Г. В. Бабіюк /д. т. н./

Державний університет інфраструктури
та технологій, м. Київ, Україна

В. Ф. Пунтус

Донбаський державний технічний університет,
м. Лисичанськ, Україна
e-mail: G.V.Babiyuk@gmail.com

Оперативний геоконтроль при кріпленні виробок анкерами

G. V. Babiyuk /Dr. Sci. (Tech.)/

State University of Infrastructure and
Technologies, Kyiv, Ukraine

V. F. Puntus

Donbas State Technical University,
Lysychansk, Ukraine
e-mail: G.V.Babiyuk@gmail.com

On-going geocontrol while mounting anchors

Мета. Розробка способу оперативного визначення механічних властивостей гірських порід шляхом фіксації чистого часу буріння 1 м шпuru.

Методика. Визначення механічних показників гірських порід (міцності на одноосовий стиск) в режимі реального часу з використанням автоматизованої системи геоконтролю.

Результати. Розроблено спосіб оперативного визначення показників гірських порід і методику управління процесом кріплення виробок анкерами, які добре вписуються в концепцію системи геомеханічного моніторингу, що створюється.

Наукова новизна. Запропоновано визначати в режимі реального часу деформаційні і міцнісні показники гірських порід на підставі використання залежності між чистим часом буріння шпuru і коефіцієнтом міцності порід проф. М. М. Протодьяконова.

Практична значущість. Вирішення проблеми невизначеності зі встановленням технологічних параметрів кріплення гірничих виробок анкерами.

Ключові слова: спосіб, міцність, гірські породи, швидкість буріння, чистий час буріння, шпур, анкер, геомеханічний моніторинг. (Іл. 4. Табл. 2. Бібліогр.: 8 назв.).

DOI: 10.33101/s001-1300119

Постановка проблеми. Підземні виробки споруджують і підтримують у мінливих умовах, що пояснюється неоднорідністю властивостей масиву гірських порід, постійними змінами напружено-деформованого стану порід навколо виробки, імовірнісним характером прояву гірського тиску вздовж виробки і випадковою взаємодією анкерів з породами.

У подібних умовах довгострокову стійкість виробок можна забезпечити лише при прийнятті рішень щодо кріплення виробок анкерами на основі використання методології функціонування системи геомеханічного моніторингу. Під нею зазвичай розуміють автоматизовану інформаційно-вимірювальну систему безперервного (або періодичного) контролю, діагностики і прогнозування фізико-механічних властивостей порід і напружено-деформованого стану геомеханічного середовища, що здійснюються з метою підвищен-

ня рівня надійності і безпечності експлуатації виробок [1].

Тому для створення системи геомеханічного моніторингу необхідно мати експрес-метод визначення механічних показників гірських порід безпосередньо у масиві, який дозволяв би одночасно з виконанням робіт з укріплення виробки отримувати потрібну інформацію і оперативно коригувати його параметри (щільність встановлення анкерів, їхню довжину, несучу спроможність тощо) у міру зміни ситуації вздовж виробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час оцінювання стійкості виробок і призначення параметрів анкерного кріплення головними вихідними даними є міцнісні і деформаційні показники різних за властивостями шарів порід, які залягають на тій чи іншій відстані від контуру й орієнтовані певним чином у відношенні до поверхонь напруження, тріщин та інших дефектів структури.

Традиційний спосіб визначення цих показників шляхом лабораторних випробувань зразків [2], які відбирають з поверхні виробки або під час буріння шпурів, не відповідає сучасним вимогам з точки зору необхідності мати детальну і достовірну інформацію про неоднорідні породи, мінімальну вартість робіт, можливості своєчасного отримання даних, високу продуктивність, технологічність, автоматизацію і незначну трудомісткість визначення показників. Тим більше що інформація про механічні властивості порід, яку отримують шляхом лабораторних випробувань зразків, суттєво відрізняється від аналогічних даних, які визначають безпосередньо у масиві, через вплив масштабного та інших чинників.

Відомий безкерновий спосіб визначення механічних показників гірських порід, що здійснюється з допомогою пристрою (пінометра), який призначений для вивчення властивостей порід безпосередньо у шпурі, пробуреному з виробки [3]. З його використанням реалізується експрес-метод визначення деформаційних (E – модуль пружності, μ – коефіцієнт Пуассона) і міцнісних (σ_c – межа міцності на стиск) показників за результатами втискування сферичного індентора у стінку шпуру діаметром 42 мм, що використовується для встановлення анкерів, подальшої камеральної побудови діаграм «навантаження – переміщення» та інтерпретації отриманих даних на базі розв’язання задачі Герца в пружній постановці про втискування сфери у стінку циліндричного жолобу і гіпотези Грифітса щодо проростання тріщини під час руйнування тіла.

Однак цей спосіб не повною мірою відповідає сформульованим принципам оперативного отримання масової і достовірної інформації, і не забезпечує високу продуктивність праці при зборі даних. Для його реалізації треба бурити додаткові шпури та проводити в них велику кількість вимірів, причому лише на одне вимірювання витрачається більш ніж три хвилини. За результатами випробувань потрібно будувати графічні діаграми, інтерпретація яких не виключає можливості суб’єктивних помилок, а використання різних за своєю суттю і не зовсім правомірних припущень передбачає статистичне порівняння результатів випробувань шляхом втискування з даними дослідів на стиснення. Тому спосіб не можна використовувати в рамках системи, що створюється,

бо на вимірювання і визначення показників буде витрачатися багато часу та додаткові ресурси.

У той же час загальновідома залежність технологічних параметрів процесу буріння шпурів (чистого часу буріння 1 м шпурі t_0 , хв/м) від міцнісних властивостей гірських порід, яка широко використовується у гірництві для класифікації порід за буримістю (згідно з безрозмірним коефіцієнтом міцності f проф. М. М. Протоджанова) і нормування гірничопрхідницьких робіт. Проведений у дослідженні [4] аналіз показав, що міцність гірських порід на стиснення σ_c є достатньо чутливою щодо реакції процесу буріння різними буровими машинами та інструментами на її вимірювання. Нескладність методів визначення цієї залежності й кореляційні зв’язки з іншими механічними показниками обумовлюють її перспективність для використання при оперативному контролі властивостей гірських порід безпосередньо в ході буріння шпурів під анкери.

Подібні теоретичні моделі для оцінки міцності гірської породи на стиснення шляхом вивчення взаємодії бурового інструмента з породою в процесі буріння шпурів пропонуються і в закордонних публікаціях [5].

Формулювання мети. Мета цієї роботи полягає в розробці способу оперативного визначення показників властивостей гірських порід, які характеризують опір їх руйнуванню, який можна використовувати при створенні автоматизованої системи геомеханічного моніторингу, а також в обґрунтуванні методики визначення міцності гірської породи на стиснення через чисту швидкість буріння шпурі.

Основний матеріал дослідження. Запропонований спосіб визначення механічних показників гірських порід реалізується таким чином (рис. 1).

Рис. 1. Спосіб визначення механічних показників гірських порід:

- 1 – шпур; 2 – бурове обладнання; 3 – вимірювальний блок;
4 – буровий інструмент; 5 – універсальний мікропроцесорний пристрій (мікроконтролер); 6 – радіомодем; 7 – телекомунікаційна система;
8 – комп'ютер

У виробці бурять шпури для встановлення анкерів і одночасно випробують породу для визначення її властивостей. Для цього бурове обладнання з метою збору даних безпосередньо у процесі буріння протяжної частини шпуру обладнують вимірювальним блоком, а руйнування породи буровим інструментом (різцем, коронкою, долотом) виконують у режимі, який відповідає найбільш ефективній фазі руйнування породи (об'ємній). При цьому за допомогою вимірювального блоку фіксують зусилля подачі F і число обертів бурового інструмента n (швидкість обертання бура), та через певні проміжки часу вимірюють лінійні переміщення податника у глибину масиву. Вирішення цього питання найкращим чином забезпечується при автоматизації процесу на основі оптимізації механічної швидкості буріння у поточних умовах взаємодії бурового інструмента з породою у вибої шпуру. Відзначимо, що це не виключає необхідності попереднього обґрунтування засобів, способу і показників буріння шпурів на стадії проектування процесу, для чого потрібні відповідні технологічні класифікації порід за буримістю, наприклад, як у праці [4].

Отримані при бурінні дані за допомогою універсальних мікропроцесорних пристроїв, які входять до складу автоматизованої системи геоконтролю масиву гірських порід, проходять періодичну обробку, перетворюються в електричний сигнал, запам'ятовуються і підготовлюються для передачі каналами безпроводного зв'язку на пункт приймання. Наявність мікроконтролера у складі пристрою первинної обробки інформації дозволяє достатньо гнучко (програмовано) задавати команди для спрацювання датчиків і передавання за допомогою радіомодема параметра, що контролюється, в телекомунікаційну систему гірничого підприємства. Радіомодем здійснює передавання інформації як з мікроконтролера при її зчитуванні в телекомунікаційну систему, так і в мікроконтролер при запиті параметра чи програмному дистанційному управлінні випробуваннями під час буріння шпуру.

У диспетчерській у режимі реального часу з використанням комп'ютера отримують залежність механічної швидкості буріння V_M від величини осьового зусилля F ($V_M = \varphi(F)$) при фіксованій швидкості обертання бурового інструмента і відповідну їй залежність міцності гірської породи на одноосьовий стиск σ_c від швидкості буріння (чистого часу буріння $t_0 = 1/V_M$ хв/м). Залежність $\sigma_c = \varphi(V_M)$ корелює із залежністю $V_M = \varphi(F)$, що надає право оцінювати на різних відстанях від контуру виробки механічні властивості порід і призначати раціональні параметри анкерного кріплення (довжину шпуру, несучу спроможність

анкера тощо). Описаний спосіб захищений патентом [6].

Методику встановлення залежності $\sigma_c = \varphi(V_M)$ продемонструємо на прикладі обладнання, що використовується у гірничій галузі, для буріння шпурів і загальноприйнятої класифікації гірських порід за буримістю [7]. При визначенні чистого (для основної операції) часу буріння t_0 одного метра шпуру в ЕНВ [7] породи поділяються на категорії за буримістю, використовуючи для цього безрозмірний коефіцієнт міцності f проф. М. М. Протождяконова. Взагалі в ЕНВ виділено XIX категорій, причому найбільш м'яка порода (вугілля) починається з IV категорії. Вихідну вибірку наведено в табл. 1 для ручного електричного свердла (СЕР), електрогідравлічного бура (ЕБГП), ручних пневматичних перфораторів (ПР, ПП), мобільних бурильних установок на пневматичній (БУ-1М, БУР-2) і електричній (БУЕ, УБШ) енергії. У табл. 2 подано дані для середньої швидкості буріння V_M у діапазоні вимірювання коефіцієнта міцності порід в тій чи іншій категорії.

Таблиця 1

Час буріння шпуру різними буровими машинами для категорій порід за буримістю згідно з [7]

Категорія гірських порід за буримістю	Коефіцієнт міцності М. М. Протождяконова f	Основний (чистий) час буріння 1 м шпуру t_0 , хв						
		ручним електросвердлом СЕР-19М	електрогідравлічним буром, колонковим свердлом ЕБГП	ручним пневматичним перфоратором			бурильною установкою	
				ПР-27, ПР-30	ПР-24, ПР-25	ПП-50, ПП-54, ПП-55, ПП-63	БУ-1М, БУР-2	БУЕ-1, БУЕ-1М, БУЕ-2, УБШ-252(253), УБШ-313А
IV	0,6–0,8	0,735	-	-	-	-	-	-
V	0,9–1,1	1,075	-	-	-	-	-	-
VI	1,2–1,5	1,525	1,255	-	-	-	-	-
VII	1,6–1,9	2,03	1,655	-	-	-	-	-
VIII	2,0–2,5	2,705	2,205	-	-	-	0,93	0,7
IX	2,6–3,2	3,715	2,805	2,7	2	1,7	1,0835	0,82
X	3,3–3,9	5,06	3,505	3,3	2,6	2,2	1,304	1
XI	4,0–5,0	6,855	4,305	4,1	3,2	2,7	1,564	1,16
XII	5,1–6,0	8,985	5,405	5,1	3,9	3,25	1,8655	1,4
XIII	6,1–7,5	11,805	6,705	6,3	4,8	4,1	2,2205	1,94
XIV	7,6–9,0	15,155	8,305	7,6	5,8	5	2,6285	2,725
XV	9,1–10,8	-	10,555	9,2	7,0	5,9	3,103	3,82
XVI	10,9–12,9	-	13,1	11,0	8,4	7,1	3,6465	-
XVII	13,0–15,5	-	-	13,2	10	8,5	4,267	-
XIII	15,6–18,4	-	-	15,7	12	10,1	4,972	-
XIX	18,5–21,5	-	-	18,7	14,3	12,1	5,7675	-

Вибірки графічно проаналізовані відповідно на рис. 2 і 3. Аналіз продемонстрував наявність достатньо тісного зв'язку між середньою швидкістю буріння шпuru V_M і коефіцієнтом міцності порід f , який описується ступеневими залежностями. На рис. 3 і надалі показник тісноти зв'язку такий:

$$R^2 = 1 - D(y_i - \hat{y}_i) / D(y_i), \quad (1)$$

де $D(y_i - \hat{y}_i)$ – дисперсія відхилення фактичних значень від розрахованих за рівнянням тренду;
 $D(y_i)$ – дисперсія фактичних значень.

Отже, чим ближче R^2 до одиниці, тим достовірніша отримана залежність.

З показників, що характеризують фізико-механічні властивості гірських порід, міцність на одноосьове стиснення σ_c – головна при проектуванні й плануванні технологічного процесу буріння шпурів. Зв'язок між коефіцієнтом міцності f і міцністю порід на стиск найкращим чином описується емпіричною залежністю, яка відома як формула Л. І. Барона [8]:

$$f \approx \sigma_c / 30 + (\sigma_c / 3)^{0.5}, \quad (2)$$

де σ_c – міцність на одноосьовий стиск, МПа.

Обробивши дані табл. 2 за формулою (2), методом найменших квадратів отримаємо залежності міцності гірських порід на стиснення σ_c від швидкості буріння шпuru V_M , які наведено на рис. 4. Для усіх бурильних машин, окрім БУЕ і УБШ, формули мають ступеневий вид, а для БУЕ і УБШ – логарифмічний. Усі величини достовірності апроксимації близькі до одиниці, що свідчить про практично функціональний зв'язок.

Аналогічним чином потрібно діяти під час контролю інших показників міцнісних і деформаційних властивостей гірських порід. У цих ви-

Таблиця 2

Швидкість буріння шпuru різними бурильними машинами для категорій порід за буримістю

Категорія гірських порід за буримістю	Коефіцієнт міцності М. М. Протодьяконова f	Механічна швидкість буріння шпuru V_M м/хв						
		ручним електросвердлом СЕР-19М	електрогідрравлічним буром, колонковим свердлом ЕБГП-1	ручним пневматичним перфоратором			бурильною установкою	
				ПР-27, ПР-30	ПР-24, ПР-25	ПП-50, ПП-54, ПП-55, ПП-63	БУ-1М, БУР-2	БУЕ-1, БУЕ-1М, БУЕ-2, УБШ-252(253), УБШ-313А
IV	0,7	1,36	-	-	-	-	-	-
V	1	0,93	-	-	-	-	-	-
VI	1,35	0,66	0,80	-	-	-	-	-
VII	1,75	0,49	0,60	-	-	-	-	-
VIII	2,25	0,37	0,45	-	-	-	1,08	1,43
IX	2,9	0,27	0,36	0,37	0,50	0,59	0,92	1,22
X	3,6	0,20	0,29	0,30	0,38	0,45	0,77	1,00
XI	4,5	0,15	0,23	0,24	0,31	0,37	0,64	0,86
XII	5,55	0,11	0,19	0,20	0,26	0,31	0,54	0,71
XIII	6,8	0,08	0,15	0,16	0,21	0,24	0,45	0,52
XIV	8,3	0,07	0,12	0,13	0,17	0,20	0,38	0,37
XV	9,95	-	0,09	0,11	0,14	0,17	0,32	0,26
XVI	11,9	-	0,08	0,09	0,12	0,14	0,27	-
XVII	14,25	-	-	0,08	0,10	0,12	0,23	-
XIII	17	-	-	0,06	0,08	0,10	0,20	-
XIX	20	-	-	0,05	0,07	0,08	0,17	-

Рис. 2. Залежність чистого часу буріння 1 м шпuru від коефіцієнта міцності порід для різних бурильних машин

Рис. 3. Графіки середньої швидкості буріння шпуру при зміні коефіцієнта міцності порід для різних бурильних машин і відповідні емпіричні залежності

Рис. 4. Графіки міцності гірської породи на стиск при зміні швидкості буріння шпуру для різних бурильних машин і відповідні емпіричні залежності

падках необхідно або використовувати вже відомі формули, або отримувати нові залежності того чи іншого показника від коефіцієнта міцності порід.

Таким чином, безпосередньо при бурінні шпурів у натурних умовах здійснюється автоматизований контроль показників міцнісних і деформаційних властивостей порід на різних відстанях від контуру виробки. Метод забезпечує можливість отримання доступної для шахт інформації та управління процесом укріплення виробок анкерами.

Коректність методу перевірена шляхом зіставлення показників міцності порід, які встановлені, виходячи із їх опору руйнуванню бурінням, з результатами еталонних випробувань циліндричних зразків на одноосовий стиск зубчатими накладками по боковій поверхні необроблених кернів, а також на їх розколювання сферичними інденторами.

Висновки. Розроблений спосіб добре вписується у концепцію системи геомеханічного моніторингу, що створюється, і дозволяє автоматично в режимі реального часу визначати механічні по-

казники гірських порід та коригувати параметри кріплення згідно з реальними випробуваннями опору порід руйнуванню бурінням безпосередньо на місці виконання робіт.

Такий спосіб суттєво спрощує процедуру механічних випробувань порід, забезпечує масове отримання достовірних і детальних (для кожного шару порід) показників механічних властивостей порід навколо виробки, дозволяє економити кошти і ресурси, а також дає можливість приймати оперативні і більш надійні рішення щодо кріплення виробки анкерами, ґрунтуючись на результатах контролю властивостей порід. За рахунок цього забезпечується довгострокова стійкість виробки і знижуються витрати на її ремонт і підтримання протягом строку служби.

Бібліографічний список / References

1. Фундаментальные и прикладные задачи геомеханического мониторинга. Ч. 1. Введение в проблему и общие вопросы / М. В. Курленя, В. Г. Леонтьев, В. Г. Беляков и др. // ФТПРПИ. – 1996. – № 2. – С. 3–20.

Kurlenya M. V., Leontev V. G., Belyakov V. G. (1996). *Fundamentalnye i prikladnye zadachi geomekhanicheskogo monitoringa. Part 1. Vvedenie v problemu i obshchie voprosy.* FTPRPI. No. 2, pp. 3-20.

2. Свойства горных пород и методы их определения / Е. И. Ильницкая, Р. И. Тедер, Е. С. Ватолин, М. Ф. Кунтыш; под ред. проф. М. М. Протоdjаконова. – М.: Недра, 1969. – 392 с.

Il'nitskaya E. I., Teder R. I., Vatin E. S., Kuntysch M. F. (1962). *Svoystva hornykh porod i metody ich opredeleniya.* Moscow, Nedra, 392 p.

3. Экспресс-метод определения прочностных и деформационных свойств пород / В. А. Ануфриев, Н. В. Денискин, В. Н. Федоринин, В. Н. Цыцаркин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГУ, 2004. – № 2. – С. 77–82.

Anufriev V. A., Deniskin N. V., Fedorinin V. N., Tsytsarkin V. N. (2004). *Ekspres-metod opredeleniya prochnostnykh i deformatsionnykh svoystv porod.* Hornyj informatsionno-analiticheskij byuleten. No. 2, pp. 77-82.

4. Танайно А. С. О классификации горных пород по буримости. Ч. 2: Каноническое представление показателей свойств горных пород в классификации сопротивляемости их разрушению / А. С. Танайно // ФТПРПИ. – 2008. – № 6. – С. 86–104.

Tanajno A. S. (2008). *O klasifikastij hornykh porod po burimosti. Part 2. Kanonicheskoe predstaenienie pokazatelej svoystv hornykh porod v klassifikastiy soprotivlyaemosti ich razruscheniyu.* FTPRPI. No. 6, pp. 86-104.

5. Sajjad Kalantar, Hamid Hashemolhosseini, Alireza Baghbanan. Estimation rock strength parameters using drilling data. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 104. Pp. 45-52.

6. Пат. № 95903 Україна, МПК (2015.01) G 01N 3/00, E 02D 1/00. Спосіб визначення механічних показників гірських порід / Г. В. Бабіюк, В. Ф. Пунтус. – -и 2014 08226; заявл. 21.07.2014; опубл. 12.01.2015. Бюл. № 1/ 2015.

Babiyuk G. V., Puntus V. F. (2015). *Sposib vyznachennya mekhanichnykh pokaznykiv hirskeykh porid.* Pat. No. 95903 Ukrayina. G 01N 3/00, E 02D 1/00. Byul. No. 1.

7. Єдині норми виробітку на гірничопідготовчій роботі для вугільних шахт. – К.: Мінпаливенерго України, 2004. – 302 с.

Edyni normy vyrobittku na hirnychopidhotovchi roboty dlya vugilnykh schacht. 2004. 302 p.

8. Барон Л. И. Коэффициенты крепости горных пород / Л. И. Барон. – М.: Недра, 1972. – 172 с.

Baron L. I. (1972). *Koeffistienty kreposti hornykh porod.* Moscow, Nedra, 172 p.

Цель. Разработка способа оперативного определения механических свойств горных пород путем фиксации чистого времени бурения 1 м шпура.

Методика. Определение механических показателей горных пород (прочности на одноосное сжатие) в режиме реального времени с использованием автоматизированной системы геоконтроля.

Результаты. Разработаны способ оперативного определения показателей горных пород и методика управления процессом крепления выработок анкерами, которые хорошо вписываются в концепцию создаваемой системы геомеханического мониторинга.

Научная новизна. Предложено определять в режиме реального времени деформационные и прочностные показатели горных пород на основе использования зависимости между чистым временем бурения шпура и коэффициентом крепости пород проф. М. М. Протоdjаконова.

Практическая значимость. Решение проблемы неопределенности при назначении технологических параметров крепления горных выработок анкерами.

Ключевые слова: способ, прочность, горные породы, скорость бурения, чистое время бурения, шпур, анкер, геомеханический мониторинг.

Purpose. Development of method for rocks mechanical properties rapid determination by the fixation of 1m borehole net drilling time.

Methodology. Determination of mechanicals properties of rocks (uniaxial compression strength) in real-time mode using an automated geocontrol system.

Findings. A method for rapid determination of rocks properties and methodology for anchor production mounting process governance have been developed.

Originality. Real time determination of the deformation and strength characteristics of rocks based on the correlation between borehole net drilling time and the coefficient of the strength of the prof. M.M. Protodyakonov.

Practical value. Definition of technological parameters in anchor production mounting process.

Key words: method, strength, rocks, drilling speed, drilling time, hole, anchor, geotechnical monitoring.

Рекомендована до друку д. т. н. Г. І. Гайко
Надійшла 18.04.2019