

Фізико-технічні проблеми видобування енергоносіїв

УДК 622.026

ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЗМІНИ СКЛАДОВИХ ПОТЕНЦІАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ ГІРСЬКОГО МАСИВУ ПРИ БУРІННІ ГЛИБОКИХ СВЕРДЛОВИН

¹ Е.М.Барановський, ² С.В.Гошовський, ³ В.М.Мойсишин

¹ Комплексна лабораторія технології буріння та кріплення свердловин ПВ УкрДГРІ; 79018, м. Львів, вул. Тургенєва, 33; кімн. 45; тел. (032) 2373126; e-mail: pvukrdgri@mail.lviv.ua

² УкрДГРІ; 04114, м. Київ, вул. Автозаводська, 78

³ ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (03422) 42123; e-mail: math@nimg.edu.ua

Разработана система прогнозирования активации составляющих потенциальной энергии горного массива на основании использования установленной авторами закономерности изменения их на больших глубинах. Система может быть важной частью мероприятий по предупреждению аварий и осложнений при строительстве глубоких скважин.

The system of prognostication of activating of constituents of potential energy of mountain range on the basis of the use of the conformity to the law of their change set by authors on large depths is developed. The system can be important part of measures on warning of failures and complications at building of deep mining holes.

Під час буріння глибоких свердловин поряд з геолого-геофізичною інформацією отримують дані про екстремальні значення параметрів технологічного процесу в умовах складного напруженого стану гірських порід, високих пластових температур і тисків. З'ясувалось, що в цих умовах формується еліпсний близький до щілиноподібного стовбур з поперечними розмірами, які перевищують діаметр долота. Мають місце дискування керна, комбіноване руйнування порід, самовільне викривлення свердловин.

Огляд теоретичних та експериментальних досягнень технології і засобів буріння глибоких свердловин показав, що всі вони отримані на засадах руйнування гірських порід, як інертного матеріалу. Проте останні дослідження свідчать, що при проведенні гірничих виробок робота, яка йде на деформування гірських порід, накопичується у вигляді потенціальної енергії деформації. Причому частина її витрачається на зміну об'єму, а частина – на зміну форми [1].

Отримані результати досліджень на підставі використання складових енергії деформа-

ції гірських порід дали змогу встановити закономірності їх впливу на процеси, що супроводжують буріння свердловин. Все це вказує на те, що розробка нових прогресивних технологій проведення бурових робіт неможлива без досліджень, пов'язаних з використанням енергії гірського масиву. Це вимагає більш глибокого вивчення механізму кінетики руйнування гірських порід при різних режимах навантаження, розширення знань про природу руйнування гірського масиву та удосконалення аналітичних методів опису і оцінки його зміни. Саме тому важливого значення набуває визначення характеру зміни складових енергії деформації порід залежно від виду їх напруженого стану. Розвиток цих досліджень з метою встановлення невідомої раніше закономірності зміни складових потенціальної енергії гірського масиву в умовах глибокого буріння, і є предметом даної статті.

В гірничій справі визначення питомої потенціальної енергії деформації проводиться за формулами, наведеними в роботах [2, 3]. Це дає підстави провести енергетичну оцінку стану гірського масиву з метою з'ясування процесу

деформування порід та доцільності безвибухового проведення виробок. Однак перенесення в практику глибокого буріння рішень, які мають місце в гірничій справі, неможливе.

Бурова свердловина, яка є різновидністю гірничої виробки, суттєво відрізняється від шахтних стовбурів. Різниця полягає в тому, що на напружено-деформований стан гірських порід довкола свердловини можна діяти не тільки зміною конструкції і часу її проведення, але й, що особливо важливо, протитиском бурового розчину, який вибирається залежно від геолого-технологічних умов буріння свердловини.

Авторами даної статті виведено формули для визначення питомої потенціальної енергії деформації та її складових, які враховують наведені відмінності. Викладені в систему теоретичні передумови наведено у такій послідовності:

1. Доведення можливості використання енергетичних теорій міцності при оцінюванні напруженого стану гірського масиву.

2. Доведення зв'язку складових питомої потенціальної енергії деформації з геолого-технологічними критеріями, що впливають на накопичення її в гірських породах.

3. Розробка методики енергетичної оцінки стану гірського масиву при дії на нього складових питомої потенціальної енергії деформації.

4. Розробка методики оцінки впливу складових питомої потенціальної енергії деформації на стійкість гірських порід до саморуйнування.

5. Доведення зв'язку між складовими питомої потенціальної енергії деформації і непружними динамічними характеристиками гірських порід.

З відомих енергетичних теорій міцності, що знайшли використання в механіці гірських порід слід виокремити теорії Бельтрама і Губерта-Мізеса-Генкі [4, 5]. Згідно з першою з них міцність матеріалу при складному напруженому стані забезпечується в тому випадку, коли питома потенціальна енергія деформації не перевищує допустимої потенціальної, яка встановлена для одноосового напруженого стану, тобто

$$u \leq [u]. \quad (1)$$

Відомо, що при проведенні гірської виробки робота, що йде на деформування гірських порід, накопичується у вигляді потенціальної енергії. Причому частина її витрачається на зміну об'єму, а частина – на зміну форми. Таким чином, можна вважати, що повна потенціальна енергія деформації дорівнює

$$u = u_{об} + u_{\phi}, \quad (2)$$

де: $u_{об}$ – питома потенціальна енергія, яка накопичується за рахунок зміни об'єму; u_{ϕ} – питома потенціальна енергія зміни форми, яка накопичується за рахунок зміни форми елемента.

На підставі виведених нами формул [6] отримано рівняння, що являють собою умову міцності породи при дії питомої потенціальної енергії деформації і її складових:

$$u = \frac{1}{2E} g^2 H^2 \left[\rho_n^2 (5 - 4\mu) - 4\rho_n \rho_p (1 + \mu) + 2\rho_p^2 (1 + \mu) \right] \leq \frac{\sigma^2}{2E}, \quad (3)$$

$$u_{об} = \frac{1 - 2\mu}{6E} g^2 H^2 \times \left(9\rho_n^2 + 12\rho_n \rho_p + 4\rho_p^2 \right) \leq \frac{1 - 2\mu}{6E} \sigma^2; \quad (4)$$

$$u_{\phi} = \frac{1 + \mu}{3E} g^2 H^2 \times \left(3\rho_n^2 - 6\rho_n \rho_p + 3\rho_p^2 \right) \leq \frac{1 + \mu}{3E} \sigma^2, \quad (5)$$

де: E – модуль Юнга; μ – коефіцієнт Пуассона; g – прискорення сили ваги; H – глибина свердловини; ρ_n, ρ_p – густина породи і рідини відповідно; σ – допустиме значення нормального напруження, прийняте для лінійного розтягу або стиснення.

Найбільш суттєвими особливостями у поведінці гірських порід є ефект збільшення об'єму в процесі незворотної деформації. В цьому і полягає принципова різниця деформації порід від пластичної деформації металів, в яких відсутнє явище росту об'єму. Цим фактом і пояснюється неприйнятність використання питомої потенціальної енергії зміни об'єму при розрахунках металів на міцність.

Для перевірки доцільності застосування умов міцності на підставі питомої потенціальної енергії деформації чи питомої енергії зміни об'єму зроблено відповідні розрахунки. Результати їх підтвердили, що найбільш прийнятними є дані, в яких використовуються питомі потенціальні енергії зміни об'єму і форми.

Встановлено, що напружений стан гірського масиву формується при накопиченні в ньому потенціальної енергії за рахунок гравітаційних сил, тиску бурового розчину і пружних властивостей порід. Згідно з табл. 1 ці критерії названо геолого-технологічними і розбито на дві групи. Теоретичними основами для аналізу змінюваних складових питомої потенціальної енергії деформації є формули (3), (4) і (5).

При визначенні ступеня впливу об'єктивно керованих критеріїв на характер зміни енергії гірського масиву прийнято умову незмінності пружних і міцнісних властивостей гірських порід за глибиною. Приймаючи вказані властивості порід рівними фактичним даним при бурінні Кольської надглибокої свердловини (СГ-3), проведені розрахунки питомих потенціальних енергій зміни об'єму і форми, результати яких наведено в табл. 2.

З даних табл. 2 видно, що зі збільшенням глибини свердловини відбувається зростання обох складових питомої потенціальної енергії деформації. При зміні густини бурового розчину в межах від 0 до $1,8 \cdot 10^3$ кг/м³ зростає питома потенціальна енергія зміни об'єму і знижується питома потенціальна енергія зміни форми.

Таблиця 1 – Геолого-технологічні критерії, які сприяють накопиченню потенціальної енергії в породі

Група критеріїв	Критерії	Кількісна оцінка критерію
Об'єктивні некеровані	Коефіцієнт Пуассона	-
	Модуль Юнга	МПа
	Густина породи	кг/м ³
Об'єктивні керовані	Глибина свердловини	м
	Густина бурового розчину	кг/м ³

Таблиця 2 – Результати розрахунків складових питомої потенціальної енергії деформації при незмінності пружних і міцнісних властивостей гірських порід

H, м	$\frac{u_{об}^*}{u_{ф}^*}, 10^3 \text{ Дж/м}^3$									
	$\rho_p, 10^3 \text{ кг/м}^3$									
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
1000	$\frac{6,2}{11,4}$	$\frac{6,7}{9,9}$	$\frac{7,3}{8,5}$	$\frac{7,8}{7,3}$	$\frac{8,5}{6,2}$	$\frac{9,2}{5,1}$	$\frac{9,8}{4,2}$	$\frac{10,5}{3,3}$	$\frac{11,2}{2,6}$	$\frac{1,2}{1,9}$
2000	$\frac{24,8}{45,6}$	$\frac{26,8}{39,6}$	$\frac{29,2}{34}$	$\frac{31,2}{29,2}$	$\frac{34}{24,8}$	$\frac{36,8}{20,4}$	$\frac{39,2}{16,8}$	$\frac{42}{13,2}$	$\frac{44,8}{10,4}$	$\frac{48}{7,6}$
3000	$\frac{55,8}{102}$	$\frac{60,3}{89,1}$	$\frac{65,7}{76,5}$	$\frac{70,2}{65,7}$	$\frac{76,5}{55,8}$	$\frac{82,8}{45,9}$	$\frac{88,2}{37,8}$	$\frac{94,5}{29,7}$	$\frac{100,8}{23,4}$	$\frac{108}{17,1}$
4000	$\frac{99,2}{182,4}$	$\frac{107,2}{158,4}$	$\frac{116,8}{136}$	$\frac{124,8}{116,8}$	$\frac{136}{99,2}$	$\frac{147,2}{81,6}$	$\frac{156,8}{67,2}$	$\frac{168}{52,8}$	$\frac{179,2}{41,6}$	$\frac{192}{30,4}$
5000	$\frac{155}{285}$	$\frac{167,5}{247,5}$	$\frac{182,5}{212,5}$	$\frac{195}{182,5}$	$\frac{212,5}{155}$	$\frac{230}{127,5}$	$\frac{245}{105}$	$\frac{262,5}{82,5}$	$\frac{280}{65}$	$\frac{300}{47,5}$
6000	$\frac{223,2}{410,4}$	$\frac{241,23}{56,4}$	$\frac{262,8}{306}$	$\frac{280,8}{262,8}$	$\frac{306}{223,2}$	$\frac{331,2}{183,6}$	$\frac{352,8}{151,2}$	$\frac{378}{118,8}$	$\frac{403,2}{93,6}$	$\frac{432}{68,4}$
7000	$\frac{303,8}{558,6}$	$\frac{328,3}{485,1}$	$\frac{357,7}{416,5}$	$\frac{382,2}{357,7}$	$\frac{416,5}{303,8}$	$\frac{450,8}{249,9}$	$\frac{480,2}{205,8}$	$\frac{514,5}{161,7}$	$\frac{548,8}{127,4}$	$\frac{588}{93,1}$

На графіку (рис. 1), побудованому за даними табл. 2 при глибині свердловини 1000 м, представлено характер зміни складових питомої потенціальної енергії деформації залежно від величини густини бурового розчину. За точкою перетину кривих питомих потенціальних енергій зміни об'єму і форми знаходимо величину густини бурового розчину, при якій 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.

З метою встановлення ступеня впливу пружних і механічних властивостей гірських порід на зміну складових питомої потенціальної енергії деформації, використано дослідження, які проведені на свердловині СГ-3. На основі середніх значень фізичних властивостей основних порід даної свердловини виконано розрахунки, результати яких наведено в табл. 3. З даних таблиці видно, що зміна складових питомої потенціальної енергії деформації проходить аналогічно, як і в табл. 2. Різниця полягає тільки в перевищенні значень $u_{об}$ і $u_{ф}$ з табл. 3

над їх значеннями в табл. 2. Для пояснення цього явища за даними табл. 2 і табл. 3 побудовано графік (рис. 2), на якому представлено співвідношення між відношенням складових питомої потенціальної енергії деформації і глибиною свердловини.

Як видно з графіка ці співвідношення до глибини 4500 м носять змінний характер. Подальше їх збільшення проходить більш стрімко, що свідчить про вплив на складові питомої потенціальної енергії деформації зміни пружних і міцнісних властивостей порід зі збільшенням глибини свердловини. Це підтверджується також даними досліджень, де задовільна відповідність між геофізикою і геологією розрізу отримана лише до глибини 4500 м [7].

Поговоримо про стійкість гірничої виробки, характеризуємо її як здатність матеріальної системи зберігати свій стан в умовах збурних чинників технологічної дії [1]. Кількісну оцінку стійкості з урахуванням енергії гірського масиву проводимо за формулами

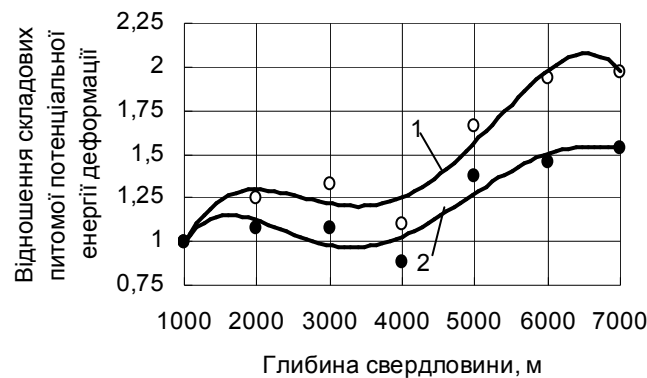


1 – питома потенціальна енергія зміни об'єму; 2 – питома потенціальна енергія зміни форми

Рисунок 1 – Характер зміни складових питомої потенціальної енергії деформації залежно від величини густини бурового розчину

Таблиця 3 – Результати розрахунків складових питомої потенціальної енергії деформації при зміні пружних і міцнісних властивостей гірських порід

H, м	$\frac{u_{об}}{u_{ф}}, 10^3 \text{ Дж/м}^3$									
	$\rho_p, 10^3 \text{ кг/м}^3$									
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
1000	$\frac{6,2}{11,4}$	$\frac{6,6}{9,9}$	$\frac{7,3}{8,5}$	$\frac{7,8}{7,3}$	$\frac{8,5}{6,2}$	$\frac{9,2}{5,1}$	$\frac{9,8}{4,2}$	$\frac{10,5}{3,3}$	$\frac{11,2}{2,6}$	$\frac{12}{1,9}$
2000	$\frac{30,9}{49,1}$	$\frac{32,4}{42,9}$	$\frac{36,6}{37,3}$	$\frac{39,6}{31,6}$	$\frac{42,7}{26,6}$	$\frac{45,9}{22,1}$	$\frac{49,3}{18}$	$\frac{52,8}{14,3}$	$\frac{56,4}{11}$	$\frac{60,2}{8,1}$
3000	$\frac{73,5}{111}$	$\frac{80,2}{97,3}$	$\frac{87,1}{84}$	$\frac{94,4}{71,6}$	$\frac{101,7}{60,3}$	$\frac{109,7}{49,8}$	$\frac{117,8}{40,4}$	$\frac{126,2}{32}$	$\frac{134,8}{24,6}$	$\frac{143,8}{18,1}$
4000	$\frac{108,6}{164,9}$	$\frac{118,7}{143,5}$	$\frac{128,9}{130,6}$	$\frac{139,7}{111,2}$	$\frac{150,9}{88,2}$	$\frac{162,6}{72,8}$	$\frac{174,7}{58,8}$	$\frac{187,3}{46,3}$	$\frac{200,2}{35,4}$	$\frac{213,6}{25,9}$
5000	$\frac{254,7}{404,9}$	$\frac{278,3}{351,6}$	$\frac{303,1}{302,1}$	$\frac{328,8}{256,3}$	$\frac{355,6}{214,3}$	$\frac{383,5}{175,9}$	$\frac{412,4}{141,3}$	$\frac{442,3}{110,6}$	$\frac{473,4}{83,5}$	$\frac{505,4}{60,3}$
6000	$\frac{425,6}{618,1}$	$\frac{465,2}{536,6}$	$\frac{506,6}{460,9}$	$\frac{549,7}{390,9}$	$\frac{588,7}{326,7}$	$\frac{641,3}{268,2}$	$\frac{689,7}{215,5}$	$\frac{739,9}{168,6}$	$\frac{791,9}{127,4}$	$\frac{845,6}{91,9}$
7000	$\frac{589,2}{894,8}$	$\frac{644,5}{775,9}$	$\frac{702,2}{703,5}$	$\frac{762,4}{563,7}$	$\frac{825,1}{407,3}$	$\frac{890,3}{385,3}$	$\frac{957,9}{308,8}$	$\frac{1028}{240,8}$	$\frac{1100}{181,2}$	$\frac{1176}{130}$



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

Рисунок 2 – Співвідношення між відношенням складових питомої потенціальної енергії деформації і глибиною свердловини

Таблиця 4 – Результати розрахунків коефіцієнтів стійкості вибою і стовбура свердловини при незмінності пружних і міцнісних властивостей гірських порід

H, м	$\frac{K'_{cm}}{K''_{cm}} \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^3$									
	$\rho_p, 10^3 \text{ кг/м}^3$									
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
1000	$\frac{5,71}{17,12}$	$\frac{5,28}{19,71}$	$\frac{4,85}{22,96}$	$\frac{4,54}{26,74}$	$\frac{4,16}{31,48}$	$\frac{3,85}{38,27}$	$\frac{3,61}{46,48}$	$\frac{3,37}{59,15}$	$\frac{3,16}{75,08}$	$\frac{2,95}{102,74}$
2000	$\frac{1,42}{4,28}$	$\frac{1,32}{4,93}$	$\frac{1,21}{5,74}$	$\frac{1,13}{6,73}$	$\frac{1,04}{7,87}$	$\frac{0,96}{9,57}$	$\frac{0,9}{11,62}$	$\frac{0,84}{14,78}$	$\frac{0,79}{18,7}$	$\frac{0,74}{25,68}$
3000	$\frac{0,63}{1,9}$	$\frac{0,59}{2,19}$	$\frac{0,54}{2,55}$	$\frac{0,5}{2,97}$	$\frac{0,46}{3,49}$	$\frac{0,43}{4,25}$	$\frac{0,4}{5,16}$	$\frac{0,37}{6,57}$	$\frac{0,35}{8,34}$	$\frac{0,33}{11,4}$
4000	$\frac{0,36}{1,06}$	$\frac{0,33}{1,23}$	$\frac{0,3}{1,44}$	$\frac{0,28}{1,67}$	$\frac{0,26}{1,96}$	$\frac{0,24}{2,39}$	$\frac{0,22}{2,9}$	$\frac{0,21}{3,69}$	$\frac{0,19}{4,69}$	$\frac{0,18}{6,42}$
5000	$\frac{0,23}{0,68}$	$\frac{0,21}{0,79}$	$\frac{0,19}{0,92}$	$\frac{0,18}{1,07}$	$\frac{0,17}{1,26}$	$\frac{0,15}{1,53}$	$\frac{0,14}{1,86}$	$\frac{0,13}{2,37}$	$\frac{0,126}{3}$	$\frac{0,118}{4,11}$
6000	$\frac{0,16}{0,48}$	$\frac{0,15}{0,55}$	$\frac{0,14}{0,64}$	$\frac{0,13}{0,74}$	$\frac{0,12}{0,87}$	$\frac{0,11}{1,06}$	$\frac{0,1}{1,29}$	$\frac{0,09}{1,64}$	$\frac{0,087}{2,08}$	$\frac{0,082}{2,85}$
7000	$\frac{0,13}{0,35}$	$\frac{0,11}{0,4}$	$\frac{0,098}{0,47}$	$\frac{0,093}{0,55}$	$\frac{0,085}{0,64}$	$\frac{0,079}{0,78}$	$\frac{0,074}{0,95}$	$\frac{0,069}{1,21}$	$\frac{0,065}{1,53}$	$\frac{0,06}{2,09}$

$$K_{cm} = \frac{[u]}{u} \quad (6)$$

$$K'_{cm} = \frac{[u_{об}]}{u_{об}} = \frac{\sigma^2}{g^2 H^2 (9\rho_n^2 + 12\rho_n\rho_p + 4\rho_p^2)}, \quad (7)$$

$$K''_{cm} = \frac{[u_\phi]}{u_\phi} = \frac{\sigma^2}{g^2 H^2 (3\rho_n^2 - 6\rho_n\rho_p + 3\rho_p^2)}. \quad (8)$$

Розглянемо ступінь впливу об'єктивно керованих критеріїв на зміну коефіцієнтів K'_{cm} і K''_{cm} . За даними табл. 2 проведено розрахунки вказаних коефіцієнтів, результати яких наведено в табл. 4. Бачимо, що зі збільшенням глибини свердловини відбувається зниження обох коефіцієнтів. Зростання густини бурового розчину веде до зниження коефіцієнта стійкості вибою свердловини до саморуйнування і збільшення коефіцієнта стійкості стовбура свердловини до саморуйнування.

З метою встановлення ступеня впливу пружних і механічних властивостей гірських порід на зміну вказаних коефіцієнтів використано дані табл. 3. Результати розрахунків, наведені у табл. 5, свідчать, що зміна коефіцієнтів K'_{cm} і K''_{cm} відбувається аналогічно даним табл. 4.

Дуже часто збільшення густини бурового розчину призводить до зниження стійкості стінок свердловини [8]. Для пояснення цього яви-

ща розглянемо можливість використання критеріїв оцінки розсіювання енергії гірського масиву. На підставі аналізу відомих формул для оцінки стійкості порід до саморуйнування отримано залежність між коефіцієнтами стійкості і розсіювання енергії, яка має вигляд [9]

$$K''_{cm} = \frac{[u_\phi]}{\psi(u_{об} + u_\phi)}, \quad (9)$$

де $\psi = \frac{u_\phi}{u_{об} + u_\phi}$ – коефіцієнт розсіювання енергії.

Проведені за даними формулами розрахунки зображено графічною залежністю (рис. 3), на підставі якої зроблено висновок, що зниження коефіцієнта стійкості породи до саморуйнування проходить одночасно зі зниженням коефіцієнта розсіювання енергії.

При перевірці теоретичних положень і висновків, отриманих авторами було використано результати досліджень на Кольській надглибокій свердловині, а також на свердловинах Шевченкове-1 і Синьовидне-1.

Лабораторними і аналітичними дослідженнями підтверджено, що суттєвий вплив на стійкість гірничих виробок чинить форма перерізу і нерівності контура виробки. Найменша величина напружень і найбільш рівномірний їх розподіл досягається при криволінійній (еліпсоїдній) формі перерізу виробки, яка є найбільш сприятливою з точки зору її стійкості [3].

Найбільше тангенціальне напруження, яке має місце на контурі виробки, визначається за формулою [10]

Таблиця 5 – Результати розрахунків коефіцієнтів стійкості вибою і стовбура свердловини при зміні пружних і міцнісних властивостей гірських порід

H, м	$\frac{K'_{cm}}{K''_{cm}} 10^3 \text{ Дж/м}^3$									
	$\rho_p, 10^3 \text{ кг/м}^3$									
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
1000	$\frac{5,7}{17,1}$	$\frac{5,3}{19,7}$	$\frac{4,9}{22,9}$	$\frac{4,5}{26,7}$	$\frac{4,2}{31,5}$	$\frac{3,8}{38,3}$	$\frac{3,6}{46,5}$	$\frac{3,4}{59,1}$	$\frac{3,2}{75,1}$	$\frac{3}{102,7}$
2000	$\frac{1}{3}$	$\frac{0,92}{3,4}$	$\frac{0,81}{3,9}$	$\frac{0,75}{4,6}$	$\frac{0,7}{5,5}$	$\frac{0,65}{6,6}$	$\frac{0,6}{8,1}$	$\frac{0,56}{10,2}$	$\frac{0,53}{13,3}$	$\frac{0,5}{18}$
3000	$\frac{0,49}{1,47}$	$\frac{0,45}{1,89}$	$\frac{0,41}{1,96}$	$\frac{0,38}{2,3}$	$\frac{0,35}{2,73}$	$\frac{0,33}{3,3}$	$\frac{0,31}{4,1}$	$\frac{0,29}{5,14}$	$\frac{0,27}{6,68}$	$\frac{0,25}{9,09}$
4000	$\frac{0,24}{0,73}$	$\frac{0,22}{0,83}$	$\frac{0,2}{0,92}$	$\frac{0,19}{1,08}$	$\frac{0,17}{1,36}$	$\frac{0,16}{1,65}$	$\frac{0,15}{2,04}$	$\frac{0,14}{2,59}$	$\frac{0,13}{3,38}$	$\frac{0,12}{4,63}$
5000	$\frac{0,13}{0,4}$	$\frac{0,12}{0,46}$	$\frac{0,11}{0,54}$	$\frac{0,1}{0,63}$	$\frac{0,095}{0,76}$	$\frac{0,089}{0,92}$	$\frac{0,082}{1,15}$	$\frac{0,077}{1,47}$	$\frac{0,072}{1,94}$	$\frac{0,07}{2,69}$
6000	$\frac{0,092}{0,28}$	$\frac{0,084}{0,32}$	$\frac{0,077}{0,37}$	$\frac{0,071}{0,44}$	$\frac{0,067}{0,52}$	$\frac{0,061}{0,64}$	$\frac{0,057}{0,79}$	$\frac{0,053}{1,01}$	$\frac{0,05}{1,34}$	$\frac{0,046}{1,86}$
7000	$\frac{0,06}{0,18}$	$\frac{0,055}{0,21}$	$\frac{0,051}{0,23}$	$\frac{0,047}{0,29}$	$\frac{0,043}{0,4}$	$\frac{0,04}{0,42}$	$\frac{0,037}{0,52}$	$\frac{0,035}{0,67}$	$\frac{0,032}{0,89}$	$\frac{0,03}{1,24}$



Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта стійкості породи до саморуйнування від коефіцієнта розсіювання енергії

$$\sigma_{\theta_{ai}} = 2\rho_n Hg(1 - \chi) - \rho_p gH, \quad (11)$$

$$\chi = \frac{(a - b)(a \sin^2 \theta - b \cos^2 \theta)}{a^2 \sin^2 \theta + b \cos^2 \theta},$$

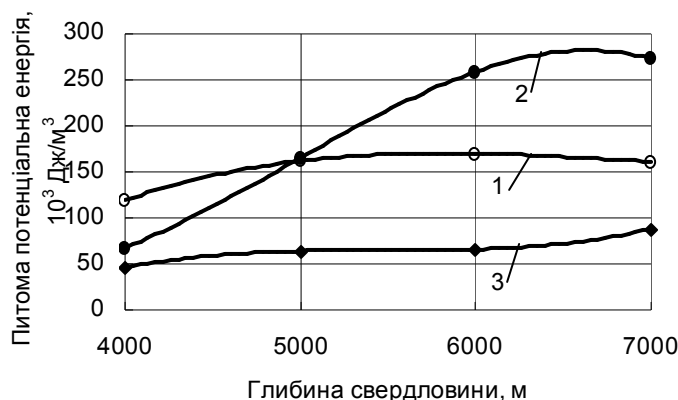
де a і b – відповідно велика і мала піввісь еліпса; θ – полярний кут.

Аналіз формули і розрахунки показали: якщо відношення півосей еліптичної форми виробки рівне відношенню компонент напружень незайманого масиву, то розподіл тангенціальних напружень на контурі виробки буде оптимальним з точки зору стійкості останньої. Таким чином, можна припустити, що руйнування породи довкола виробки буде відбуватися до тих пір, поки вона не прийме форму еліпса з відношенням осей рівним відношенню компонент напружень непорушеного гірського масиву.

Для перевірки цієї гіпотези в умовах глибокого буріння проведено розрахунки, в яких використано типові форми перерізу стовбура свердловини СГ-3. Результати розрахунків представлено у вигляді графіка (рис. 4), на якому показано залежність саморуйнування породи від співвідношення питомих потенціальних енергій формозміни при лінійному і об'ємному напружених станах породи. При визначенні питомої потенціальної енергії зміни форми використано залежність, яка має вигляд

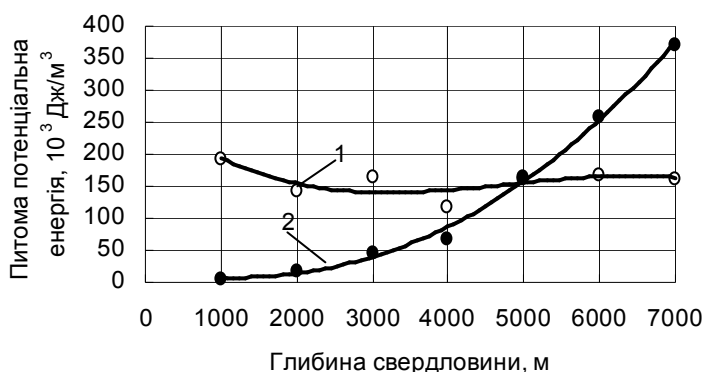
$$u_{\phi_{эл}} = \frac{1 + \mu}{3E} \left\{ [1 + 4(1 - \chi)^2 - 2(1 - \chi)] \rho_n^2 g^2 H^2 - 6(1 - \chi) \rho_n \rho_p g^2 H^2 + 3 \rho_p g^2 H^2 \right\}. \quad (12)$$

Як видно з графіка, в інтервалі глибин 4000-7000 м при еліптичній формі перерізу стовбура процес саморуйнування породи відсутній.



1 – енергія формозміни при лінійному напруженому стані породи; 2 – енергія формозміни при об’ємному напруженому стані породи (циліндрична форма перерізу стовбура); 3 – енергія формозміни при об’ємному напруженому стані породи (еліптична форма перерізу стовбура)

Рисунок 4 – Залежність саморуйнування гірської породи у стінці свердловини від форми перерізу стовбура свердловини



1 – питома потенціальна енергія формозміни при лінійному напруженому стані керна; 2 – питома потенціальна енергія формозміни при об’ємному напруженому стані керна

Рисунок 5 – Залежність початку дискування керна від співвідношення питомої потенціальної енергії його формозміни при лінійному і об’ємному напружених станах

У результаті проведених досліджень [11] встановлено, що при бурінні з відбором керна з певної глибини починається стійке зменшення довжини стовпчика вибуреної породи, яке поступово переходить у так зване явище дискування керна. Для визначення глибини, на якій розпочинається це явище нами використано умову міцності за енергетичною теорією Губерта-Мізеса-Генкі. Встановлено, що кращі результати отримують, якщо в якості критерію міцності приймають не всю енергію деформації, а лише її частину, пов’язану зі зміною форми тіла. Вона визначається за формулою (5). Проведені розрахунки для свердловини СГ-3 зображено графіком (рис. 5). З графічної залежності видно, що дискування керна розпочалося на глибині близько 5000 м, що підтверджується промисловим матеріалом [12].

Проведений аналіз [6] засвідчив, що гірський масив володіє енергією, яка активно проявляється у вигляді деформації і руйнувань в зо-

нах, де породи знаходяться в граничному стані. Отже при 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, можна скористатись формулою [13]

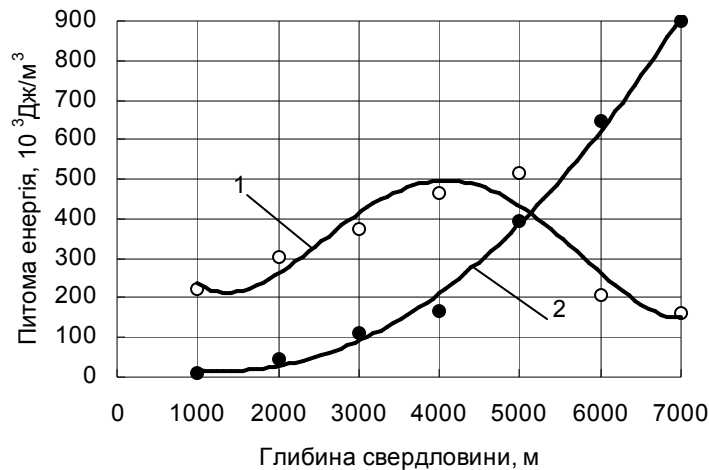
$$u_p = 4 \frac{Gn}{kDV_M}, \quad (13)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від властивостей породи, типу і конструкції долота.

При бурінні кільцевим вибоєм формула набуває вигляду

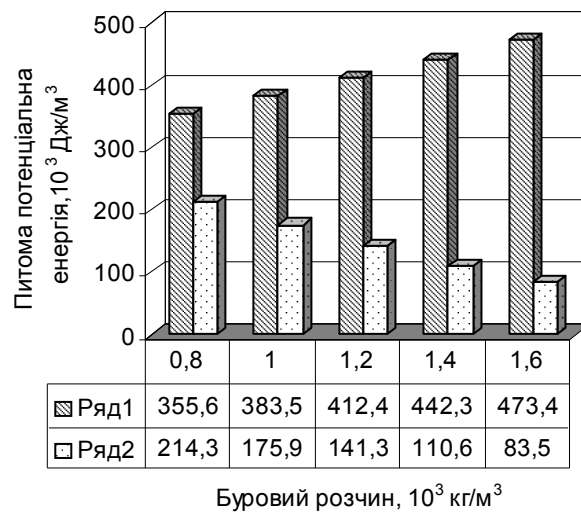
$$u_p = 4 \frac{Gn}{k(D+d)V_M}, \quad (14)$$

де d – діаметр керна.



1 – питома механічна енергія руйнування гірських порід;
2 – питома потенціальна енергія зміни об'єму

Рисунок 6 – Залежність комбінованого руйнування гірської породи від співвідношення питомої механічної енергії руйнування породи і питомої потенціальної енергії зміни об'єму



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

Рисунок 7 – Гістограма активації складових потенціальної енергії деформації залежно від зміни густини бурового розчину

Згідно з наведеними формулами виконано розрахунки для свердловини СГ-3, які зображено графіком (рис. 6) залежності ефективності комбінованого руйнування породи від співвідношення питомої механічної енергії руйнування породи і питомої потенціальної енергії зміни об'єму. Як видно з графіка, процес ефективного комбінованого руйнування породи починається з глибини $H > 5500$ м, оскільки в цьому випадку $u_{об} > u_p$, що спричиняє збільшення механічної швидкості буріння.

Таким чином, підсумовуючи результати виконаних досліджень, можна стверджувати, що для зниження ризику бурових робіт необхідно прогнозувати зміну складових питомої

потенціальної енергії деформації та керувати ними в процесі буріння.

Закономірність зміни складових потенціальної енергії гірського масиву, яка знайдена теоретично і підтверджена експериментально матеріалами наукового континентального буріння, є значним внеском в зміну рівня наукового пізнання процесів, які виникають при руйнуванні гірських порід на великих глибинах. Практична реалізація даного дослідження полягає в розробці системи прогнозування зміни складових питомої потенціальної енергії деформації.

Послідовність прогнозу передбачає наступні операції.

1. Розрахунок питомих потенціальних енергій зміни об'єму і форми, з урахуванням зміни глибини свердловини та пружних властивостей гірських порід розрізу свердловини.

2. Прогноз активації складових питомої потенціальної енергії деформації на глибині, яка відповідає конкретному ускладненню при збільшенні або зменшенні густини бурового розчину.

Відповідно до запропонованих операцій на рис. 7 зображено гістограму активації складових питомої потенціальної енергії деформації залежно від зміни густини бурового розчину. Вона дає можливість при різних значеннях густини оцінити величину питомих потенціальних енергій зміни об'єму та форми, при яких можуть відбутися ускладнення в процесі буріння та попередити їх.

Створена система дає можливість спрогнозувати найбільш прийнятну форму і розміри стовбура свердловини, який буде проводитись в конкретному інтервалі. Вона може прогнозувати реакцію породи на механічне навантаження – руйнування під долотом і руйнування на стінці свердловини. Застосування даної системи дасть змогу значно підвищити успішність розвідувальних робіт на нафту і газ.

Висновки

1. У результаті проведених досліджень встановлено невідому раніше закономірність зміни складових потенціальної енергії гірського масиву, яка підтверджена матеріалами континентального наукового буріння. Вказана закономірність полягає в тому, що при розбурюванні гірських порід зі збільшенням глибини свердловини відбувається перерозподіл складових питомої потенціальної енергії деформації. При певному значенні густини бурового розчину ці складові рівні, а зі збільшенням чи зниженням густини розчину вони набувають значень, що відповідають гірським породам, які знаходяться в об'ємному або плоскому напружених станах.

2. Застосування виконаних досліджень полягає в розробці аналітичної системи прогнозування окремих видів ускладнень і процесів, елементи якої перевірені при бурінні окремих надглибоких свердловин (СГ-3, Ш-1, С-1). Розроблену систему запропоновано включити до складу урядової інформаційно-аналітичної системи з надзвичайних ситуацій для кількісного прогнозування активації складових питомої потенціальної енергії деформації на розвідувальних площах України при бурінні глибоких свердловин. Вона є важливою частиною заходів щодо запобігання аварій і ускладнень при будівництві глибоких свердловин.

Ефективність її впровадження залежить від масштабів використання у проектних та науково-дослідних організаціях, виробничих структурах і територіальних управліннях з надзвичайних ситуацій.

Література

1 Зорин А.Н., Халимендик Ю.М., Колесников В.Г. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых. – М.: Недра, 2001. – 413 с.

2 Айзаксон Э. Давление горных пород в шахтах. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 137 с.

3 Зорин А.Н. Управление динамическими проявлениями горного давления. – М.: Недра, 1978. – 175 с.

4 Писаренко Г.С., Агарев В.А., Квитка А.Л. и др. Сопrotивление материалов, – К.: Вища школа, 1986. – 775 с.

5 Ершов Л.В., Либерман Л.К., Нейман И.Б. Механика горных пород. – М.: Недра, 1987. – 192 с.

6 Барановський Е.М. Енергетична оцінка стану гірського масиву при бурінні глибоких свердловин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ, 2005. – № 1(14). – С.34-39.

7 Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований. – М.: МФ «Технонефтегаз», 1998. – 260 с.

8 Проницаемость горных пород и эффективность поддержания устойчивости ствола глубоких и сверхглубоких скважин давлением бурового раствора / Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г., Ширпес О.А., Мехнецов И.А., Савицкий С.Т. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1992. – №5. – С.7-17.

9 Барановський Е.М. Критерії оцінки розсіювання енергії гірського масиву та використання їх в глибокому бурінні // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ, 2005. – № 3(16). – С.30-35.

10 Барановський Е.М. Вплив температурних напружень на руйнування в стінках глибоких свердловин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ, 2005. – № 2(15). – С.59-62.

11 Барановський Е.М., Мойсшин В.М. Вплив енергії гірського масиву на дискування ядра в глибокому бурінні // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ, 2006. – № 3(20). – С.49-54.

12 Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины. – М.: Недра, 1984. – 490 с.

13 Барановський Е.М., Мойсшин В.М. Комбіноване руйнування гірських порід при бурінні глибоких свердловин // Науковий вісник ІФНТУНГ. – Івано-Франківськ, 2006. – № 1(13). – С.26-29.