнал. – К.: НТУ, 2022. – Вип. 1 (51).

На поточний момент багато підприємств та організацій мають необхідність зберігати для власних потреб пальне, або інші рідини.

Класичний варіант визначення місткості резервуарів полягає у наповненні їх рідиною, використовуючи лічильник кількості рідини, похибку якого визначають перед початком градуювання для заданої швидкості наповнення. Такий метод є надійним, оскільки все залежить тільки від точності самого лічильника. Принцип роботи простий: використовується трубка з лічильником для подачі рідини для наповнення резервуару до межі (висоти) наповнення. Значення, яке розрахував лічильник і є об’ємом рідини в резервуарі. Але даний метод потребує значної кількості часу і рідини для проведення експерименту і на практиці не завжди є можливим для реалізації.

Альтернативним варіантом є використання лазерного сканера для сканування внутрішньої поверхні резервуару. Обчислення його об’єму проводиться на основі отриманих масивів точок поверхні.

В цій статті буде розглянуто метод визначення місткості резервуарів, який використовує результати лазерного сканування внутрішньої поверхні, та враховує геометричні характеристики та особливості резервуару (граничну висоту наповнення максимальну глибину увігнутостей тощо), значення температури під час сканування; лінійний температурний коефіцієнт розширення матеріалу резервуару.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: РЕЗЕРВУАР, МІСТКІСТЬ, ГРАДУЮВАЛЬНА ТАБЛИЦЯ, КОРЕГУЮЧІ КОЕФІЦІЄНТИ, ЛАЗЕРНИЙ СКАНЕР.

ABSTRACT

Gavrilenko Olena, Zhdanova Olena, Nazirov Rodion, Parkhomenko Dmytro, Shumeiko Oleksiy, Khalus Olena. Determination of the capacity of stationary tanks based on the results of laser scanning. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific journal. – Kyiv: National Transport University, 2022. – Issue 1 (51).

At present, many companies and organizations need to store fuel or other liquids for their own needs.

The classic option for determining the capacity of tanks is to fill them with liquid, using a liquid quantity meter, the error of which is determined before calibration for a given filling speed. This method is reliable because it all depends on the accuracy of the meter. The principle of operation is simple: a tube with

a meter is used to supply liquid to fill the tank to the limit (height) of filling. The value calculated by the meter and is the volume of liquid in the tank. But this method requires a significant amount of time and fluid to conduct the experiment and in practice is not always possible to implement.

An alternative is to use a laser scanner to scan the inner surface of the tank. Its volume is calculated on the basis of the obtained arrays of surface points.

This article will consider the method of determining the capacity of tanks, which uses the results of laser scanning of the inner surface, and takes into account the geometric characteristics and features of the tank (maximum filling height, maximum depth of depressions, etc.), temperature values during scanning; linear temperature coefficient of expansion of the tank material.

KEY WORDS: TANK, CAPACITY, CALIBRATION TABLE, CORRECTION FACTORS, LASER SCANNER.

АВТОРИ:

Гавриленко Олена Валеріївна, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри інформаційних систем та технологій ФІОТ, КПІ імені Ігоря Сікорського, +380935768058, Україна, Київ, вул. Політехнічна, 41, кімната 519, gelena1980@gmail.com, orcid.org/0000-0003-0413-6274

Жданова Олена Григорівна, кандидат технічних, доцент кафедри інформаційних систем та технологій ФІОТ, КПІ імені Ігоря Сікорського, +380502820811, Україна, Київ, вул. Політехнічна, 41, кімната 519, zhdanova.elena@hotmail.com, orcid.org/ 0000-0002-8787-846X

Назиров Родіон Шавкатович, директор товариства з обмеженою відповідальністю «Інноваційний центр Нове життя», +38 (067)407-33-67, Україна, Київ, вул. В. Гавела 6, корп. 17, info@novezhittya.com.ua, orcid.org/0000-0002-5102-3662

Пархоменко Дмитро Олександрович, студент ФІОТ КПІ імені Ігоря Сікорського, +380686087841, Київ, Україна, rainbow77733327@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1735-5679

Шумейко Олексій Андрійович, доцент кафедри інформаційних систем і технологій, Національний транспортний університет, Україна, Київ, Національний транспортний університет, +380664455347, Україна, Київ, shumeyko.ntu.edu.ua@gmail.com, orcid.org/0000-0003-2897-060X

Халус Олена Андріївна, старший викладач кафедри інформатики та програмної інженерії, заступник декана ФІОТ, КПІ імені Ігоря Сікорського, +380503515107, Україна, Київ, Україна, Київ, вул. Політехнічна, 41, кімната 317/3, Selena.ua@gmail.com, orcid.org/0000-0002-5485-7881

AUTHORS:

Olena Gavrylenko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies FIOT, KPI named after Igor Sikorsky, +380935768058, Ukraine, Kyiv, st. Polytechnic, 41, room 519, gelena1980@gmail.com, orcid.org/0000-0003-0413-6274

Olena Zhdanova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies FIOT, KPI named after Igor Sikorsky, +380502820811, Ukraine, Kiev, st. Polytechnic, 41, room 519, zhdanova.elena@hotmail.com, orcid.org/ 0000-0002-8787-846X

Rodion Nazirov, Director of the New Life Innovation Center Limited Liability Company, +380674073367, Ukraine, Kyiv, vul. V. Havela 6, bldg. 17, info@novezhittya.com.ua, orcid.org/0000-0003-1735-5681

Dmytro Parkhomenko, student of FIOT KPI named after Igor Sikorsky, +30686087841, Kyiv, Ukraine, rainbow77733327@gmail.com, orcid.org/0000-0003-1735-5679

Oleksiy Shumeiko, Associate Professor, Department of Information Systems and Technologies, National Transport University, Ukraine, Kyiv, National Transport University, +380664455347, Ukraine, Kyiv, shumeyko.ntu.edu.ua@gmail.com, orcid.org/0000-0003-2897 -060X

Olena Khalus, Senior Lecturer, Department of Informatics and Software Engineering, Deputy Dean of FIOT, KPI named after Igor Sikorsky, +380503515107, Ukraine, Kyiv, st. Polytechnic, 41, room 317/3, Selena.ua@gmail.com, orcid.org/0000-0002-5485-7881

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Баранов Г.Л., професор кафедри інформаційних систем і технологій Національного транспортного університету, доктор технічних наук, професор,

Павлов О.А., доктор технічних наук, професор, професор кафедри ІПІ ФІОТ КПІ ім. Ігоря Сікорського.

REVIEWER:

Baranov G.L., Professor of the Department of Information Systems and Technologies of the National Transport University, Doctor of Engineering, Professor,

Pavlov O.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of IPI FIOT KPI named after Igor Sikorsky.