

Дослідження та методи аналізу

УДК 622.026

ПРО ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МАСИВУ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ БУРІННІ ГЛИБОКИХ СВЕРДЛОВИН

¹Е.М. Барановський, ²В.М. Мойсишин

¹ ПВ УкрДГРІ; 36002, м. Полтава, вул. Фрунзе, 149; тел. (0532) 592666;
e-mail: p v u k r d g r i @ m a i l . l v i v . u a

² ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42123,
e-mail: m a t h @ n u n g . e d u . u a

На основі комплексного підходу, що включає аналіз і узагальнення науково-технічних досягнень та промислові дослідження, вперше теоретично обґрунтовано і підтверджено промисловим матеріалом, що потенціальна енергія деформації є основним чинником, який впливає на геомеханічні процеси при бурінні глибоких свердловин. При енергетичній оцінці стану гірського масиву використано виведені формули для визначення питомої потенціальної енергії деформації та її складових. Встановлено залежність ефективності комбінованого руйнування гірської породи від співвідношення питомої механічної енергії руйнування породи і питомої потенціальної енергії зміни об'єму. Запропоновано способи керування геомеханічними процесами при проведенні бурових робіт.

Ключові слова: гірський масив, геомеханічний процес, саморуйнування гірської породи, свердловина, буріння.

На основании комплексного подхода, включающего анализ и обобщение научно-технических достижений, а также промышленные исследования, впервые теоретически обосновано и подтверждено промышленным материалом, что потенциальная энергия деформации является основным фактором, влияющим на геомеханические процессы при бурении глубоких скважин. При энергетической оценке состояния горного массива использованы формулы, полученные авторами для определения удельной потенциальной энергии деформации и ее составляющих. Установлена зависимость эффективности комбинированного разрушения породы и удельной потенциальной энергии изменения объема. Предложены способы управления геомеханическими процессами при проведении буровых работ.

Ключевые слова: горный массив, геомеханический процесс, саморазрушение горной породы, скважина, бурение.

On the basis of complex approach, that includes the analysis and generalization of scientific and technical achievements, industrial researches, theory mentioned at first and it is confirmed by industrial material, that potential energy of deformation is a basic factor which affects geomechanical processes at the boring drilling of deep mining holes. At power estimation of being of mountain range the shown formulas out are used for determination of specific potential energy of deformation and its constituents. Dependence of efficiency of the combined destruction of mountain breed is set on correlation of specific mechanical energy of destruction of breed and specific potential energy of change of volume. The methods of geomechanical process control are offered during conducting of boring works.

Keywords: mountain range, geomechanical process, self-destruction of mountain breed, mining hole, boring drilling.

Аналіз інформаційних джерел свідчить, що в напруженому масиві відбувається накопичення величезних запасів потенціальної енергії, яка може реалізуватися у вигляді різних, в тому числі і динамічних проявів. Сили гірського тиску виконують величезну роботу, яка при некерованих процесах вивільнення енергії, у проце-

сі проведення гірничих робіт реалізується в різних негативних проявах, пов'язаних з руйнуваннями гірського масиву.

Відомо [1, 2], що частина потенціальної енергії витрачається на зміну об'єму елемента породи $u_{об}$, а частина – на зміну його форми $u_{ф}$.

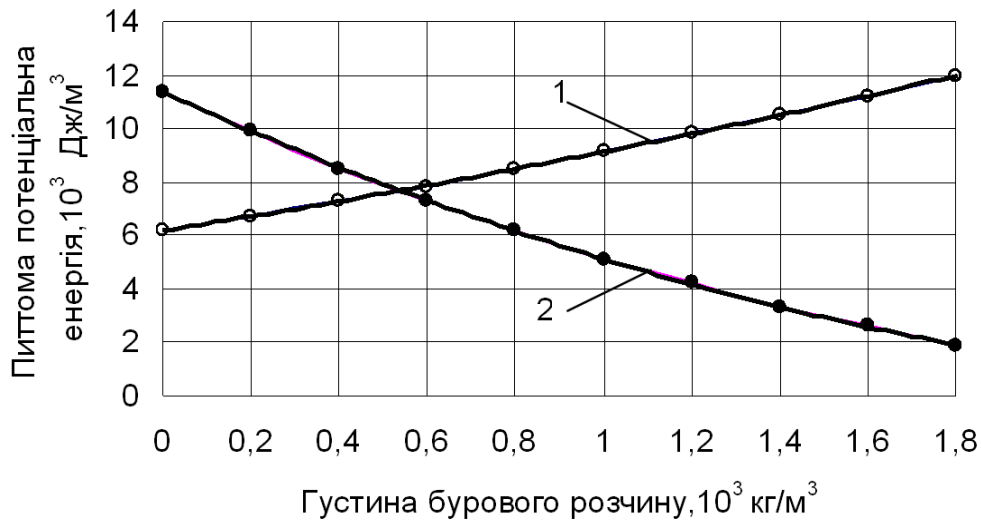


Рисунок 1 – Залежність складових питомої потенціальної енергії зміни об'єму (1) та форми (2) від густини бурового розчину

Таким чином, можна вважати, що повна питома потенціальна енергія деформації дорівнює:

$$u = u_{об} + u_{\phi}. \quad (1)$$

Для визначення питомої потенціальної енергії деформації та її складових у випадку об'ємного напруженого стану запропоновано формули [1]:

$$u = \frac{1}{2E} g^2 H^2 [\rho_n^2 (5 - 4\mu) - 4 \rho_n \rho_p (1 + \mu) + 2 \rho_p^2 (1 + \mu)], \quad (2)$$

$$u_{об} = \frac{1 - 2\mu}{6E} g^2 H^2 (9 \rho_n^2 + 12 \rho_n \rho_p + 4 \rho_p^2), \quad (3)$$

$$u_{\phi} = \frac{1 + \mu}{E} g^2 H^2 (\rho_n^2 - 2 \rho_n \rho_p + \rho_p^2). \quad (4)$$

де: μ – коефіцієнт Пуассона; E – модуль Юнга; g – прискорення вільного падіння; H – глибина виробки; ρ_n, ρ_p – густина породи і рідини відповідно.

Представлені формули є теоретичними основами для аналізу змінюваних складових питомої потенціальної енергії деформації. За фактичними даними, отриманими при бурінні Кольської надглибокої свердловини (СГ-3), проведено розрахунки питомих потенціальних енергій зміни об'єму і форми та побудовано графік (рис. 1). На графіку зображено характер зміни складових питомої потенціальної енергії деформації в залежності від величини густини бурового розчину. Точка перетину кривих питомих потенціальних енергій зміни об'єму і форми є величиною густини бурового розчину, за якої вони рівні. При збільшенні або зниженні густини бурового розчину ці складові набувають значень, які відповідають породі, що знаходиться в об'ємному або плоскому напруженому стані.

Під стійкістю гірничої виробки розумітимемо здатність матеріальної системи зберігати свій стан в умовах збурюючих чинників техно-

логічної дії. Кількісну оцінку стійкості (K_{cm}) з урахуванням енергії гірського масиву можна подати [3] так:

$$K_{cm} = \frac{[u]}{u} = \frac{\sigma^2}{g^2 H^2} \times$$

$$\times \frac{1}{[\rho_n^2 (5 - 4\mu) - 4 \rho_n \rho_p (1 + \mu) + 2 \rho_p^2 (1 + \mu)]}, \quad (5)$$

$$K'_{cm} = \frac{[u_{об}]}{u_{об}} = \frac{\sigma^2}{g^2 H^2 (9 \rho_n^2 + 12 \rho_n \rho_p + 4 \rho_p^2)}, \quad (6)$$

$$K''_{cm} = \frac{[u_{\phi}]}{u_{\phi}} = \frac{\sigma^2}{3 g^2 H^2 (\rho_n^2 - 2 \rho_n \rho_p + \rho_p^2)}. \quad (7)$$

де: $[u], [u_{об}], [u_{\phi}]$ – вирази питомих потенціальних енергій для випадку лінійного напруженого стану; σ – допустиме значення нормального напруження, прийняте для лінійного розтягу або стиснення.

Результати розв'язання практичних задач стійкості гірничих виробок засвідчили, що неможливо ігнорувати непружні властивості порід, оскільки це спотворює не тільки кількісну, але і якісну сторону динамічного явища. У зв'язку з цим для умов глибокого буріння запропоновано формулу для визначення коефіцієнта розсіювання енергії (ψ)

$$\psi = \frac{u_{\phi}}{u_{об} + u_{\phi}}. \quad (8)$$

Для встановлення закономірності впливу непружних динамічних характеристик гірських порід на ускладнення, зроблено аналіз залежності параметра пружної анізотропії і коефіцієнта розсіювання енергії порід від глибини свердловини. В межах всього розрізу свердловини СГ-3 виділено ряд геоблоків (поверхів), які відрізняються параметрами просторового розміщення площини анізотропії (табл. 1). У даному випадку під терміном "поверх" розуміється ін-

Таблиця 1 – Параметри пружної анізотропії та коефіцієнт розсіювання енергії масиву по розрізі СГ-3

Номер поверху	Інтервал, м	Потужність, м	Азимут простягання площини анізотропії θ , град.	Кут падіння площини анізотропії α_c , град.	Параметр анізотропії B_c	Коефіцієнт розсіювання енергії ψ
1	0-1200	1200	—	—	0,05	0,335
2	1200-1800	500	ПдСх 118	ПдСх 40	0,04	0,320
3	1800-2100	300	—	ПдЗх 0-90	0,13	0,309
4	2100-4400	2300	ПдСх 118	ПдЗх 40	0,06	0,301
5	4400-6200	1800	ПнСх 90	ПдЗх 60-70	0,18	0,297
6	6200-7600	1400	ПдСх 127	ПдЗх 50-60	0,22	0,293
7	7600-8600	1000	ПнСх 80	ПдСх 50	0,31	0,220
8	8600-10150	1550	ПнСх 40	ПдСх 40	0,28	0,199
9	10150-11100	950	ПдСх 120	ПнЗх 40	0,20	—
10	>11100	>1160	ПнСх 35	ПнЗх 40	0,19	—

тервал глибин, в межах якого витримуються приблизно однакові значення азимута, простягання кута падіння площини анізотропії параметра B_c .

Отримані результати аналізу (табл. 1) свідчать про те, що в умовах глибокого буріння коефіцієнт розсіювання енергії може слугувати параметром для прогнозування і попередження ускладнень.

Для встановлення впливу флюїдів на напружений стан продуктивного пласта запропоновано формули [4] для визначення питомої потенціальної енергії пласта та її складових у випадку об'ємного напруженого стану

$$u_p = \frac{1}{2E} \left\{ g^2 H^2 \left[\rho_n^2 (5 - 4\mu) - 4\rho_n \rho_p (1 + \mu) + 2\rho_p^2 (1 + \mu) \right] + 6gHA(1 - 2\mu) + 3A^2(1 - 2\mu) \right\} \quad (9)$$

$$u_{обp} = \frac{1 - 2\mu}{2E} \left[g^2 H^2 (9\rho_n^2 + 12\rho_n \rho_p + 4\rho_p^2) + gHA(18\rho_n + 12\rho_p) + 9A^2 \right], \quad (10)$$

$$u_{фp} = \frac{1 + \mu}{E} g^2 H^2 (\rho_n^2 - 2\rho_n \rho_p + \rho_p^2), \quad (11)$$

де: $A = p \left[\frac{1 + \mu}{(1 - 2\mu)\alpha\Delta T} + \frac{1 + \mu}{1 - \mu} \right]$; p – тиск флюїду; α – коефіцієнт теплового розширення породи; ΔT – перепад температури на стінці свердловини.

Аналіз наведених формул засвідчує, що пластовий тиск не впливає на формування питомої потенціальної енергії зміни форми.

За наявності відповідної кількості енергії можна отримати принципово новий спосіб комбінованого руйнування, в якому проходять два процеси – саморуйнування породи, викликане накопиченою енергією в гірському масиві, і механічне руйнування, спрямоване на подрібнення породи.

Для визначення питомої енергії, затраченої на механічне руйнування породи, скористаємось формулою:

$$u_p = 4 \frac{G \cdot n}{\kappa D V_m}, \quad (12)$$

де: G – осьове навантаження на долото; n – частота обертів долота; κ – коефіцієнт, який залежить від властивостей породи, типу і конструкції долота; D – діаметр долота; V_m – механічна швидкість буріння.

У процесі буріння кільцевим вибоєм формула приймає вигляд:

$$u_p = 4 \frac{G \cdot n}{\kappa (D + d) V_m}, \quad (13)$$

де d – діаметр керна.

На підставі наведених формул для свердловини СГ-3 зроблено розрахунки з метою встановлення залежності ефективності комбінованого руйнування гірської породи від співвідношення питомої механічної енергії руйнування породи і питомої енергії зміни об'єму. Як видно з графіка (рис. 2), процес ефективного комбінованого руйнування породи починається з глибини $H > 5500$ м, так як у цьому випадку $u_{об} > u_p$.

Не зважаючи на те, що руйнування має різний характер, принцип керування ним у всіх випадках незмінний, і полягає в регульованій дії на поверхню, що дає змогу цілеспрямовано використовувати енергію гірського масиву. У зв'язку з цим набуває вагомого значення величина питомої механічної енергії руйнування в залежності від типу і конструкції долота. Із рівняння (12) видно, що для кожного типу долота питома енергія u_p може бути постійною при будь-якій комбінації величин G і n . Зміна величини добутку $G n$ може дати збільшення механічної швидкості буріння. Для доліт кожного типу існує певне раціональне співвідношення величин V_m і $G n$. Отже, питома енергія являє собою міру ефективності роботи долота в конкретних відкладах.

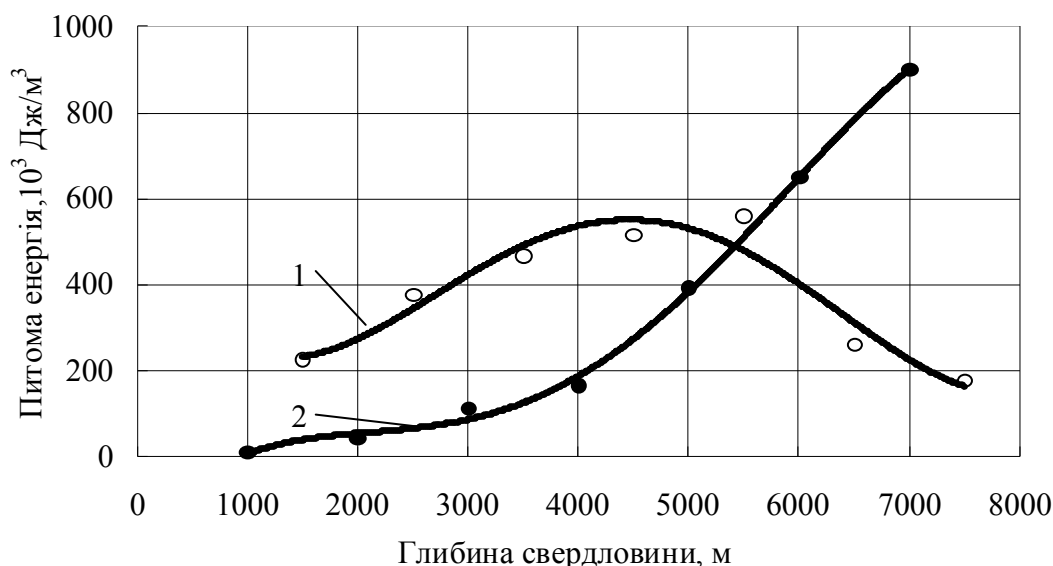


Рисунок 2 – Залежність комбінованого руйнування гірської породи від співвідношення питомої механічної енергії руйнування породи (1) і питомої потенціальної енергії зміни об'єму (2)

Таблиця 2 – Питома енергія механічного руйнування породи різними типами доліт

Тип долота	Кількість відроблених доліт, шт.	Проходка на долото, м	Механічна швидкість, м/год	Швидкість обертання, хв ⁻¹	Навантаження на долото, кН	$u_p, 10^3 \text{ Дж/м}^3$
Тришарошкове 4В-6АС	139	7,8	1,27	78	55	549
Алмазне АДС-6В, АД6С-1	15	122	1,02	78	55	687
Одношарошкове ОДТ-140	180	33,4	1,86	78	55	371
Фрезерне ДФТ-140	218	21,1	0,96	78	55	723

У таблиці 2 наведено розраховані дані зміни питомої енергії механічного руйнування породи для різних типів доліт діаметром 140 мм при відробці їх у крейдових відкладах в інтервалі 2500-4000 м. Отримані результати підтверджують викладені вище міркування.

Як свідчать результати досліджень, у ході проведення виробки у гірському масиві відбувається перерозподіл напружень, що призводить до їх концентрації у деяких зонах. У результаті стиснення і згину на поверхні вибою (в його центрі) утворюється зона стиснення, а біля контуру виробки – зона розтягу.

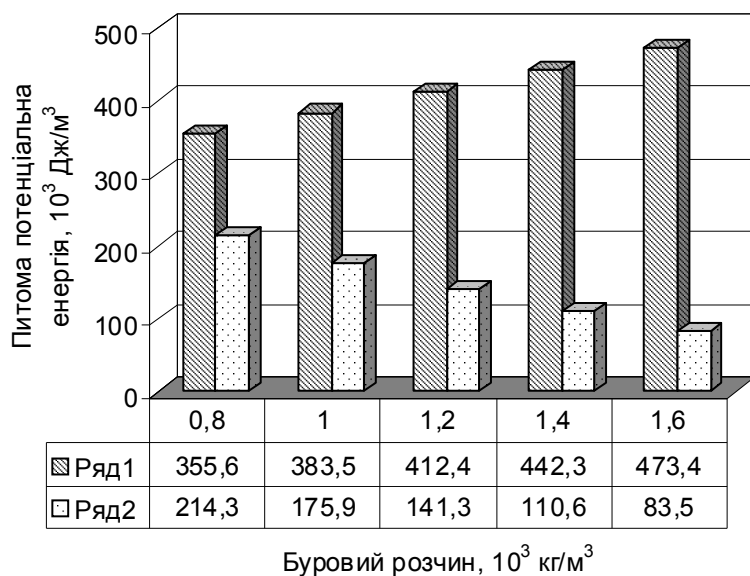
У разі створення в зонах умов для нестійкої рівноваги відбудеться руйнування. Руйнування розпочинається у зоні розтягу на поверхні вибою круговими тріщинами розриву під дією розтягуючих радіальних напружень.

Як відомо, класична задача геомеханіки полягає в тому, щоб знати і бути в змозі спрогнозувати реакцію породи на механічне навантаження: руйнування під долотом і руйнування на стінці свердловини. Таким чином, з метою

забезпечення бурових робіт у першому випадку необхідно активувати процес руйнування, а в другому – попередити або сповільнити його. Для цього необхідно керувати складовими питомою потенціальною енергії деформації, збільшуючи або зменшуючи густину бурового розчину.

На рисунку 3 зображена гістограма активації вказаних енергій в залежності від зміни густини бурового розчину. Дана гістограма дає можливість за значенням густини бурового розчину оцінити значення питомих потенціальних енергій зміни об'єму і форми, за яких можуть відбутися конкретні види ускладнень і попередити їх.

На підставі проведених досліджень розроблено методичні рекомендації з прогнозування та використання зміни складових енергій гірського масиву в глибокому бурінні, методичні вказівки з використання енергії гірського масиву при вирішенні проблеми стійкості стовбура свердловини і оптимізації умов відбору керна при його дискуванні.



ряд 1 – питома потенціальна енергія зміни об'єму;
ряд 2 – питома потенціальна енергія зміни форми

Рисунок 3 – Гістограма активації складових потенціальної енергії деформації залежно від зміни густини бурового розчину

Література

1 Барановський Е.М. Енергетична оцінка стану гірського масиву при бурінні глибоких свердловин / Е.М. Барановський // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 1(14). – С. 34-38.

2 Барановський Е.М. Кероване звільнення та використання енергії гірського масиву під час буріння глибоких свердловин / Е.М. Барановський, В.М. Мойсишин // Нафтова і газова промисловість. – 2007. – № 4. – С. 12-15.

3 Барановський Е.М. Характер зміни складових енергій деформації гірських порід в залежності від виду їх напруженого стану / Е.М. Барановський, В.М. Мойсишин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – № 2(23). – С. 42-45.

4 Мойсишин В.М. До оцінки потенціальної енергії продуктивного пласта при розкритті його в процесі буріння / В.М. Мойсишин, Е.М. Барановський // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2009. – № 3(32). – С.39-42.

Стаття надійшла до редакційної колегії
16.11.10

Рекомендована до друку за підсумками роботи науково-технічної конференції «Підвищення ефективності буріння свердловин та інтенсифікації нафтогазовидобутку на родовищах України» професором **Коцкучичем Я.С.**