

ГІРНИЦТВО MINING

УДК 622.1:528

doi:[10.31474/1999-981X-2018-1-7-15](https://doi.org/10.31474/1999-981X-2018-1-7-15)Ю.М. Халимендик
О.В. Фролов

ВРАХУВАННЯ ПОХИБОК ІНКЛІНОМЕТРИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ МЕЖ НЕБЕЗПЕЧНИХ ЗОН ЗА ПРОРИВАМИ ВОДИ У БУРОВИХ СВЕРДЛОВИН

Мета. Метою роботи є вдосконалення методології визначення меж безпечного ведення гірничих робіт у бурових свердловин шляхом врахування похибок положення свердловини в масиві гірських порід.

Методи досліджень. У роботі застосовані загальні наукові методи аналізу та синтезу, методи математичної обробки маркшейдерсько-геодезичних вимірювань, методи геометричного моделювання.

Результати. Проаналізовано існуючі методики визначення меж небезпечних зон за проривами води навколо бурових свердловин та складові розрахункових формул для визначення ширини цих зон. Розглянуто питання аналізу точності інклінометричних вимірювань у контексті врахування похибок координат стовбуру свердловини при побудові меж небезпечних зон за проривами води у незатампованих або неякісно затампованих свердловин. Порівняно результати розрахунку координат точок свердловин, отриманих за різними методами апроксимації траєкторії стовбура. Отримані формули для розрахунку параметрів зон та досліджені зони розсіювання похибок у вигляді еліпсів, отримані також за різними методами розрахунку траєкторії свердловини. Показано, що збільшення розмірів зони розсіювання координат за правилом «трьох сигм» дозволяє в достатній мірі «згладити» похибки менш точного методу розрахунку. Порівняні розміри кругових та еліптичних зон середньоквадратичних похибок навколо точки осі свердловини. Побудовано графік зміни розміру зони розсіювання координат по глибині свердловини. Проаналізовано вплив нерівномірності розсіювання похибок координат на форму меж небезпечної зони.

Наукова новизна. Науковою новизною роботи є запропонована методика врахування похибок вимірювань при визначенні меж зон безпечного ведення гірничих робіт у бурових свердловин. Також вперше було встановлено, вплив глибини свердловини на розміри зони похибок носить характер квадратичної залежності, яка може бути застосована для оцінювання похибок у точках свердловини

Практична значимість. Практичним результатом роботи можна вважати підвищення надійності встановлення меж зон безпечного ведення гірничих робіт у бурових свердловин, що сприяє запобіганню проривам води в гірничі виробки шахт, а, отже, підвищує безпеку праці робітників.

Ключові слова: небезпечна зона, свердловина, інклінометрична зйомка, азимут, зенітний кут, еліпсоїд похибок, кореляційний момент, еквідистанта.

Вступ.

Однією з задач маркшейдерської служби гірничого підприємства є встановлення меж небезпечних зон. Так, ведення гірничих робіт в зонах небезпечних за проривами води передбачає заходи щодо запобігання проривам у діючі виробки. Бурові свердловини, що перетинають затоплені виробки або водоносні горизонти, і свердловини неякісного затамповування належать до зазначених зон [1]. 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. В таких умовах, замість бар'єрного цілика, будують межу безпечного ведення гірничих робіт. Отже, оцінка та врахування похибок

вимірювань при визначенні меж зон безпечного ведення гірничих робіт у бурових свердловин становить актуальну наукову проблему.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

При визначенні розмірів зон безпечного ведення гірничих робіт користуються наступною формулою Інструкцій [2, 3] для визначення ширини небезпечної зони або бар'єрного цілика:

$$d = 5m + 0,05H + \Delta l, \quad (1)$$

де: m - потужність пласта, м;

H - глибина розташування пласта в небезпечній зоні, м;

Δl - похибка положення затопленої виробки, м.

Обговорення змісту та походження

перших двох складових цієї формули, які носять емпіричний характер, можливо знайти в роботі. Зосередимо увагу на останньої складової формули (1).

В Інструкції [2] похибка Δl визначена рівною

$$\Delta l = 0,0011 \cdot l, \quad (2)$$

де: l – сумарна протяжність теодолітних ходів (рахуючи від вузлової точки або початкової маркшейдерських точок), що використовуються для визначення контуру затоплених виробок або меж небезпечної зони, м.

У випадку незатампованих та неякісно затампованих бурових свердловин меж небезпечних зон будуються у вигляді кола, за центр якого при наявності даних приймається точка перетину пласта свердловиною. Радіус цього кола розраховується за формулою (1) з урахуванням виразу (2), в якому за величину l приймають протяжність теодолітного ходу, який використовується для визначення координат устя свердловини.

В Інструкції [3] зазначено, що в умовах необсаджених свердловин радіус кругової зони розраховують за формулою (1) зі збільшенням отриманого значення на 5 м. При цьому значення Δl приймається рівним похибці визначення положення свердловини, що оцінюється головним маркшейдером шахти. В [3] стверджується, що похибку визначення положення свердловини в пласті за даними інклінометрії в першому наближенні можливо прийняти рівною

$$m_0 = 0,0227H. \quad (3)$$

Для забезпечення ймовірності зустрічі до 0,99 за правилом «трьох сигм» радіус кола розрахований по цій формулі рекомендується збільшити в 3 рази. Однак про те, яким чином розраховується положення точки перетину свердловини з пластом, яка потім відображується на плані гірничих робіт, в документі [3] не йдеться.

В роботі [5] для визначення середньої квадратичної похибки (СКП) планового положення точок осі свердловини запропонована формула, яка враховує викривлення свердловини:

$$m_s = \pm \frac{H}{300} \sqrt{\frac{6,653 + (n + 953)K^2}{n}}, \quad (4)$$

де: n – кількість інтервалів зйомки від устя до досліджуваної точки свердловини;

K – коефіцієнт, який враховує скривленість свердловини та дорівнює відношенню її проекції від устя до розглядуваної точки до довжини свердловини у тому ж інтервалі.

Більш детальне вивчення похибок інклінометричних досліджень можна знайти в роботі [6], де зазначені похибки були умовно поділені на три групи:

- 1) Інструментальні;
- 2) Технологічні;
- 3) 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 ($0-5^0$) похибки азимутів, як правило, корелюють зі значеннями зенітних кутів [7].

Третя група похибок характеризується обраним методом розрахунку координат точок свердловини [6, 7]. Для отримання координат існує чисельна кількість методів, огляд яких представлений в монографіях [8, 9]. Різна точність методів обумовлюється різним характером «чутливості» методів до похибок вимірюваних величин. Більшість досліджень точності методів розрахунку [5, 6, 7, 8] виділяють метод екстраполяції даних (в [8] даний метод названий тангенціальним) як такий, що має найменшу точність. Нажаль цей метод досить розповсюджений в маркшейдерській практиці, завдяки представленню в навчальній літературі [11].

Для визначення межі безпечного ведення гірничих робіт навколо свердловин також може мати значення форма зони розсіювання похибок положення точок. За форму цієї зони на плані традиційно приймають коло із центром в отриманій за розрахунком точці та радіусом, що дорівнює

$$M_{\text{пл}} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}, \quad (5)$$

де: m_x, m_y – СКП в напрямку координатних осей. Більш повно зона розсіювання характеризується еліпсом похибок – на площині та еліпсоїдом похибок – у просторі [12-14], які враховують нерівномірність розподілу точок за напрямками.

Постановка завдання.

На основі проведеного аналізу

можливо сформулювати наступні завдання дослідження:

- з метою урахування похибок обробки результатів інклінометричних вимірювань порівняти результати розрахунку та похибки отримані за методом рекомендованим нормативним документом [15] та найменш точним методом екстраполяції даних;

- дослідити вплив форми зони розсіювання похибок на форму межи безпечного ведення гірничих робіт;

- дослідити зміну величин СКП по глибині свердловин та порівняти з величинами отриманими за формулами (3) та (4).

Викладення основного матеріалу.

При викладенні подальшого матеріалу в рамках даної роботи припустимо наступні спрощення, які дозволять більше зосередитись на суті питань:

- похибку положення устя свердловини, похибку відбиття пласта на каротажній діаграмі та магнітне схилення будемо вважати нульовими;

- перетин еліпсоїда похибок пластом замінимо його горизонтальною проекцією, що тільки збільшить площу зони при зворотному проєкціюванні з плану на площину пласта;

- із свердловиною пов'яжемо локальну систему прямокутних координат, що має початок в усті свердловини та наступні напрями осей: осі z – донизу за напрямом прямовисних ліній; осі x – за північним напрямом географічного або магнітного меридіану; осі y - за східним напрямом відповідної паралелі або перпендикулярно до осей x та z .

Інструкцією по проведенню інклінометричних в свердловинах [15] як основний обраний метод середнього кута, який є досить простим та в умовах незначних скривлень дає прийнятні результати [5-8, 10]. Розрахункові формули координат з урахуванням припущень для цього методу мають вигляд:

$$\begin{aligned} x &= \sum_{i=2}^n l_i \cdot \sin \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \cos \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2}; \\ y &= \sum_{i=2}^n l_i \cdot \sin \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \sin \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2}; \\ z &= \sum_{i=2}^n l_i \cdot \cos \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2}, \end{aligned} \quad (6)$$

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.

Вирази для квадрату СКП координат x та y свердловини отримаємо за відомою формулою похибки функції вимірюваних величин [16]:

$$\begin{aligned} m_x^2 &= \sum_{i=2}^n \sin^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \cos^2 \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} m_l^2 + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n l_i^2 \cos^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \cos^2 \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} m_\theta^2 + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n l_i^2 \sin^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \sin^2 \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} m_\alpha^2; \\ m_y^2 &= \sum_{i=2}^n \sin^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \sin^2 \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} m_l^2 + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n l_i^2 \cos^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \sin^2 \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} m_\theta^2 + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n l_i^2 \sin^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \cos^2 \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} m_\alpha^2. \end{aligned} \quad (7)$$

де: m_l, m_θ, m_α – СКП вимірювань відповідно довжини інтервалу, зенітного кута та азимуту.

Для визначення параметрів еліпса похибок на плані необхідно скласти коваріаційну матрицю похибок координат точки, в якій вирази (7) будуть знаходитись на головній діагоналі:

$$K = \begin{pmatrix} m_x^2 & K_{xy} \\ K_{yx} & m_y^2 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

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

K_{xy} – кореляційний момент відповідних оцінюваних функцій, який в нашому випадку матиме вигляд:

$$\begin{aligned} K_{xy} &= \sum_{i=2}^n \sin^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \sin \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} \cos \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} m_l^2 \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n l_i^2 \cos^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \sin \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} \cos \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} m_\theta^2 - \\ &- \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n l_i^2 \sin^2 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \sin \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} \cos \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} m_\alpha^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Головні радіуси еліпса похибок знайдемо, як власні значення матриці похибок, із характеристичного рівняння:

$$\lambda^2 - I_1 \lambda + I_2 = 0. \quad (10)$$

де: I_1, I_2 - інваріанти рівняння (9), що у випадку матриці (8) мають вигляд:

$$I_1 = m_x^2 + m_y^2;$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} m_x^2 & K_{xy} \\ K_{yx} & m_y^2 \end{vmatrix}. \quad (10)$$

Розв'язавши рівняння (9) відносно λ , отримаємо два корені λ_1 та λ_2 , з яких знаходимо головні радіуси

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

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

Напрямок осі найбільшого головного діаметра еліпса отримуємо з виразу [17]

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\lambda_1 - m_x^2}{K_{xy}}, \quad (12)$$

де: φ – дирекційний кут напрямку.

Таким чином, параметричні рівняння еліпса СКП в точці A свердловини на плані відносно системи координат з початком в усті свердловини матимуть вигляд

$$x = x_A + a \cos t \cos \varphi - b \sin t \sin \varphi; \quad (13)$$

$$y = y_A + a \cos t \sin \varphi + b \sin t \cos \varphi;$$

де: x_A, y_A – координати точки стовбуру свердловини, в якій визначаються СКП, отримані за першими двома рівняннями (6).

При побудові еліпсів похибок для тангенціального методу розрахунку скористаємось формулами отриманими аналогічно виразам (7), (9), які можливо знайти, наприклад, в роботі [12].

Усі розрахунки проводились на основі даних реальних інклінометричних досліджень розвідувальних свердловин ВП «шахта «Капітальная» ДП «Мирноградвугілля». Свердловини глибиною від 600 до 1000 м мали наступні показники скривлення: діапазон зміни зенітний кутів $0 - 8^\circ$, азимутальне скривлення між устям на вибієм $10-30^\circ$, довжина інтервалу вимірювань – 20 - 27 м. Вимірювання проводились інклінометром КИТ.

На рис. 1 зображено горизонтальні проекції траєкторії свердловини НН-5643 побудовані за формулами метода середнього кута (суцільна лінія) та метода екстраполяції даних (штрихова лінія). Відстань між кінцевими точками траєкторії обрховані двома методами склала 1,78 м.

Побудова еліпсів похибок горизонтальних координат траєкторії тієї ж свердловини відображена на рис. 2. Розміри головних радіусів еліпсів СКП склали: для

метода середнього кута – 1,64 и 1,19 м; для тангенціального методу – 2,17 и 1,67 м. При цьому хоча еліпс СКП для менш точного методу і «накриває» кінцеву точку іншого методу, залишається не врахованою значна його площа. Збільшення розмірів до ймовірності 0,998 за правилом «трьох сигм», що у випадку еліпсоїдів похибок складає 3,35 рази [12], дозволяє «накрити» площу еліпса точнішого методу при співвідношенні площі більшого еліпса до меншого в 1,85 рази.

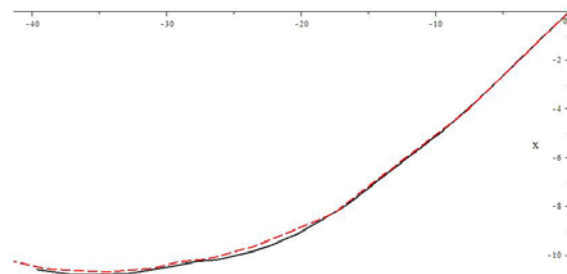


Рис. 1. Горизонтальні проекції осі викривленої свердловини побудовані за методом середнього кута та методом екстраполяції

Порівняємо розміри зони розсіювання у вигляді еліпса СКП отриманого для метода середнього кута та кіл СКП, радіуси яких розраховані за формулами (4) та (5). На рис. 3 зображено відповідні зони, побудовані для точок свердловин НН-5643 (глибина 937 м) та НН-5552 (глибина 1057,6 м). При цьому коло СКП отримане за формулою (4) зображено штриховою лінією, а за формулою (5) – штрих-пунктирною. З цих зображень слідує, що розміри зони розсіювання для всіх розрахунків є порівнянними. Коло побудоване за формулою (5) завжди буде «накривати» відповідний еліпс, так як його радіус є сумою похибок в напрямку координатних осей за правилом «гіпотенузи прямокутного трикутника». Коло отримане за формулою (4) може мати радіус менший та більший за радіус кола (5). Формула ж (3) у всіх випадках давала похибку що в 10-15 раз перевищувала похибку (5).

На рис. 4 зображено графік зміни горизонтальної похибки, що розрахована за формулою (5), із глибиною для свердловини НН-5552. Побудовані лінії тренду вказують на те, що зміні горизонтальної похибки з глибиною більш відповідає поліноміальна квадратична залежність.

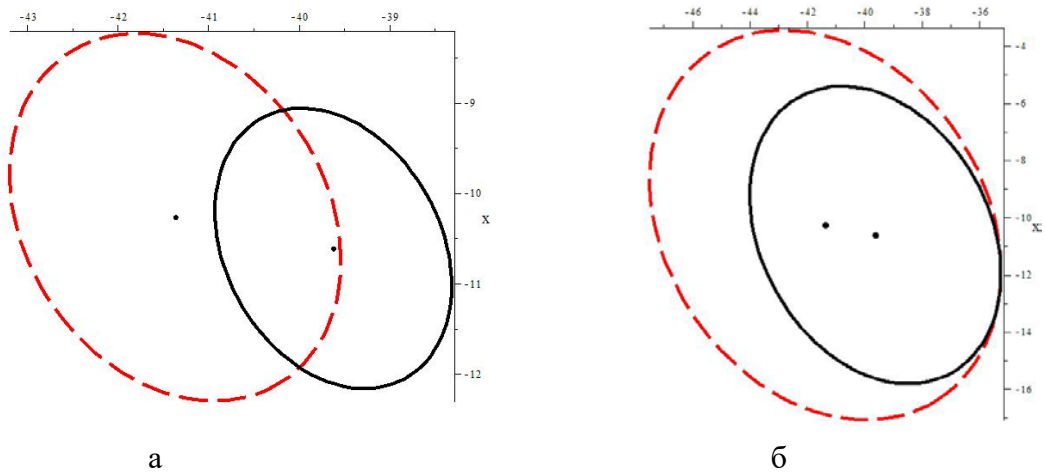


Рис. 2. Еліпси горизонтальної проекції еліпсоїда похибок осі викривленої свердловини побудовані в кінцевій точці за методом середнього кута та методом екстраполяції:
а) еліпси СКП; б) еліпси побудовані за правилом «трьох сигм».

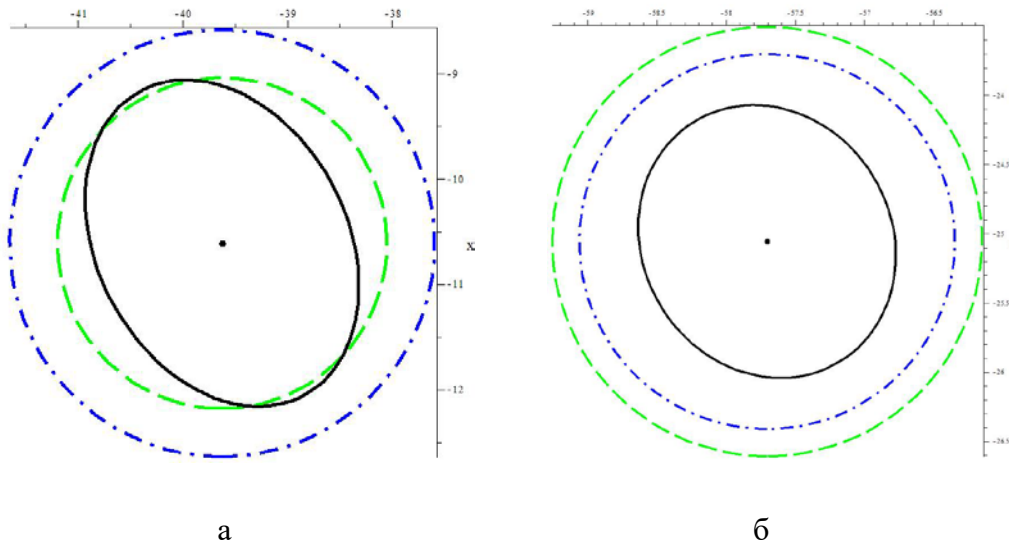


Рис. 3. Порівняння зон розсіювання похибок:
а) свердловина НН-5643; б) свердловина НН-5552.

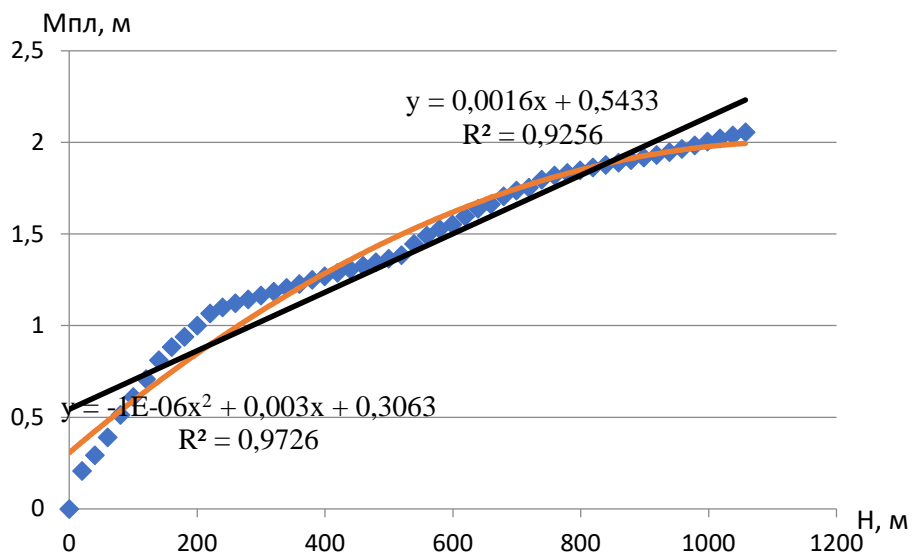


Рис. 4. Графік зміни горизонтальної похибки з глибиною для свердловини НН-5552.

Щоб дослідити вплив еліпсу похибок на форму небезпечної зони згідно [2] визначимо перші дві складові формули (1) та відкладемо цю величину уздовж еліпса похибок побудованого виходячи з ймовірності 0,998. Таким чином, отримаємо зовнішню еквідистанту еліпсу на відстань $h = 5m + 0,05H$. Разом з еквідистантою побудуємо коло радіус, якого дорівнює

$$d = 5m + 0,05H + 3M_{пл}, \quad (14)$$

де $M_{пл}$ – розрахуємо за формулою (5).

На рис. 5 представлено побудовані зони для свердловини НН-5643. Суцільною лінією зображено еквідистанту, штрихпунктирною коло (14). При $H=937$ м, $m=1$ м відстань h склала 51,81 м. Розміри радіусів еліпса побудованого за правилом «трьох сигм» - $a=5,5$ м та $b=3,99$ м. Радіус кола, отриманого за формулою (14) – 57,9 м. При цьому площа кола відрізнялась від площі еліпса в 1,05 раз. Це відбулося завдяки переважному впливу на розміри зони величини h .

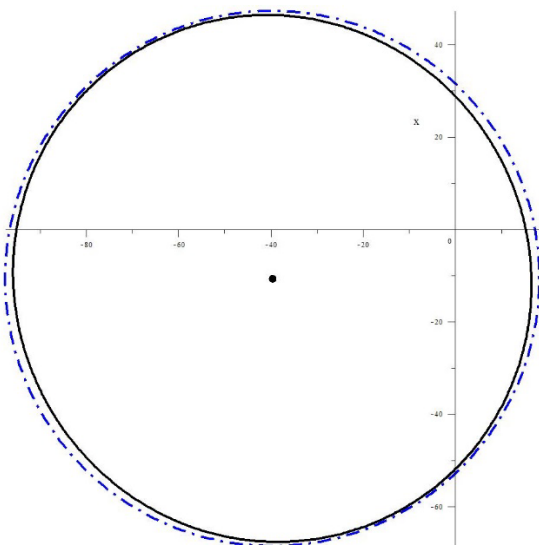


Рис. 5. Межа небезпечної зони навколо свердловини НН-5643

Обговорення результатів досліджень.

Отримані результати вказують на те, що врахування похибок положення свердловини призводить до доволі вагомого збільшення розмірів межі зони безпечного ведення гірничих робіт. Так, для свердловини НН-5643 різниця між радіусами кругових зон, що отримані без врахування похибок та із врахуванням

похибок методу середнього кута, склала $\Delta r_1 = 57,9 - 51,8 = 6,1$ м, а для тангенціального методу ця величина була ще більше - $\Delta r_2 = 60,5 - 51,8 = 8,7$ м.

Якщо порівняти між собою межі кругових зон безпечного ведення гірничих робіт отриманих за різними методами розрахунку координат – рис. 6, то можна прослідити збереження тієї ж тенденції, що й для еліптичних зон розподілу похибок координат, коли межа зони отриманої для менш точного методу має більші розміри та «накриває» межу більш точного методу розрахунку.

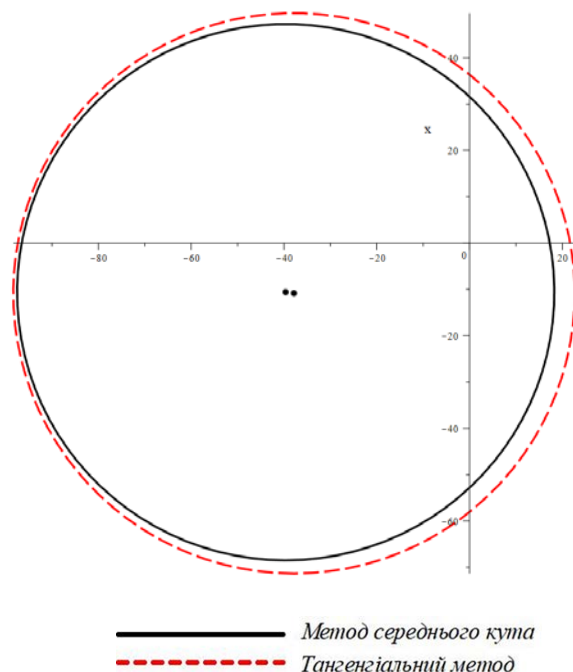


Рис. 6. Порівняння межі зони безпечного ведення гірничих робіт для свердловини НН-5643, отриманої за різними методами розрахунку

Висновки.

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

- обрання методу розрахунку координат точок свердловини впливає як на точність результату, так і на положення та розміри зони розсіювання; при цьому збільшення розмірів цієї зони з урахуванням правила «трьох сигм» дозволяє врахувати похибки розрахункових методів при суттєвому збільшенню розмірів зони для менш точного метода у порівнянні з більш точним;

- порівняння розмірів зон середньоквадратичних похибок у вигляді еліпса та кіл отриманих за різними розрахунковими формулами вказує на значну неточність формули (3) та близькість результатів інших розрахунків; встановлено, що вплив глибини свердловини на розміри зони похибок носить характер квадратичної залежності, яка може бути застосована для оцінювання величини зони похибок у точках свердловини.

Список літератури

1. Правила безпеки у вугільних шахтах: НПАОП 10.0-1.01-10. К.: Охорона праці, 2010. 430 с.
2. Инструкция по безопасному ведению горных работ у затопленных выработок. НПАОП 10.0-5.27-84. Л.: ВНИМИ, 1984. 66 с.
3. Инструкция по безопасному ведению горных работ у затопленных выработок. М.: Недра, 1996. 48 с.
4. Халимендик Ю. М., Заболотная Ю. А. Целесообразность применения стохастического подхода к маркшейдерскому обоснованию границ опасных зон. Уголь Украины. 2016. № 3. С. 49-51.
5. Кузьмин, В. И., Мининг С. Э., Редькин. Г. М. Геометризация и рациональное использование недр. М.: Недра, 1991. 318 с.
6. Козыряцкий Н. Г. Источники погрешностей инклинометрических исследований скважин. Каротажник. 2013. №3 (225). С. 215-234.
7. Филатова И. В. Погрешности определения координат пластопересечений. Вісті Донецького гірничого інституту. 2010. №1. С. 224-234.
8. Исаченко В. Х. Инклинометрия скважин. М.: Недра, 1987. 216 с.
9. Samuel G.R. Formulas and calculations for drilling operations. Scrivener Publishing LLC, 2010. 398 P.
10. Букринский В. А. Геометрия недр. М.: Горная книга, 2012. 546 с.
11. Курс маркшейдерского дела для горняков / Д. Н. Оглоблин и др.; К.:Техніка, 1968. 253 с.
12. Зорин Д. П., Мазницкий А. С., Марухняк Н. И Оценка точности определения пространственного положения точек оси ствола скважины. Инженерная геодезия. К. 1982. № 25. С. 54 – 59.
13. Коваленко К. В. Неопределенность пространственного расположения скважины и способы её оценки. Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. М. 2011. №4. С. 10 - 13.
14. Ekseth,R., Weston, J., Ledroz,A., Smart, B., Ekseth, A. Improving the quality of ellipse of uncertainty calculations in gyro surveys to reduce the risk of hazardous events like blowouts or missing potential production through incorrect wellbore placement. SPE 140192, 2011. -1 5 p.
15. Инструкция по проведению инклинометрических исследований в скважинах. Калинин: НПО «Союзпромгеофизика», 1989. 14 с.
16. Taylor J. R. Introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements. University Science Books, 1997. - 327 p.
17. Делоне Б. Н., Райков Д. А Аналитическая геометрия. М.-Л.: ОГИЗ, 1948. Т.1. 456 с.

References

1. "Safety code at the coal mines" (2010), [Pravyla bezpeky u vuhilnykh shakhtakh], Kyiv: Okhrona pratsi, 430 p. (in Ukrainian).
2. "Instruction for the safe conducting of mining near submerged workings" (1984), [Instruktsiya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot u zatoplennykh vyirabotok], Leningrad: VNIMI, 66 p. (in Russian).
3. "Instruction for the safe conducting of mining near submerged workings" (1996), [Instruktsiya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot u zatoplennykh vyirabotok], Moskva: Nedra, 48 p. (in Russian).
4. Khalymendik Yu. M., Zabolotnaya, Yu. A. (2016), "The expediency of applying the stochastic approach to the mine surveying justification of the boundaries of hazardous zones", [Tselesoobraznost primeneniya stohastiche-skogo podhoda k marksheyderskomu obosnovaniyu granits opasnykh zon], Ugol Ukrainy, pp. 49-51 (in Russian).
5. Kuzmin V. I., Mining S. E., Redkin G. M. (1991), "Geometrization and rational use of mineral resources", [Geometrization i ratsionalnoe ispolzovanie nedr], Moskva: Nedra, 318 p. (in Russian).
6. Kozyryatskiy N. G. (2013), "Sources of errors in inclinometry data of wellbores", [Istochniki pogreshnostey inklinometricheskikh issledovaniy skvazhin], Karotazhnik, pp. 215-234 (in Russian).
7. Filatova I. V. (2010), "Errors in determining the coordinates of the stratum section", [Pogreshnosti opredeleniya koordinat plastopereosecheniy], Visti Donets'kogo gornichogo institutu, pp. 224-234 (in Russian).
8. Isachenko V. H. (1987), "Borehole inclinometry", [Inklinometriya skvazhin], Moskva: Nedra, 216 p. (in Russian).
9. Samuel G.R. (2010), Formulas and calculations for drilling operations. - Scrivener Publishing LLC, 398 p. (in English).
10. Bukrinskiy V. A. (2012), Geometry of bowels of the earth [Geometriya nedr], Moskva: Gornaya kniga, 546 p. (in Russian).
11. Ogloblin D. N., Gerasimenko G. I., Nikolskiy S. I. (1968), "Mining survey for miners", [Kurs marksheyderskogo dela dlya gornyakov], Kyiv: Tekhnika, 253 p. (in Russian).
12. Zorin D. P., Maznitskiy A. S., Maruhnyak N. I. (1982), "Estimation of accuracy of determination of the spatial position of the points of the axis of the borehole", [Otsenka tochnosti opredeleniya prostranstvennogo polozheniya tochek osi stvola skvazhiny], Inzhenernaya geodeziya, pp.54-59 (in Russian).
13. Kovalenko K. V. (2011), "Uncertainty of the spatial arrangement of the well and methods for estimating", [Neopredelennost prostranstvennogo raspolozheniya skvazhiny i sposoby eyo otsenki], Vestnik Assotsiatsii burovyykh podryadchikov, pp. 10-13 (in Russian).
14. Ekseth,R., Weston, J., Ledroz,A., Smart, B., Ekseth, A. (2011), Improving the quality of ellipse of

uncertainty calculations in gyro surveys to reduce the risk of hazardous events like blowouts or missing potential production through incorrect wellbore placement. SPE 140192, 15 p. (in English).

15. "Instruction for conducting inclinometry of wellbores" (1989), [Instruktsiya po provedeniyu inklinometricheskikh issledovaniy v skvazhinah], Kalinin: NPO «Soyuzpromgeofizika», 14 p. (in Russian).

16. Taylor J. R. (1997), Introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements. University Science Books, 327 p. (in English).

Delone B. N., Raykov D. A. (1948), "Analytic geometry" [Analiticheskaya geometriya], Moskva: OGIZ, Vol.1, 456 p. (in Russian).

Надійшла до редакції 20.05.2018

Рецензент д-р. техн. наук, проф. О.Е.Кіпко.

Халимендик Юрій Михайлович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри маркшейдерії ДВНЗ «Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (пр. Д. Яворницького 19, Дніпро, 49005, Україна).

E-mail: khalymendyk@meta.ua

Фролов Олег Васильович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри геодезії та будівництва підземних споруд ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

E-mail: oleh.frolov@donntu.edu.ua

УЧЕТ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГРАНИЦ ОПАСНЫХ ЗОН ПО ПРОРЫВАМ ВОДЫ У БУРОВЫХ СКВАЖИН

Цель. Целью работы является совершенствование методики определения границ безопасного ведения горных работ у буровых скважин путем учета погрешностей положения скважины в массиве горных пород.

Методы исследований. В работе применены общие научные методы анализа и синтеза, методы математической обработки маркшейдерско-геодезических измерений, методы геометрического моделирования.

Результаты. Проанализированы существующие методики определения границ опасных зон по прорывам воды около буровых скважин и составляющие расчетных формул для определения ширины этих зон. Рассмотрены вопросы анализа точности измерений инклинометров в контексте учета погрешностей координат ствола скважины при построения границ опасных зон по прорывам воды у незатампонированных или некачественно затампонированных скважин. Сопоставлены результаты расчета координат точек скважин, полученных разными методами аппроксимации траектории ствола. Получены формулы для расчета параметров зон и исследованы зоны рассеяния погрешностей в форме эллипсов для разных методов расчета траектории скважины. Показано, что увеличение размеров зоны рассеивания координат по правилу «трех сигм» позволяет в достаточной мере «сгладить» погрешности менее точного метода расчета. Сравнены размеры круговых и эллиптических зон среднеквадратичных погрешностей около точки оси скважины. Построен график изменения размера зоны рассеивания координат по глубине скважины. Проанализировано влияние неравномерности рассеяния ошибок координат на форму границы опасной зоны.

Научная новизна. Научной новизной работы является предложенная методика учета погрешностей измерений при определении границ зон безопасного ведения горных работ у буровых скважин. Также впервые было установлено, влияние глубины скважины на размеры зоны погрешностей носит характер квадратичной зависимости, которая может быть применена для оценки погрешностей в точках скважины

Практическая значимость. Практическим результатом работы можно считать повышение надежности установления границ зон безопасного ведения горных работ у буровых скважин, что способствует предотвращению прорывов воды в горные выработки шахт, а, следовательно, повышает безопасность труда рабочих.

Ключевые слова: опасная зона, скважина, инклинометрическая съемка, азимут, зенитный угол, эллипсоид погрешностей, корреляционный момент, эквидистанта.

Халимендик Юрий Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры маркшейдерии ГВУЗ «Национальный технический университет «Днепропетровская политехника» (пр. Д. Яворницького 19, г. Днепр, 49005, Украина).

E-mail: khalymendyk@meta.ua

Фролов Олег Васильевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой геодезии и строительства подземных сооружений ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (пл. Шибанкова, 2, г. Покровск, 85300, Украина).

E-mail: oleh.frolov@donntu.edu.ua

ACCOUNTING OF INCLINIMETER SURVEY ERRORS AND DETERMINATION OF BORDERS OF DANGEROUS AREAS AROUND DRILLING WELLS

Purpose. *The aim of the work is to improve the methodology for determining the boundaries of safe mining operations around boreholes by taking into account the errors in the position of the well in the rock massif.*

Methods. *General scientific methods of analysis and synthesis, methods of mathematical processing of mine surveying and geodetic measurements, methods of geometric modeling are applied in the paper.*

Results. *The existing methods for determining the boundaries of dangerous zones for water breakthrough near boreholes and the components of calculation formulas for determining the width of these zones have been analyzed. The questions of the accuracy analysis of inclinometers measurements in the context of the errors of the wellbore coordinates during the construction of the boundaries of dangerous zones for water breakthroughs around non-tamped wells are considered. The results of the calculation of the coordinates of the wells points obtained by different methods of approximating the trajectory were compiled. Formulas for calculating the parameters of the zones are obtained and the error zones in the form of ellipses are studied for different methods of calculating the well trajectory. It is shown that an increase in the size of the zone of dispersion of coordinates according to the probability value equal to 0,988 allows to sufficiently "smooth" the errors of a less accurate calculation method. The sizes of error circles and ellipse near the points of the well are compared. A graph of the change in the size of the zone of dispersion of coordinates along the depth of the well is constructed. The influence of the non-uniformity of distribution of coordinate errors on the shape of the boundary of the danger zone is analyzed.*

Scientific novelty. *Scientific novelty of the work is the proposed method for taking into account the error of measurements in determining the boundaries of safe mining zones around drilling wells. It was also established for the first time that the influence of the depth of the well on the size of the error zone is the quadric polynomial, which can be used to estimate errors at the well points.*

Practical significance. *The practical result of the work can be considered to increase the reliability of establishing the boundaries of safe mining zones in boreholes, which helps to prevent water breakthroughs into mine workings, and, consequently, increases the safety of miners.*

Keywords: *dangerous area, borehole, inclinometer survey, azimuth, zenithal angle, ellipsoid of errors, cross-correlation moment, equidistant.*

Khalymendyk Yurii – Doctor of science (Engineering), professor of mining surveying department, State Higher Educational Institution «National technical university «Dnipro polytechnic» (pr. Dmytra Yavornytskogo, 19, Dnipro, 49600, Ukraine)

E-mail: khalymendyk@meta.ua

Frolov Oleg – PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Geodesy and The Construction of Underground Structures Department, State Higher Educational Institution «Donetsk National Technical University», (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300 Ukraine).

E-mail: oleh.frolov@donntu.edu.ua