

$$N = \frac{N_n}{C_r^{2,5}} = \frac{320 \times 10^3}{5^{2,5}} = 5,72 \times 10^3 \text{ Вт}, \quad (11)$$

де $N_n = 320 \times 10^3 \text{ Вт}$ - потужність привода дробарки КМДТ -2200.

Використовуючи отримані дані C_N , C_n , C_R визначаємо значення потужності, зусилля і продуктивності натурної дробарки за експериментальними значеннями цих параметрів, отриманих на моделі. В якості змінних факторів приймалися: вихід дробленого продукту; обсяг камери дроблення; зміна розміру розвантажувальної щілини; межі зміни коефіцієнта міцності руди; довжина зони калібрування.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Після обробки експериментальних даних, отримані рівняння регресії для продуктивності і крупності продукту дроблення; визначені оптимальні значення змінних факторів при яких досягається максимальна продуктивність і оптимальний вихід готового класу в продукті дроблення.

Список літератури

1. Протодьяконов М.М., Тедер Р.И. Методика рационального планирования эксперимента. М., Наука, 1970, 116с.
2. Смирнов Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. Наука, М., 1969, 511с.
3. Шестаков А.М., Кляцкий В.И., Джур В.А. Влияние изменения профиля камеры дробления дробилки КМДТ-2200 на формирование дробленого продукта. -Изв. вузов. Горный журнал. 1984 №5, с.65-69.
4. Ушаков В.С.К вопросу о расчете и проектировании дробящего пространства конусных дробилок мелкого и среднего дробления. -Вопросы исследования и проектирования машин и оборудования. Сб. трудов УДН, 1977, с.128-129.
5. Зверховский Я.Я., Быков В.И., Бондарец А.И. Стенд для исследований конусных дробилок с консольным валом. А.с. №368875, Бюл. Информаций, №10, 1973.
6. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. - М., Недра, 1980, 415с.
7. Алабужев П.М., Геронимус В.Б., Минкевич Л.М. и др. Теория подобия и размерностей. Моделирование. - Высшая школа, 1968, 208с.
8. Олевский В.А. Конструкция, расчеты и эксплуатация дробилок. М., 1958, 460 с.

Рукопис подано до редакції 19.03.2021

УДК 622.1:528.024

Л.В. ДОЛГІХ, канд. техн. наук доц., С.В. ДІХТЯР, А.О. ТОМАШЕВСЬКА, аспіранти
Криворізький національний університет

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ЦИФРОВОЇ ФОТОГРАММЕТРІЇ В УМОВАХ ПІДЗЕМНИХ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК

Мета. Метою роботи є дослідження питання використання методів цифрової фотограмметрії в умовах підземних гірничих виробок для підвищення ефективності маркшейдерського забезпечення гірничих робіт.

Методи дослідження. В роботі використані методи теоретичного аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, на основі якого обґрунтована доцільність розробки та впровадження у виробництво цифрових технологій для вирішення задач маркшейдерського забезпечення гірничих робіт, а також використані експериментальні роботи з дослідження впливу складних умов підземної розробки родовищ на якість цифрового знімання.

Наукова новизна. В роботі запропоновано шляхи удосконалення методик виконання орієнтирно-з'єднувальних зйомок та передачі позначки на глибокі горизонти шахти з використанням сучасних наукових досягнень в галузі приладобудування та програмного забезпечення вимірювальних та обчислювальних робіт. Розглянуто можливість використання цифрової зйомки для підвищення ефективності цих робіт, для чого виконані експериментальні роботи з дослідження впливу стиснених умов шахти, обмеженої видимості та запиленості і вологості повітря. Встановлена можливість використання фотограмметричних методів, які забезпечать високу оперативність виконання робіт та необхідну точність. Визначено основні фактори впливу на точність маркшейдерських зйомок, які виконуються з використанням цифрової фотограмметрії в умовах, наближених до підземних виробок.

Практична значимість. Встановлені переваги та недоліки використання сучасних приладів та методів виконання орієнтирно-з'єднувальних зйомок та передачі висотних позначок на глибокі горизонти шахт у порівнянні з

традиційними методами, дозволили визначити напрям їх удосконалення. Виконані роботи сприяють розробці більш ефективних методів маркшейдерських робіт зі встановлення зв'язку між різними горизонтами та денною поверхнею.

Результати. Досліджено можливість та точність визначення центра марки з близької відстані, що відповідає стислим умовам шахти. Визначено точність, з якою необхідно вимірювати відстані між марками, встановленими на різних горизонтах орієнтування, для яких визначається перевищення з використанням фотограмметричних методів. Досліджено ступінь впливу величини експозиції на точність моделі шахтного ствола, побудованої по цифрових знімках, визначено необхідну кількість контрольних точок та методу передрозрахунку точності вимірювань.

Ключові слова: висотна позначка, маркшейдерська зйомка, цифрова фотограмметрія, гірничі виробки.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-85-90

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Видобування залізної пуди підземним способом один з найважливіших секторів промисловості України. Зниження якості руд, високі витрати на видобування та конкуренція на зовнішньому ринку вимагають від підприємств підвищення ефективності виробництва.

У світовій практиці, на відміну від вітчизняної, для маркшейдерського забезпечення підземних гірничих робіт використовуються лазерні сканери, електронні прилади та інші сучасні технології. Відомо, що впровадження новітніх технологічних рішень та модернізація існуючих – це пріоритетний напрямок розвитку гірничодобувної промисловості, результатом якого є підвищення ефективності гірничих робіт з раціонального використання надр, зниження собівартості та забезпечення безпечних умов праці.

Для підвищення точності й оперативності маркшейдерських робіт в умовах підземних гірничих розробок пропонується застосування цифрових камер.

Аналіз досліджень і публікацій. Забезпечення безпечних умов праці є головною задачею планування гірничих робіт. Передача висотної позначки з поверхні в підземні гірничі виробки та з вище лежачого горизонту на нижній, а також орієнтирно-з'єднувальна зйомка, відносяться до спеціальних видів маркшейдерських робіт, які впливають та ефективність маркшейдерського забезпечення всього комплексу підземних гірничих робіт, і тому важливим є їх удосконалення шляхом використання сучасних технологій [1]. Традиційні методи їх виконання мають низку суттєвих недоліків [2-3]:

необхідність зупинки шахтного ствола на час виконання робіт (до кількох діб), що робить неможливим його використання в цей час у якості запасного виходу для робітників та призводить до фінансових втрат;

висока залежність ефективності їхнього застосування від глибини розробки (шахтні стрічки застосовують до 500 м, а глибиномір ДА-2 – до 1000 м);

значна трудомісткість робіт;

ймовірність обриву мірних приладів, що може призвести до травмування робітників;

необхідність введення великої кількості поправок у виміри (за компарування стрічок, мірних дисків, дротів; за температуру; за видовження від власної ваги та підвішеного вантажу тощо), що призводить до високих похибок.

В якості контролю вимірів використовують повторне визначення висотної позначки та порівняння результатів, але для якісного контролю точності виконання цих маркшейдерських робіт не достатньо [4].

Оскільки сучасні засоби вимірювань не включені до інструкції з виконання маркшейдерських робіт виникає необхідність у визначенні меж та можливостей застосування цифрової фотограмметрії в підземних умовах.

Люфт С. К., Бесимбаева О. Г., Бесимбаев Н. Г. та Капасова А. З. в роботі [5] досліджують метод лазерного сканування для виконання маркшейдерських робіт у шахтних стволах, який робить можливим визначення величин деформацій та просторових координат точок з необхідною точністю.

В роботі [6] розглядаються фізичні джерела похибок фотознімків. Розроблена методика спостережень за рефракцією, яка зарекомендувала себе як надійний інструмент при вивченні впливу зовнішніх умов на точність маркшейдерсько-геодезичних вимірювань. Досліджена залежність величини рефракції від температури, атмосферного тиску, запиленості та вологості. Методика може бути застосована, в різних сферах діяльності, де необхідно мати оперативні та точні дані зі спостережень за об'єктом.

Закордонний досвід застосування фотограмметричних методів в підземних шахтних умовах [7-11] дозволяє передбачити складнощі, які можуть виникати в підземних умовах та визначити тип обладнання для забезпечення необхідної точності отриманого результату. Більшість дослідників у вказаних роботах концентрують увагу на визначенні найкращого способу аналізу отриманих моделей, їх точності та визначенні залежностей від конкретних умов, таких як нахил камери, температура, вологість, запиленість, додаткове освітлення тощо середовища, в якому виконуються роботи.

Аналіз літературних джерел доводить, що отриманої інформації з фотограмметричних скануючих систем часто достатньо для вирішення маркшейдерських задач з необхідною точністю. Фотограмметричні методи, у порівнянні з іншими, більш продуктивні та вимагають менших витрат часу на виконання польових робіт, вони можуть бути застосовані для вирішення широкого кола маркшейдерських задач в різних гірничих умовах, забезпечуючи необхідну точність.

Постановка задачі. При відкритій розробці родовищ корисних копалин широко використовують фотограмметричні методи. При цьому забезпечується зйомка всіх елементів кар'єрів, відвалів та інших об'єктів з необхідною точністю.

Важливо підкреслити, що фотограмметричні методи і раніше використовувалися для зйомок в підземних гірничих виробках, але фотографічні камери, які при цьому використовувалися, значно поступалися сучасним цифровим. Але для використання сучасних цифрових методів в підземних гірничих виробках, вони повинні бути адаптовані до цього. Для цього доцільно дослідити залежність між умовами знімання та точністю отриманих даних.

Метою роботи є розроблення нової методики виконання робіт в шахтному стволі, які забезпечать ефективне виконання передачі висотної позначки та орієнтирно-з'єднувальної зйомки, використовуючи при цьому фотограмметричні методи.

Викладення матеріалу та результати. Фотограмметричні методи забезпечують дистанційне дослідження об'єкта та є майже не замінним способом, особливо, коли це стосується об'єктів, розташованих в місцях, небезпечних для знаходження людей. Відомо також, що ці методи ефективні для спостереження за деформаціями об'єктів та швидкоплинних процесів.

За результатами цифрової зйомки створюються хмари точок та тривимірні моделі об'єкта зйомки. При цьому можна обходитись без закріплених точок на стінах гірничих виробок, на чому ґрунтуються традиційних фотограмметричні методи та методи з використанням маркшейдерсько-геодезичних приладів в підземних гірничих виробках. В порівнянні з лазерним скануванням, отримані знімки дозволяють дешифрувати хмари точок, надавати їм відповідне забарвлення, що спрощує для оператора пошук необхідних точок в масиві та підвищує точність побудови тривимірної моделі.

Проблеми, з якими раніше стикалась фотограмметричні зйомки в складних підземних умовах, такі як висока вологість, запиленість повітря та недостатня кількість світла, з розвитком цифрових фотокамер значно зменшились.

Головним обмеженням у її застосуванні є стислі умови підземних виробок, при яких відстань до об'єкта зйомки становить лише кілька метрів. Однак, це дає перспективу використання камер з короткою фокусною відстанню, і це дає можливість застосовувати легкі камери.

На сьогодні є велика кількість цифрових камер, які забезпечують високу роздільну здатність в будь-яких середовищах, такі як GoPro, Insta 360 та інші, що робить їх гнучкими у застосуванні.

Чітке планування робіт з передачі висотної позначки та орієнтування на глибоких горизонтах шахт необхідне для економії часу та зменшення похибок, в отриманих для опрацювання, хмарах точок. Для забезпечення цифрової зйомки в підземних гірничих умовах потрібно:

- вибрати місце розташування станції зйомки, яка буде найбільш інформативною;
- виконати розрахунок елементів цифрової зйомки;
- встановити додаткове освітлення;
- виконати орієнтування цифрової камери (при необхідності);
- скласти схему орієнтирно-з'єднувальної зйомки та передачі висотної позначки;
- здійснити експонування;
- здійснити камеральну обробку отриманих знімків.

Отримані результати зйомки дозволяють створити в програмних комплексах, наприклад, Agisoft Metashape Professional, Autodesk ReCap, цифрову модель на основі хмари точок, з подальшим створенням маркшейдерських креслень та вирішенням інших задач.

Можливості застосування комп'ютерного зору на сьогодні є досить обмеженими, тому перед програмною обробкою знімків доцільно виконати попередню обробку. Людський зір здатен сприймати параметри знімка більш детально і тому спостерігач може коригувати параметри зображення у разі необхідності.

При використанні цифрових камер для знімальних робіт, необхідно виконувати її калібрування з виявленням закону розподілу систематичних похибок через дисторсію. Для цього в досліджуваному просторі закріплюються контрольні точки у вигляді марок чи точок, які проєктуються за допомогою лазерів. Потім з високою точністю визначаються їх просторові координати та порівнюються з отриманими на знімках. При цьому оцінюється розподіл геометричних спотворень, величини яких отриманих при калібруванні, та похибка визначення просторових координат, що визначається за наявності опорних точок.

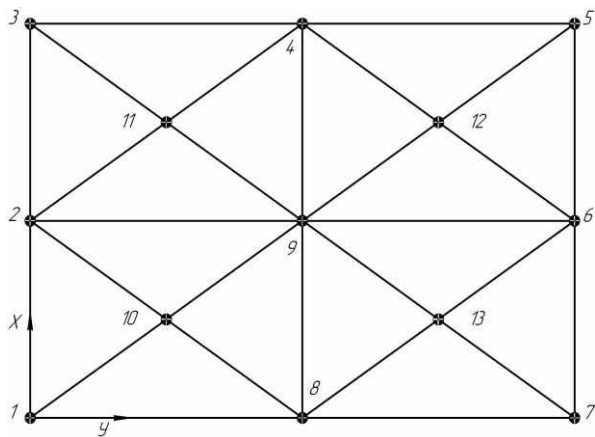


Рис. 1. Схема макету

Для дослідження створено макет, схему якого показано на рис. 1. Макет виготовлено з аркуша паперу розміром 800×500 мм, на який нанесено контрольні точки, з'єднані у вигляді системи трикутників. Фотографування здійснювалося з відстані 10 метрів. У якості цифрової камери була використана камера GoPro Hero 9 з матрицею 3840×2160 пікс.

При камеральній обробці були визначені координати контрольних точок в пікселях, а потім перераховані в міліметри та сантиметри та порівняні з фактичними. За отриманими координатами визначалися відстані між точками за відомою формулою

$$D = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}, \quad (1)$$

де X_1 та Y_1 – координати першої точки, а X_2 та Y_2 – другої точки.

Середня похибка становила 0,55 мм, тоді як мінімальна та максимальна становили 0,1 та 1,5 мм відповідно. Розподіл похибок відображено на рис. 2.

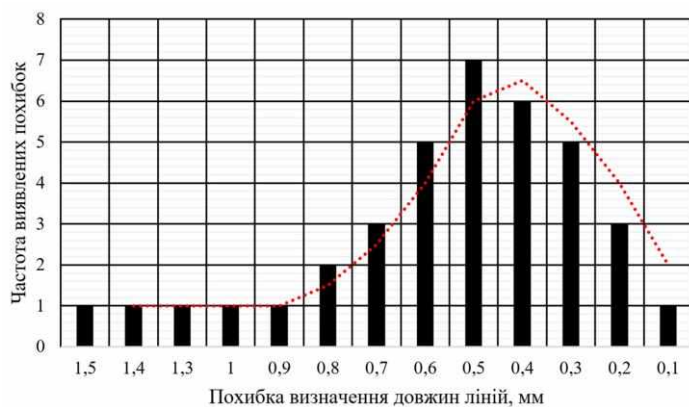


Рис. 2. Графік розподілу похибок

Однією з основних умов коректної роботи програмних комплексів є вірна орієнтація зображень, яка в першу чергу залежить від умов виконання знімання. Тому виникла необхідність у дослідженні впливу параметрів знімання на якість отриманих зображень, а саме якості освітлення та інших характеристик. Було виконано зйомку об'єкта складної структури при різних умовах освітлення, на основі чого було отримано хмари точок та 3D-моделі.

На основі аналізу тіл хмар точок (рис. 3) та сіток отриманих моделей (рис. 4) було встановлено, що за достатньої кількості світла можна отримати занадто деталізовану модель, що може ускладнювати роботу оператора при обробці об'єктів великих розмірів. Точність отриманих моделей при складних умовах була достатньою для лінійних та кутових вимірів. Обмеженням є лише обчислювальні потужності для камеральної обробки.



Рис. 3. Цифрова модель в системі Autodesk ReCap

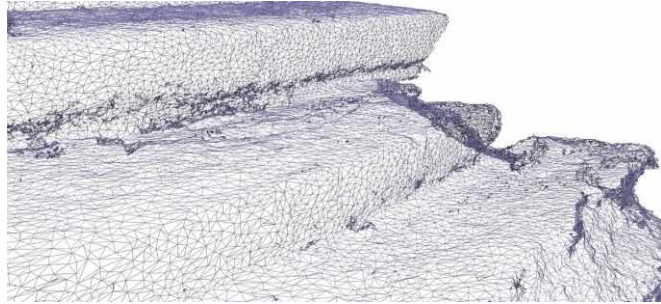


Рис. 4. Каркасний вид моделі створений в системі Agisoft Metashape Professional

Для виконання зйомки великих об'єктів, таких, як шахтні стволи, штреки тощо, доцільно розділити ряди зображень на окремі частини, потім виконати моделювання та визначення кутових та лінійних величин, а після цього поєднати одержані результати. Це дозволяє зменшити накопичення похибок та навантаження комп'ютера.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Методи цифрової фотограмметрії можуть використовуватися для візуалізації положення тривимірного простору з рядків зображень. Вірний вибір цифрової камери, програмного комплексу, умов знімання (освітлення, вологість та запиленість) та попередня обробка знімків сприяє можливості використання методів цифрової фотограмметрії для передачі висотних позначок та виконання орієнтирно-з'єднувальних зйомок в умовах шахтного ствола.

Головною перевагою запропонованого рішення є те, що зйомка займає менший час у порівнянні з традиційними методами (дані можна отримати за лічені хвилини), а отримані моделі містять детальну характеристику об'єкта. При цьому немає необхідності у перекриванні шахтного ствола і можна використовувати його у якості запасного виходу.

В подальшому будуть досліджені питання орієнтування моделей, вибору певної кількості контрольних точок та розробленню програмного забезпечення для опрацювання даних в польових умовах.

Список літератури

1. **Dikhtiar S. V., Tomashevskaya A. O., Dolgikh L. V.** The relevant importance of the issue of enhancing the efficiency of orientation and connection surveys and height bench mark transfers. Innovative development of resource-saving technologies of mineral mining and processing. 2nd international scientific and technical Internet conference (Petroșani, Romania, November 15, 2019): book of abstracts. – Petroșani: Universitas Publishing, 2019. P. 114–116.
2. **Бизов В. Ф., Федоренко П. Й.** Маркшейдерська справа. Том VI. Підручник для студентів вищих навчальних закладів за напрямком «Гірництво». Кривий Ріг: Мінерал, 2000. 211 с.
3. **Борщ-Компониц В. И.** Геодезия. Маркшейдерское дело. Москва: Недра, 1989. 511 с.
4. **Діхтяр С. В., Томашевська А. О.** Підвищення точності передачі висот на глибокі горизонти шахти. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Розвиток промисловості та суспільства. 2020 р. Кривий Ріг: КНУ, 2020. С. 37.
5. **Люфт С. К., Бесимбаева О. Г., Бесимбаев Н. Г., Капасова А. З.** Использование метода лазерного сканирования для выполнения маркшейдерских работ в шахтном стволе. Энергетика и рациональное природопользование. 2015. №2. С. 204–209.
6. **Лесовой А. А.** Исследование ошибок внешних условий методами фотограмметрии. Вісник Криворізького національного університету: збірник наук. праць. Кривий Ріг. 2013. Вип. 34. С. 232–237.
7. **Bishop R. E.** Applications of Close-Range Terrestrial 3D Photogrammetry to Improve Safety in Underground Stone Mines. Mining and Minerals Engineering. Blacksburg, 2020. 184 P.
8. **Monsalve J., Baggett J., Bishop R., Ripeti N.** Application of laser scanning for rock mass characterization and discrete fracture network generation in an underground limestone mine. Proceedings of the 37th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, 2018. P. 183–192.
9. **Malte J. M., Gurgel, Preusse A.** New opportunities and challenges in surveying underground cavities using photogrammetric methods. International Journal of Mining Science and Technology, Volume 31, Issue 1, 2021. P. 9–13.
10. **Pereira M., Orfeo D., Ezequille W., Burns D., Xia T., Huston D.** Photogrammetry and Augmented Reality for Underground Infrastructure Sensing, Mapping and Assessment. International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC). 2020. P. 169–175.
11. **Benton D. J., Seymour J. B., Boltz M. S., Raffaldi M. J., Finley, S. A.** Photogrammetry in underground mining ground control – Lucky Friday mine case study: Proc. 8th. Deep and High Stress Mining, Perth, Australia. 2017. P. 587–598.

Рукопис подано до редакції 26.03.2021