

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Наукові праці
Донецького національного технічного
університету

**Серія: “Інформатика, кібернетика
та обчислювальна техніка”**

Всеукраїнський науковий збірник

Заснований у травні 1996 року

Виходить 2 рази на рік

№ 2(37) ' 2023

Луцьк – 2024

УДК 004+519.6+519.7

Публікується згідно з рішенням Вченої ради ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (протокол № 2 від 29.02.2024).

Збірник містить наукові статті співробітників ДонНТУ та інших навчальних і наукових закладів України, які є науковими партнерами ДонНТУ. Публікації висвітлюють результати наукових досліджень і розробок в таких напрямках, як інформатика, чисельні методи, паралельні обчислення, програмування, розробка засобів обчислювальної техніки, дослідження комп'ютерних мереж, машинна графіка і обробка зображень, математичне моделювання в різних галузях. Матеріали збірника призначені для наукових співробітників, викладачів, інженерно-технічних працівників, аспірантів та студентів.

Засновник та видавець – Донецький національний технічний університет (ДонНТУ)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Д-р техн. наук, проф. Є.О. Башков (головний редактор); канд. техн. наук, доц. Н.О. Маслова, (заступник головного редактора); член-кореспондент НАН України, д-р техн. наук, проф. В.П. Боюн; д-р техн. наук, проф. О.А. Дмитрієва, д-р техн. наук, проф. О.О. Баркалов; д-р техн. наук, проф. О.В. Вовна; д-р техн. наук, проф. С.Д. Погорілий; д-р техн. наук, проф. О.Н. Романюк; д-р техн. наук, проф. В.А. Святний; д-р техн. наук, проф. Г.Г. Швачич; д-р техн. наук, доц. І.С. Лактіонов; канд. техн. наук, доц. І.Я. Зеленцова; канд. техн. наук, доц. І.А. Назарова (відп. секретар випуску).

Адреса редакції:

Юридична адреса: 85300, Україна, Донецька область, м. Покровськ, пл. Шибанкова, 2, ДВНЗ «ДонНТУ».

Фактична адреса: 43003, Україна, Волинська область, м. Луцьк, вул. Потебні, 56, ДВНЗ «ДонНТУ».

E-mail: yevhen.bashkov@donntu.edu.ua

Збірник зареєстровано в Державному комітеті інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України. Свідоцтво: серія КВ, №7374 від 03.06.2003.

Збірник включено до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії за спеціальностями 121 Інженерія програмного забезпечення, 122 Комп'ютерні науки, 123 Комп'ютерна інженерія (наказ Міністерства освіти і науки України №409 від 17 березня 2020 р.)

Збірник "Наукові праці ДонНТУ, серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка" за наказом № 409 МОНУ від 17. 03.2020 отримав категорію Б.

ЗМІСТ

О. В. Самощенко, Б.С. Гусєв, В.В. Лапко	4
Ділення цілих чисел в доповняльному коді із знакозмінним нулем залишку діленого	
А.О. Нікітенко	15
Системи виявлення мережових вторгнень на основі нейронних мереж глибокого навчання	
Y.E. Horichenko, O.A. Pozdnyakov, A.V. Tulenkov, A.V. Parkhomenko	22
Research and practical implementation of intelligent methods and models for controlling power generation from alternative energy sources	
В.І. Голінько, О.В. Голінько	34
Теоретико-методологічні засади комп'ютерного моніторингу систем вибухозахисту	
Д.Ю. Хома	42
Стеганографічні алгоритми та стегоаналіз на основі класичних методів і нейронних мереж	
М.С. Кондратенко	54
Узгодження математичних та юридичних аспектів при використанні смарт-контрактів	
Д.І. Вініченко, М.Ю. Тягунова, Т.В. Голуб	67
Вибір оптимальної САД-системи для розробки і проєктування ендопротезів	
О.В. Фролов	72
Моделювання зон розсіювання похибок положення стовбуру бурових свердловин та їх відображення	

УДК 519.65:514.182.7:004.92

О. В. Фролов, канд. техн. наук, доц.
Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна
frolgx@gmail.com

Моделювання зон розсіювання похибок положення стовбура бурових свердловин та їх відображення

Розглядається проблема визначення точності положення свердловини в просторі. Актуальність дослідження зумовлена поширеністю використання просторової інформації, що базується на даних геофізичних вимірювань свердловин, для вирішення інженерних завдань. Метою роботи є розробка конструктивної та алгоритмічної моделей визначення зон розсіювання похибок інклінометричних вимірювань, що утворюються навколо бурових свердловин та визначають їхнє положення в просторі надр. Для моделювання був прийнятий метод середнього кута, який відтворює ділянки стовбура свердловини між точками вимірів ланками ламаної лінії, що визначається середніми значеннями вимірювань кутів напрямів середньо квадратичних похибок у формі еліпсоїдів для просторової моделі та еліпсів – для плоскої моделі. Також була розглянута спрощена модель у формі сфер та кіл середньо квадратичних похибок, для яких визначаються лише параметри радіусів. Далі на цій основі отримана модель лінійної інтерполяції значень параметрів зон розсіювання між точками вимірів. Були визначені параметри моделі лінійної інтерполяції, що представляють зони розсіювання в просторі у вигляді конусів, дотичних до сфер розсіювання в точках інклінометричних досліджень. Розроблений алгоритм для комп'ютерного моделювання зон розсіювання на планах, який здійснює побудову зон в формі кіл проєкцій та дотичних до них прямих ліній. Також отримані конструктивний та аналітичний вираз для розрахунку радіуса кола розсіювання в будь-якій точці траєкторії стовбура. Наведені приклади моделювання зон розсіювання похибок навколо бурових свердловин на основі даних реальних даних.

Ключові слова: стовбур свердловини, інклінометричні дослідження, геоінформаційна система, інтерполяція, ламана

DOI: 10.31474/1996-1588-2023-2-37-72-79

Вступ

Основною метою проектування, моніторингу та контролю траєкторії свердловини є визначення просторового розташування траєкторії свердловини. Інформація про просторове розташування свердловин є дуже важливою з точки зору її використання в геоінформаційних системах, оскільки вона потрібна на всіх етапах освоєння родовищ корисних копалин.

На етапі розвідки родовищ просторова інформація по свердловинам використовується для створення уяви про геологічну будову товщі порід (розташування в надрах продуктивних пластів, покладів та порід, структурних особливостей родовища) та запаси корисних копалин.

На етапах будівництва та експлуатації родовищ вимоги до точності та оперативності отримання просторових даних значно підвищуються:

- сучасні методи геологічного моделювання, складення схем розробки родовищ потребують достовірної оцінки початкових та залишкових запасів, локалізації геологічних структур, які ускладнюють ведення робіт;

- бурові свердловини, що перетинають затоплені виробки або водоносні горизонти, і свердловини неякісного затампування належать до небезпечних зон, при цьому ці виробки можливо віднести до виробок з недостовірним контуром, оскільки положення точок перетину та кінцевих точок свердловин визначається, як правило, з досить суттєвими похибками;

- видобуток нафти та газу потребує направленої буріння, контроль за яким використовує просторову інформацію для цілей орієнтування бурового обладнання, недопущення перетину нової свердловини з вже існуючими, попередження бурильників про потенціальні проблеми, визначення місць аварій, викидів та загорянь.

Однак визначення траєкторії свердловини неможливо зробити абсолютно точним через похибки вимірювань і розрахунків. Точність позиціонування траєкторії свердловини можна підвищити за допомогою корекції помилок, але повністю усунути помилку неможливо, тому траєкторія свердловини має невизначеність. При розробці нафтових і газових родовищ із щільною структурою свердловин і тонкими шарами нафти, а також при бурінні морських платформ і

розвантажувальних свердловин, особливо важливо кількісно охарактеризувати невизначеність траєкторії свердловини, щоб зменшити ризик буріння та покращити ефект від розробки нафтогазових родовищ [1].

Таким чином, проблема моделювання зони розсіювання положення стовбура свердловини є актуальною науковою проблемою.

Метою роботи є розробка алгоритму побудови зон розсіювання похибок положення навколо бурових свердловин на планах і картах щодо подальшого використання в геоінформаційних системах.

Інклінометричні дослідження бурових свердловин та їх похибки

Інклінометричні дослідження проводять в окремих точках траєкторії стовбура свердловини за допомогою інклінометрів – приборів, що вимірюють параметри траєкторії за допомогою магнітних (або гіроскопічних) та гравітаційних датчиків [1]. Ці вимірювання можуть проводитись як в процесі буріння свердловини, так і після його закінчення.

Параметрами траєкторії стовбура свердловини, що вимірюються при інклінометричних дослідженнях є величини азимуту α та зенітного кута θ в точках траєкторії стовбура, а також відстань Δl між точками вимірювань.

Із свердловиною пов'язують систему прямокутних координат, що має початок в усті свердловини та наступні напрями осей:

z – донизу за напрямом прямовисних ліній;

x – за північним напрямом географічного або магнітного меридіану;

y – за східним напрямом відповідної паралелі або перпендикулярно до осей x та z .

Задача побудови траєкторії стовбура свердловини полягає в тому [2], щоб за відомим масивом інклінометричних вимірів визначити координати відповідних точок в системі координат, що пов'язана з устям свердловини, тобто визначити глибину та горизонтальні зміщення по осям x та y .

Проекції (dx, dy, dz) елементарного інтервалу (dl) стовбура свердловини:

$$\begin{aligned} dx &= dl \cos \alpha \sin \theta, \\ dy &= dl \sin \alpha \sin \theta, \\ dz &= dl \cos \theta. \end{aligned} \quad (1)$$

Інтегруючи ці вирази по довжині інтервалу можливо отримати елементарні переміщення, але, оскільки значення функцій $\alpha = \alpha(l)$ та $\theta = \theta(l)$ відомі тільки в точках вимірювань, відомі методи обчислення координат траєкторії стовбура свердловини використовують встановлені закономірності зміни зенітного кута та азимуту (їх згладжені залежності), або вважають відомою

геометрію самого інтервалу [3].

Одним із простих та ефективних методів обчислення координат точок траєкторії свердловини є метод середнього кута [4]. Розрахункові формули координат з урахуванням припущень для цього методу мають вигляд:

$$\begin{aligned} x &= \sum_{i=2}^n l_i \cdot \sin \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \cos \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2}; \\ y &= \sum_{i=2}^n l_i \cdot \sin \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \sin \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2}; \\ z &= \sum_{i=2}^n l_i \cdot \cos \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

де l_i – довжина інтервалу між точками $i-1$ та i ;

θ_{i-1}, θ_i – зенітні кути відповідно в верхній та нижній точках інтервалу вимірювань;

α_{i-1}, α_i – азимуту в цих точках.

Детальне вивчення похибок інклінометричних досліджень можна знайти в роботі [5], де зазначені похибки були умовно поділені на три групи:

- інструментальні;

- технологічні;

- похибки обробки результатів вимірювань.

Перші дві групи складають похибки прибору як засобу вимірювань та похибки пов'язані з технологією проведення вимірювань. Ці похибки враховуються даними про точність вимірювань зенітних кутів та азимутів конкретного інклінометра та поправками до вимірюваних кутів. При цьому в діапазоні малих зенітних кутів ($0^\circ - 50^\circ$) похибки азимутів, як правило, корелюють зі значеннями зенітних кутів [4].

Третя група похибок характеризується обраним методом розрахунку координат точок свердловини [4, 5]. Різна точність методів обумовлюється різним характером «чутливості» методів до похибок вимірюваних величин.

Методичні похибки, властиві різним методам розрахунку координат, мають досить значний розкид від методу до методу і залежать, в першу чергу, від обраного методу розрахунку координат, кроку вимірювань і параметрів викривлення осі свердловини. Гранична (максимальна) і середньоквадратична похибки визначення координати, що характеризують розсіювання координат точок осі свердловини (так звані кола або еліпси розсіювання), визначаються за формулами [6]:

$$\delta_k = \sum_i^n \sum_j^s \left| \frac{\partial F_{ik}}{\partial x_j} \right| \delta_{x_j}, \quad (3)$$

$$m_k = \sqrt{\sum_i^n \sum_j^s \left(\frac{\partial F_{ik}}{\partial x_j} m_{x_j} \right)^2}. \quad (4)$$

де δ_k, m_k – гранична та середньоквадратична

похибки відповідно;

F_k - функція, за якої обчислюється k -та координата на i -му інтервалі;
 x_j - аргументи, що вимірюються (довжина, азимут та зенітний кут).

Моделі розсіювання похибок у точках вимірювань

Розглянемо найбільш повну модель розподілу похибок у просторі у вигляді еліпсоїда, яка враховує нерівномірність розсіювання за напрямками [3, 5].

Для визначення параметрів еліпсоїда похибок необхідно скласти коваріаційну матрицю похибок координат точки траєкторії:

$$K_{xyz} = \begin{pmatrix} m_x^2 & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & m_y^2 & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & m_z^2 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

де K_{xyz} – коваріаційна матриця, яка є симетричною відносно головної діагоналі, тобто, наприклад, $K_{xy} = K_{yx}$;

m_x, m_y, m_z – середньоквадратичні похибки (СКП) функцій, що визначають координати точки;
 K_{xy}, K_{xz}, K_{yz} – кореляційні моменти відповідних оцінюваних функцій.

Вирази для СКП координат точки траєкторії отримують за відомою формулою похибки функції виміряних величин [4], що виражається формулою (4).

Складемо вирази квадрату СКП методу середнього кута – (2).

Будемо мати:

$$\begin{aligned} m_x^2 &= \sum_{i=2}^n \sin^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \cos^2 \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} m_i^2 + \\ &+ \frac{1}{2} \left(\sum_{i=2}^n l_i^2 \left(\cos^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \cos^2 \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} m_\theta^2 + \right. \right. \\ &\left. \left. + \sin^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \sin^2 \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} m_\alpha^2 \right) \right); \\ m_y^2 &= \sum_{i=2}^n \sin^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \sin^2 \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} m_i^2 + \\ &+ \frac{1}{2} \left(\sum_{i=2}^n l_i^2 \left(\cos^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \sin^2 \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} m_\theta^2 + \right. \right. \\ &\left. \left. + \sin^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \cos^2 \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} m_\alpha^2 \right) \right); \\ m_z^2 &= \sum_{i=2}^n \left(\cos^2 \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2} m_i^2 + \frac{1}{2} l_i^2 \sin^2 \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2} m_\theta^2 \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Вирази для кореляційних моментів отримаємо на основі наступної формули [6]

$$K_{ls} = \sum_j^k \frac{\partial f_l}{\partial x_j} \frac{\partial f_s}{\partial x_j} m_{x_j}^2, \quad (7)$$

де f_l, f_s – вирази функцій, між якими визначається кореляційний момент.

Отримаємо:

$$\begin{aligned} K_{xy} &= \sum_{i=2}^n \sin^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \sin \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} \cos \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} m_i^2 + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n l_i^2 \sin \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} \cos \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} \left(\cos^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} m_\theta^2 - \right. \\ &\left. - \sin^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} m_\alpha^2 \right); \\ K_{xz} &= \sum_{i=2}^n \sin \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \cos \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \cos \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} \cdot \\ &\cdot \left(m_i^2 - \frac{1}{2} l_i^2 m_\theta^2 \right); \\ K_{yz} &= \sum_{i=2}^n \sin \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \cos \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \sin \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} \cdot \\ &\cdot \left(m_i^2 - \frac{1}{2} l_i^2 m_\theta^2 \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Головні радіуси еліпсоїда похибок знайдемо, як власні значення матриці похибок, із характеристичного рівняння третього порядку [7]:

$$\lambda^3 - I_1 \lambda^2 + I_2 \lambda - I_3 = 0, \quad (9)$$

де: I_1, I_2, I_3 – інваріанти рівняння (9), що у випадку матриці (5) мають вигляд:

$$\begin{aligned} I_1 &= m_x^2 + m_y^2 + m_z^2; \\ I_2 &= \begin{vmatrix} m_x^2 & K_{xy} \\ K_{yx} & m_y^2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} m_x^2 & K_{xz} \\ K_{zx} & m_z^2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} m_y^2 & K_{yz} \\ K_{zy} & m_z^2 \end{vmatrix}; \\ I_3 &= \begin{vmatrix} m_x^2 & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & m_y^2 & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & m_z^2 \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

Розв'язавши рівняння (9) відносно λ , отримаємо три корені λ_1, λ_2 та λ_3 , з яких можна знайти головні радіуси

$$a = \sqrt{\lambda_1}, b = \sqrt{\lambda_2}, c = \sqrt{\lambda_3}; \quad (11)$$

де для більшого кореню використано позначення λ_1 , середнього - λ_2 , а для меншого - λ_3 .

Напрями головних осей еліпсоїда отримаємо із системи рівнянь [7]

$$\begin{cases} (m_x^2 - \lambda) \cos \alpha + K_{xy} \cos \beta + K_{xz} \cos \gamma = 0; \\ K_{yx} \cos \alpha + (m_y^2 - \lambda) \cos \beta + K_{yz} \cos \gamma = 0; \\ K_{zx} \cos \alpha + K_{zy} \cos \beta + (m_z^2 - \lambda) \cos \gamma = 0, \end{cases} \quad (12)$$

де λ – корінь характеристичного рівняння (9), якому відповідає напрямок, що утворює з координатними осями x, y, z відповідно кути α, β, γ .

Підставляючи до системи (12) значення коренів λ_1, λ_2 , та λ_3 отримаємо напрями головних діаметрів $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1), (\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$ та $(\alpha_3, \beta_3, \gamma_3)$, які є взаємно перпендикулярними.

Щоб перейти до побудови еліпсоїда напишемо його параметричні рівняння відносно головних осей, за які прийняті осі x, y, z декартової просторової системи координат

$$x' = a \cos u \cos v, y' = b \sin u \cos v, z' = c \sin v. \quad (13)$$

Підставляючи праву частину цих формул

замість x', y', z' до формул перетворення координат відносно локальної системи координат свердловини:

$$\begin{aligned}x &= x_i + l_1 x' + l_2 y' + l_3 z'; \\y &= y_i + m_1 x' + m_2 y' + m_3 z'; \\z &= z_i + n_1 x' + n_2 y' + n_3 z',\end{aligned}\quad (14)$$

де: x_i, y_i, z_i - координати точки осі свердловини, в якій визначається еліпсоїд розсіювання;

$l_i = \cos \alpha_i, m_i = \cos \beta_i, n_i = \cos \gamma_i$ - коефіцієнти перетворення.

Щоб спростити модель, разом із еліпсоїдом похибок, що визначає просторовий розподіл, застосовують сферу похибок [4], радіус якої дорівнює

$$M_{\text{сф}} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}. \quad (15)$$

За аналогією з просторовою моделлю, задля спрощення обчислень на практиці є розповсюдженнями побудови на планах гірничих робіт кіл розсіювання, що заміняють еліпси радіуси яких визначаються за формулою (15) у випадку якщо потрібно врахувати похибки за глибиною, або за виразом:

$$M_{\text{пл}} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}, \quad (16)$$

якщо потрібно враховувати тільки похибки положення на плані.

Отримані залежності дозволяють будувати зони розсіювання в точках інклінометричних досліджень. З метою отримання оцінювання розмірів зон уздовж всієї свердловини, розробимо модель інтерполяції значень параметрів зон між точками вимірів.

Алгоритм побудови зон розсіювання похибок положення навколо бурових свердловин

В роботі [6] була запропонована модель зони розсіювання похибок у вигляді еліптичних циліндрів, що є дотичними до еліпсоїдів похибок у точках вимірювань. Зона розсіювання є поверхнею, що огинає сімейство таких циліндрів. Реалізація такої моделі потребує відносно складних розрахунків і на практиці може бути спрощена за рахунок заміни еліпсів та еліпсоїдів відповідними колами та сферами, отриманими на основі формул (16) та (15).

Отже, згідно з прийнятим методом розрахунку траєкторії стовбура свердловини, який передбачає лінійну інтерполяцію ділянок стовбуру між точками вимірів, буде прийнятим розповсюдження лінійної залежності між параметрами зон розсіювання. При цьому для подальшого використання бажано мати придатну для конструктивних побудов модель. Тому зупинимось на моделі представлення зони розсіювання в кожній точці стовбуру у вигляді сфери радіусу (15) – для просторового

представлення, або відповідних кіл радіусів (15) або (16) – для представлення на плані:

$$r_i = \sqrt{m_{xi}^2 + m_{yi}^2 + m_{zi}^2},$$

або

$$r_i = \sqrt{m_{xi}^2 + m_{yi}^2}. \quad (17)$$

Лінійно інтерполюючи радіуси між обчисленими в кінцевих точках ланок просторової ламаної осі свердловини будемо мати конуси як огинаючи поверхні відповідних сімей сфер. Аналогом такої інтерполяції на площині буде побудова спільних зовнішніх дотичних до кіл розсіювання у точках вимірів. Перейдемо до розгляду аналітичної моделі. На основі виразів (17) отримаємо послідовності відповідних радіусів, а на основі виразів (2) знайдемо координати відповідних їм центрів сфер та кіл. Введемо позначення для радіусів r_i , для центрів – x_{ci}, y_{ci}, z_{ci} ($i=0..k$), де x_{c0}, y_{c0}, z_{c0} визначають координати устя свердловини, x_{ck}, y_{ck}, z_{ck} відповідають розрахунку координат в останній точці вимірювань.

Далі, для кожної пари сфер (кіл) визначимо параметри перетворення координат до нової системи з початком в поточній точці P_i .

Для просторової моделі вісь z' нової системи сумістимо з напрямом осі свердловини від поточної точки P_i в сторону точки P_{i+1} . Щоб отримати орт осі свердловини, скористаємось наступними виразами:

$$\begin{aligned}x_{i,i+1} &= x_i - x_{i+1}, \\y_{i,i+1} &= y_i - y_{i+1}, \\z_{i,i+1} &= z_i - z_{i+1}\end{aligned}\quad (19)$$

Напрявні косинуси цієї осі матимуть вигляд:

$$l_{3i} = \frac{x_{i,i+1}}{|l_{i,i+1}|}, m_{3i} = \frac{y_{i,i+1}}{|l_{i,i+1}|}, n_{3i} = \frac{z_{i,i+1}}{|l_{i,i+1}|}, \quad (20)$$

де $|l_{i,i+1}| = \sqrt{x_{i,i+1}^2 + y_{i,i+1}^2 + z_{i,i+1}^2}$.

В умовах моделі ми вільні в обранні напрямів осей x', y' в площині, що перпендикулярного до обраного напрямку та проходить через точку P_i . Задля визначеності приймемо, наприклад, за напрямом осі x' напрям відрізка, що з'єднує проекцію устя свердловини на цю площину з точкою P_i (у випадку, коли ця проекція є невизначеною вісь свердловини збігається за напрямом з віссю z , а, отже, перетворення координат буде паралельним перенесенням). Координати цього відрізка

$$x_{0,i} = x_i, y_{0,i} = y_i, z_{0,i} = -\frac{x_i l_i + y_i m_i}{n_i}. \quad (21)$$

Нормуючи вектор цього напрямку, отримуємо напрямні косинуси осі x' :

$$l_{1,i} = \frac{x_{0,i}}{|p_{0,i}|}, m_{1,i} = \frac{y_{0,i}}{|p_{0,i}|}, n_{1,i} = \frac{z_{0,i}}{|p_{0,i}|}. \quad (22)$$

Напрямок орта осі y' можна знайти за звичайними формулами векторного добутку вже знайдених ортів:

$$\begin{aligned} l_{2,i} &= m_{3,i}n_{1,i} - m_{1,i}n_{3,i}, \\ m_{2,i} &= n_{3,i}l_{1,i} - n_{1,i}l_{3,i}, \\ n_{2,i} &= l_{3,i}m_{1,i} - l_{1,i}m_{3,i} \end{aligned} \quad (23)$$

Конус, дотичний до сфер розсіювання похибок в точках P_i та P_{i+1} , має своєю віссю вже визначений напрямок поточної ділянки осі свердловини. Його параметричні рівняння в новій системі можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} x' &= \left(\frac{r_i}{\cos \alpha} + u \sin \alpha \right) \cos v, \\ y' &= \left(\frac{r_i}{\cos \alpha} + u \sin \alpha \right) \sin v, \\ z' &= u \cos \alpha \end{aligned} \quad (24)$$

де α – кут нахилу твірної дотичного конусу.

Цей кут, його косинус та синус можливо отримати з виразів:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_i &= \frac{\sqrt{|\bar{l}_{i,i+1}|^2 - (r_{i+1} - r_i)^2}}{|\bar{l}_{i,i+1}|}, \quad \sin \alpha_i = \frac{r_{i+1} - r_i}{|\bar{l}_{i,i+1}|}, \\ \alpha_i &= \arctg \frac{r_{i+1} - r_i}{\sqrt{|\bar{l}_{i,i+1}|^2 - (r_{i+1} - r_i)^2}} \end{aligned} \quad (25)$$

Межі зміни параметру v є стандартними $-\pi$ до π , параметр u повинен змінюватись в межах кіл дотику конуса зі сферами, цей інтервал може бути отриманий з виразів:

$$\left[-r_i \sin \alpha_i, |\bar{l}_{i,i+1}| - r_i \sin \alpha_i \right]. \quad (26)$$

Перейдемо до розгляду побудов на плані. В цьому випадку напрямок осі x' нової системи будемо визначати горизонтальною проекцією \bar{l}_i поточної ланки ламаної осі свердловини. Цей напрямок може бути отриманий за аналогією з просторовою схемою:

$$\cos \varphi_i = \frac{x_{i,i+1}}{|\bar{l}_{i,i+1}|}, \quad \sin \varphi_i = \frac{y_{i,i+1}}{|\bar{l}_{i,i+1}|}, \quad (27)$$

де $|\bar{l}_{i,i+1}| = \sqrt{x_{i,i+1}^2 + y_{i,i+1}^2}$ – довжина горизонтальної проекції.

Тоді кут між дотичними до кіл розсіювання та новою віссю x' може бути визначений як

$$\alpha_i = \arctg \frac{r_{i+1} - r_i}{\sqrt{|\bar{l}_{i,i+1}|^2 - (r_{i+1} - r_i)^2}}. \quad (28)$$

Рівняння спільної дотичної кіл r_i, r_{i+1}

$$y' = y'_{li} + \frac{y'_{2i} - y'_{li}}{x'_{2i} - x'_{li}} (x' - x_{li}) \quad (29)$$

де $x_{li} = -r_i \sin \alpha_i, y_{li} = \pm r_i \cos \alpha_i,$

$$x_{2i} = |\bar{l}_{i,i+1}| - r_{i+1} \sin \alpha_{i+1}, y_{2i} = \pm r_{i+1} \cos \alpha_{i+1}. \quad (30)$$

Підставивши рівняння (29) замість y' при обчислених параметрах до формул перетворення координат на площині, отримуємо рівняння прямої:

$$\begin{aligned} x &= x_i + x' \cos \varphi_i - y' \sin \varphi_i, \\ y &= x_i + x' \sin \varphi_i + y' \cos \varphi_i. \end{aligned} \quad (31)$$

Щоб побудувати два відрізка прямих ліній дотичних до кіл розсіювання, потрібно у вирази (29) та (31) при різних значеннях подвійного знаку в (30) підставити значення x' межах зміни від x_{1i} до x_{2i} .

Отже, на основі отриманих залежностей можна сформулювати наступний алгоритм побудови зони розсіювання похибок навколо свердловини на плані:

- побудувати кола радіусів r_j в точках P_j ($j = 0, \dots, k$);
- для кожної i -ї точки інклінометричних досліджень від 0 до $k-1$:

- 1) обчислити довжину проекції $|\bar{l}_{i,i+1}|$;
- 2) перевірити значення $|\bar{l}_{i,i+1}|$ на рівність нулеві, якщо $|\bar{l}_{i,i+1}| = 0$ перейти до наступної точки;
- 3) при $|\bar{l}_{i,i+1}| > 0$ розрахувати значення $\cos \varphi_i$ та $\sin \varphi_i$ за формулами (27) та визначити кут α_i за формулою (25);
- 4) розрахувати параметри $x_{1i}, y_{1i}, x_{2i}, y_{2i}$ за виразами (30);
- 5) побудувати два відрізка прямих ліній за виразами (29) та (31) при різних значеннях подвійного знаку в (30) та межах зміни x' від x_{1i} до x_{2i} .

На рис. 1 зображено результати моделювання зон розсіювання побудовані на основі даних реальних інклінометричних досліджень свердловин Н5552 та Н 3956 шахти «Капітальна» ДП «Мирноградвугілля», що були побудовані за запропонованим алгоритмом. В інженерній практиці може виникнути потреба побудови зони розсіювання похибки на певному горизонті (рівні глибини свердловини). Виконавши графічні побудови за розробленим алгоритмом, розв'язок цієї задачі не визиває ускладнень.

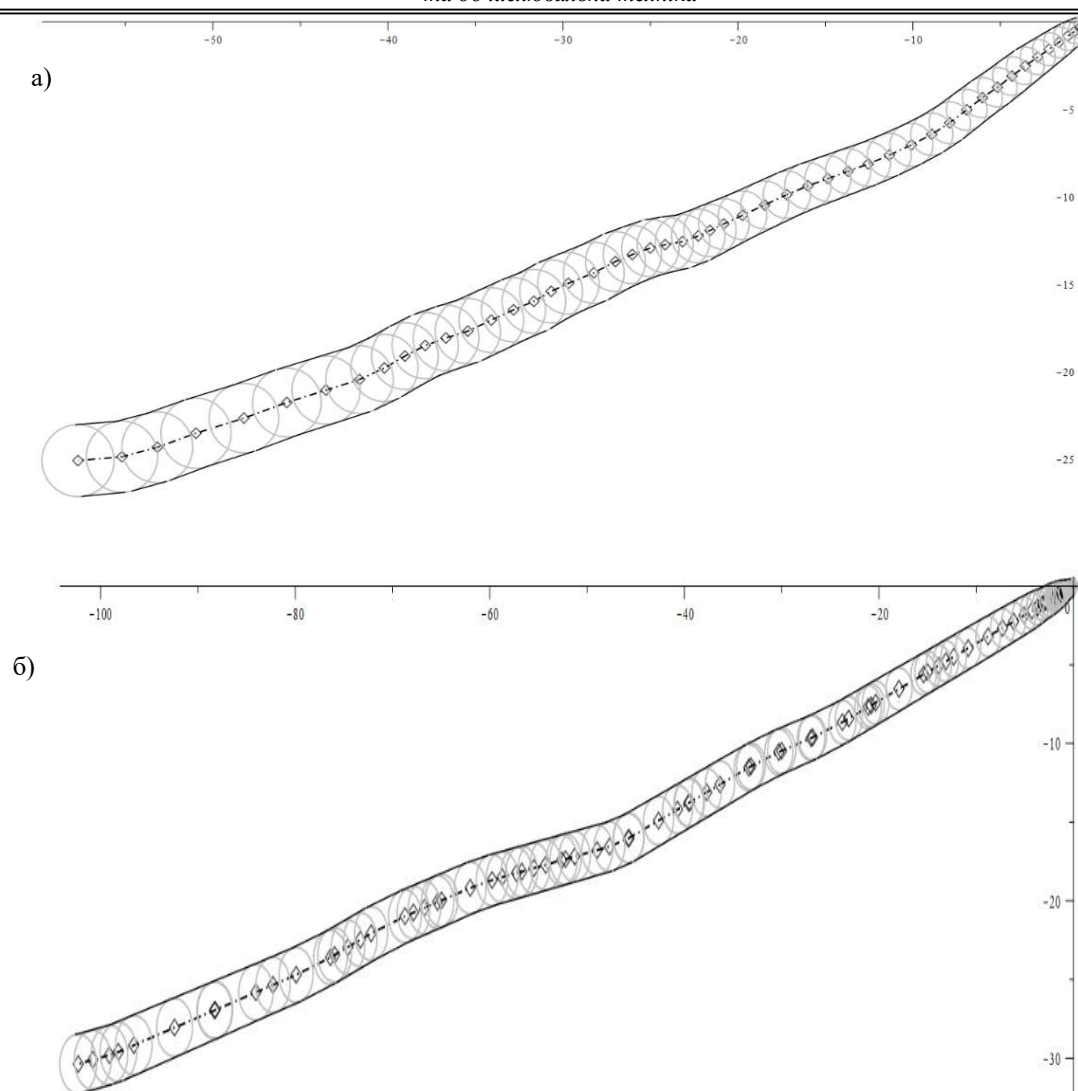


Рисунок 1 – Результати моделювання зон розсіювання побудовані на основі даних реальних інклінометричних досліджень свердловин Н5552 (а) та Н 3956 (б) шахти «Капітальна» ДП «Мирноградвугілля»

Можна запропонувати, як конструктивний, так аналітичний варіант розв'язку. За конструктивним варіантом спочатку методом графічної інтерполяції знаходиться точка на осі стовбура свердловини – P_{-126} (рис. 2), що має задану глибину.

Далі, з цієї точки будується перпендикуляр до будь-якої з двох відповідних дотичних на плані і на перетині з дотичною отримується точка (\bar{P}_{-126}), відстань від точки стовбура до якої визначатиме радіус (r_{-126}) шуканого кола розсіювання. Аналітичний розв'язок для радіусу залежить від відстані x'_j (між відомою i -ю точкою на плані та потрібною точкою осі) дає вираз:

$$r_j = r_i + x'_j \sin \alpha_i. \quad (32)$$

Обговорення результатів та висновки

В роботі було розглянуто залежності, що дозволяють розраховувати параметри еліптичних та кругових зон розсіювання похибок положення точок стовбура свердловин на плані та в просторі. На цій основі було запропоновано спрощений алгоритм для побудови зон у вигляді кіл (сфер) та дотичних до них (дотичних конусів). Проведено комп'ютерне моделювання за розробленим алгоритмом побудови зон розсіювання. Отримана в роботі математична модель побудови зон розсіювання похибок навколо бурових свердловин є простою та ефективною з точки зору її реалізації у геоінформаційних системах [8], таких як, наприклад, K-MINE [9]. Алгоритм, що реалізує зазначену модель, визначається лінійною складністю – $O(n)$.

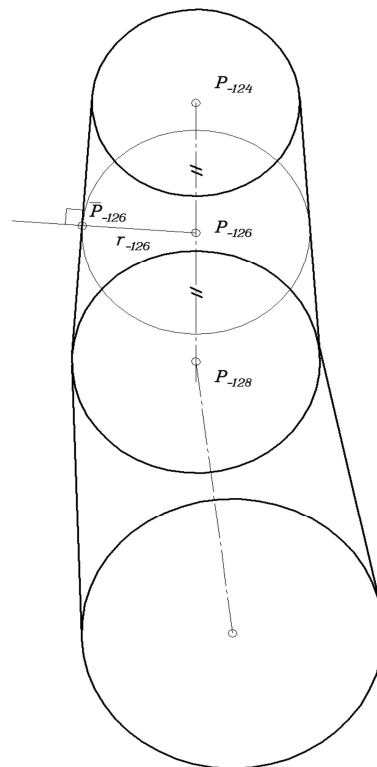


Рисунок 2 – Побутова кола розсіювання на заданій глибині

Список літератури

1. Well Trajectory Measurement Error Based on Gyro Survey / Diao B. et. al.; 5th International Conference on Green Energy and Sustainable Development. E3S Web Conf., 2022. vol. 358. 5 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235801008/>
2. Liu X. Quantitative recognition method for borehole trajectory models. Petrol. Explor. Develop., 2018. Vol. 45, No. 1. P. 154–158. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(18\)30015-6](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(18)30015-6)
3. Близнюк В.О., Фролов В.О. Моделювання траєкторій скривлених свердловин методом гелікоїдальних дуг. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка, Покровськ, 2017. №2, № 25. С. 12–21.
4. Халимендик Ю.М., Фролов В.О. Врахування похибок інклінометричних досліджень при визначенні меж небезпечних зон за проривами води у бурових свердловин. Вісті Донецького гірничого інституту, Покровськ, 2018. №1(42). С. 7–15. DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2018-1-7-15/>
5. Diao B., Gao B., Jiang C. Contribution Rate of MWD Survey Error Sources on Well Trajectory Measurement Error. 2019 International Conference on Oil & Gas Engineering and Geological Sciences 28–29 September 2019, Dalian, China. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. Vol. 384. 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/384/1/012226>
6. Liu X. Borehole trajectory uncertainty and its characterization. Petrol. Explor. Develop., 2019. Vol.46(2). P. 407–412. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(19\)60021-2](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(19)60021-2).
7. Каленюк П., Рибицька О., Івасик Г. Лінійна алгебра та аналітична геометрія: навч. посіб. / перекл. Яромира Войтовича; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2019. 160 с.
8. Xiao N. GIS Algorithms: Theory and Applications for Geographic Information Science & Technology. SAGE Publications Ltd, 2016. 336 p.
9. K-MINE: Комплексні рішення для гірничодобувної промисловості. URL: <https://k-mine.com/ua/> (Дата звернення 02.01.2024)

References

1. Diao, B., et al. (2022), "Well Trajectory Measurement Error Based on Gyro Survey", *5th International Conference on Green Energy and Sustainable Development*, 358, 5 p.

2. Liu, X. (2018), "Quantitative recognition method for borehole trajectory models", *Petrol. Explor. Develop.*, 45(1), pp. 154–158.
3. Bliznuk, V., Frolov, O. (2017), "Modeling of well trajectories by the method of helicoidal arcs" [Modeliuvannya traiektorii skryvlenykh sverdlodyn metodom helikoidalnykh duh], Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: "Informatics, Cybernetics and Computer Science", 2(24), pp. 12-21.
4. Khalymendyk, Y., Frolov, O. (2018), "Accounting of inclinometer survey errors and determination of borders of dangerous areas around drilling wells" [Vrakhuvannya pokhybok inklinometrychnykh doslidzhen PRY vyznachenni mezh nebezpechnykh zon za proryvamy vody u burovykh sverdlodyn], *Journal of Donetsk Mining Institute*, 1(48), pp. 7-15.
5. Diao, B., Gao, B., Jiang, C. (2019), "Contribution Rate of MWD Survey Error Sources on Well Trajectory Measurement Error", *2019 International Conference on Oil & Gas Engineering and Geological Sciences 28–29 September 2019, Dalian, China*, 384, 8 p.
6. Liu, X. (2019), "Borehole trajectory uncertainty and its characterization" *Petrol. Explor. Develop.*, 46(2), pp. 407–412.
7. Kaleniuk, P., Rybyska, O., Ivasyk, H. (2019), *Linear Algebra and Analytic Geometry. [Liniina alhebra ta analitychna heometriia: navch. posib. / perekl. Yaromyra Voitovycha; M-vo osvity i nauky Ukrainy, Nats. un-t «Lviv. politehnika»] Basic Course, Lviv Polytechnic*, 160 p.
8. Xiao, N. (2016), *GIS Algorithms: Theory and Applications for Geographic Information Science & Technology*, SAGE Publications Ltd, 336 p.
9. K-MINE: End-to-end Mining Industry Software & Mining Consulting [Kompleksni rishennia dlia hirnychodobuvnoi promyslovosti], available at: <https://k-mine.com/>

Надійшла до редакції 13.12.2023

O. FROLOV

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine
frolgx@gmail.com

DISPERSION ZONES OF BOREHOLE POSITION ERRORS AND THEIR DISPLAY

The problem of determining the accuracy of the well position in space is considered. The relevance of the study is due to the prevalence of the use of spatial information, based on geophysical measurements of wells, to solve engineering problems. The aim of the work is to develop constructive and analytical models for defining the distribution zones of inclinometric measurement errors that form around boreholes and determine their position in the underground space. The methods of calculation of wellbore trajectory points and methods of calculation of errors of their position were analyzed in the work. For modeling, the method of the mean angle was adopted, which reproduces the sections of the wellbore between the measurement points by the segments of the polyline, which is determined by the average values of the angle measurements of the directions. The expressions that define the parameters of the shape and position of the distribution zones of the mean square errors have the form of ellipsoids for the spatial model and ellipses for the plane model are obtained. A simplified model in the form of spheres and circles of mean square errors, for which only the parameters of radii are determined, was also considered. The obtained expressions were used in the model of linear interpolation of the parameters values of the zones between the measurement points. The parameters of the linear interpolation model representing the distribution zones in space as the form of cones tangent to the spheres at the points of inclinometric researches were determined. An algorithm for computer modeling on plans has been developed, which constructs zones in the form of circles of projections and straight lines tangent to them. A constructive and analytical expression for calculating the radius of the circle at any point of the trajectory is also obtained. Examples of modeling of error distribution zones around boreholes based on real data are given.

Keywords: *wellbore, inclinometric observations, geoinformation system, interpolation, polyline*