

УДК 622.831.327

Мащенко В. А., к.ф.-м.н., доц. (Рівненський державний гуманітарний університет)

ЕНЕРГЕТИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ГЕОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В МАСИВІ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ ДИНАМІЧНИХ ЯВИЩАХ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ

Для моделі пружних деформацій масиву гірської породи проведено оцінку енергетичного стану межового шару ізольованої виробки. Отримані результати дозволяють встановити основні закономірності накопичення потенціальної енергії у межовому шарі залежно від розмірів виробки та фізико-механічних властивостей порід.

Вступ. Вивчення і врахування динаміки деформації масиву гірських порід в межах гірничих виробок геотехнічних систем (ГТС) є актуальним питанням геомеханіки, що дозволяє прогнозувати негативні явища техногенного характеру.

Надходження енергії в ГТС в процесі видобутку корисних копалин супроводжується порушенням природних структур, що призводить до збільшення ентропії із подальшим підсиленням в системі дисипативних проявів у формі геомеханічних динамічних рухів техногенного характеру [1].

Загальною характерною особливістю динамічного техногенного процесу є накопичення потенціальної енергії пружних деформацій гірської породи в ГТС і обмежена її дисипація. Першою стадією такого процесу є утворення областей, де породи знаходяться в стані межової рівноваги з врахуванням їх залишкової міцності [2], із можливою втраченою стійкості стінок гірничих виробок ГТС.

Баланс енергії при динамічному техногенному явищі в ГТС можна представити наступним чином [3]:

$$W_g + W_M + (-\Delta E) = W_p + \Delta K + W_B + W_C + W_B, \quad (1)$$

де W_g – енергія, що надходить до системи за рахунок газодинамічних або гідродинамічних процесів; W_M – акумульована енергія пружних деформацій в матеріалі, що руйнується; $-\Delta E$ – енергія, що надходить із вміщуючих порід у зону незворотних деформацій; W_p – енергія, що витрачається на руйнування оточуючих порід; ΔK – кінетична енергія уламків матеріалу, що руйнується; W_B – енергія, що поглинається боковими породами поблизу місця динамічного техногенного явища; W_C – енергія сейсмічних коливань; W_B – енергія ударної повітряної

хвилі.

Одним із факторів активізації процесів, що зумовлюють явища техногенного характеру, є порожнини, що залишилися при розробці родовищ [4].

Метою роботи є теоретична оцінка складових лівої частини співвідношення (1), що визначає процес накопичення енергії, для моделі ізольованої порожнини, як гірничої виробки, залежно від її об'єму та механічних властивостей оточуючих порід без врахування енергії газо- або гідродинамічних процесів та зовнішніх збурень.

Обґрунтування моделі. Система „гірський масив – виробка (порожнина)” є відкритою і на великих глибинах може бути сильно віддалена від механічної рівноваги. Порушення механічної рівноваги, викликає дію, відносно крайової частини гірського масиву – межовому шару як дисипативної структури, що перебуває в стані межової рівноваги.

Утворення порожнини супроводжується порушенням початкового енергетичного стану породних масивів, в результаті чого проходить перерозподіл напруг і деформацій в околі поверхні, що обмежує виробку. Перерозподіл потенціальної енергії викликає в окремих місцях підвищення напруги стиснення, а інших розтягу або зсуву, при цьому окремі види напруг строго не розділені і можуть мати місце довільні комбінації з домінуючою складовою дотичних напруг. В такому випадку породи, що обмежують виробку, з однієї сторони, мають обмежену несучу здатність, а з іншої сторони, можуть деформуватися без розривів тільки у певних межах. Наслідком нового напружено-деформованого стану гірського масиву, що сформувався після утворення виробки, можуть бути динамічні процеси руйнування, що пов'язані з частковою або повною несучою здатністю стінок гірничих виробок ГТС.

Нехай на глибині H , в силу різних причин, утворилася порожня виробка об'єму V з довільним, у перерізі, контуром L . Представимо її у першому наближенні сферичною порожниною радіуса R з межовим шаром гірської породи, що знаходиться в стані межової рівноваги, розміром h (рис. 1).

Будемо вважати, що рівень напруг в масиві залежить тільки від глибини H та середньої об'ємної ваги γ гірських порід, і не перевищує їх міцності, тобто напруга і деформація є пружними.

Фактично, вплив порожнини на масив гірничих порід є локальним, і якщо глибина залягання порожнини H перевищує $10R$, власну вагу гірських порід замінимо прикладеним розподіленим навантаженням інтенсивності q до межі невагомої області [5]

$$q = \gamma H . \quad (2)$$

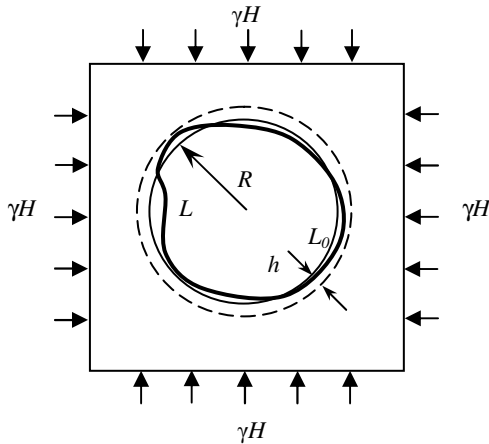


Рис. 1. Геометрична схема задачі

Повну потенціальну енергію деформації одиниці об'єму (W) межового шару представимо у вигляді двох складових – енергії зміни об'єму ($W_{o\sigma}$) і енергії зміни форми (W_{ϕ}) [6]:

$$W = W_{o\sigma} + W_{\phi} . \quad (3)$$

Відповідні доданки співвідношення (3) для ізотропного твердого тіла, як моделі гірської породи, визначаються наступним чином:

$$W_{o\sigma} = \frac{1-2\nu}{6E} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})^2 , \quad (4)$$

$$W_{\phi} = \frac{1+\nu}{6E} ((\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2) , \quad (5)$$

де σ_{ii} ($i = 1, 2, 3$) – елементи тензора напруг деформованого твердого тіла;

E – модуль деформації; ν – коефіцієнт Пуассона.

Енергія пружних деформацій акумульована в об'ємі V_M відповідно рівня

$$W_M = \int_{V_M} W dV_M . \quad (6)$$

Використовуючи аналітичний підхід до аналізу стійкості в теорії пружних деформацій оболонок, проведемо оцінку верхньої критичної напруги σ_{max} в межовому шарі як сферичної оболонки навколо гірничої

виробки по співвідношенню [7]:

$$\sigma_{max} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{h}{R^*}, \quad (7)$$

де R^* – радіус серединної поверхні сферичної оболонки $R^* = R + \frac{h}{2}$.

Відповідно верхній критичний тиск рівний [7]

$$q_{max} = \frac{2E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{h}{R^*} \right)^2. \quad (8)$$

З врахуванням (2) і (8) визначимо розміри межового шару гірничої породи, що знаходиться в стані межової рівноваги:

$$h = \frac{R}{\left(\frac{2E}{\gamma H \sqrt{3(1-\nu^2)}} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2}}. \quad (9)$$

Надходження енергії в зону незворотніх деформацій порід межового шару під час динамічного процесу представимо наступним чином [3]:

$$-\Delta E = \frac{1-\nu^2}{2E^2} \int_{\Delta S} k_1^2 dS \quad (10)$$

де k_1 – коефіцієнт інтенсивності напруг в зоні виробки; ΔS – приріст площі виробки гірничого масиву.

Оцінку величини k_1 проведемо методом опорного тиску. Визначимо довільний контур L_i в площині перерізу, що охоплює контур L_0 виробки на якому напруги, при підході до нього, із зміщуючих порід напруги скінченні. Напруга σ_i в довільній його точці контуру L_i , буде визначатися наступним співвідношенням:

$$\sigma_i(q_i) = \frac{k_{i1}(q_i)}{\sqrt{2\pi r}}, \quad (12)$$

де q_i – узагальнені координати, що пов'язані із центром виробки; r – відстані по нормалі до точки з координатами q_i на контурі L_i , причому залежність зміни повних нормальних напруг повинна бути задана функціональним законом $\sigma_i(q_i) = f(r)$.

В такому випадку співвідношення для визначення величин k_1 буде мати наступний вигляд:

$$k_1 \cong \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^a \frac{f(r)}{\sqrt{a-r}} dr, \quad (13)$$

де a – відстань між L_i і L_0 .

Результати та обговорення. Теоретичні розрахунки відношення $\frac{h}{R}$ за співвідношенням (9) для різної глибини ($H = 500, 1000$ м) і мінімальних значень фізико-механічних властивостей порід представлена в табл. 1 (чисельник відповідає глибині 500 м, знаменник – 1000 м), причому максимальні значення величини $\frac{h}{R}$ відповідають мінімальним значенням ρ , E та ν і навпаки. Співставлення результатів розрахунків критичної напруги по співвідношенню (8), для відповідних значень $\frac{h}{R}$, та межі міцності на стиск (σ_{cm}) гірських порід (табл. 1) вказує на задовільну кореляцію для нижньої межі величини σ_{max} із експериментальними значеннями σ_{cm} та завищене значення критичної напруги в 4 – 8 разів для її максимальних значень.

Таблиця 1

Значення фізико-механічних характеристик гірських порід [2] та розрахунки критичної напруги в межовому шарі

Порода	ρ , кг/м ³	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	ν	$\frac{h}{R}$	σ_{max} , МПа	σ_{cm} , МПа
Аргіліт	1600 – 3350	0,2 – 4,5	0,08 – 0,25	$\frac{0,06 - 0,02}{0,09 - 0,03}$	67 – 531 100 – 793	72 – 105
Алевроліт	1510 – 3200	0,1 – 6,9	0,05 – 0,34	$\frac{0,08 - 0,01}{0,12 - 0,02}$	44 – 422 65 – 839	40 – 100
Пісковик	1300 – 2600	0,2 – 3	0,06 – 0,3	$\frac{0,05 - 0,02}{0,08 - 0,03}$	56 – 360 89 – 537	38 – 110

Теоретичні розрахунки розмірів межового шару дають можливість оцінити енергію пружних деформацій W_M . Для моделі деформації межового шару гірської виробки, як ізотропного твердого тіла, зміна об'єму відбувається без зміни форми. Відповідно головні елементи тензора напруг у співвідношенні (4) рівні між собою $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33}$ і будемо вважати, що вони дорівнюють значенням σ_{cm} для відповідних фізико-механічних параметрів гірських порід.

Теоретичні розрахунки за співвідношеннями (4) та (6) величини W_M залежно від радіусу виробки ($R = 1 \div 4$ м) для максимальних значень величини граничного шару при мінімальних і максимальних значеннях механічних характеристиках порід представлені на рис. 2.

Теоретичні розрахунки коефіцієнтів інтенсивності напруг k_1 , в припущенні, що $\sigma_i(q_i)$ в зоні незворотніх деформацій задається лінійним законом від максимального значення на контурі виробки до величини γH на внутрішньому контурі межового шару, а величина a рівна максимальному значенню h , для різних гірських порід та радіусу виробки представлені в табл. 2.

Розрахунки значень величини енергії $-\Delta E$ залежно від радіусу утвореної порожнини за відповідними значеннями коефіцієнтів інтенсивності для різних гірських порід при мінімальних (максимальних) фізико-механічних характеристиках представлені на рис. 3

Порівняння величин W_M і $-\Delta E$ для відповідних розмірів і фізико-механічних параметрів гірських порід показує, що в більшості випадків енергія, яка вивільниться під час динамічного процесу техногенного характеру, пов'язаного із збільшенням контуру та площі виробки, більша ніж енергія, що акумулюється в зоні межової рівноваги. Для мінімальних значень механічних характеристик гірничих порід відношення між величинами W_M і $-\Delta E$ для різних гірничих порід може змінюватися від 0,11 до 0,57. Як виняток, слід констатувати, що при великих радіусах виробок для алевроліту відношення вказаних величин більше одиниці із максимальним значенням 3,67 при значенні радіуса $R = 4$ м.

Для максимальних значень механічних характеристик гірничих порід відношення між вказаними величинами не перевищує 0,03 і мало змінюється від розміру виробки.

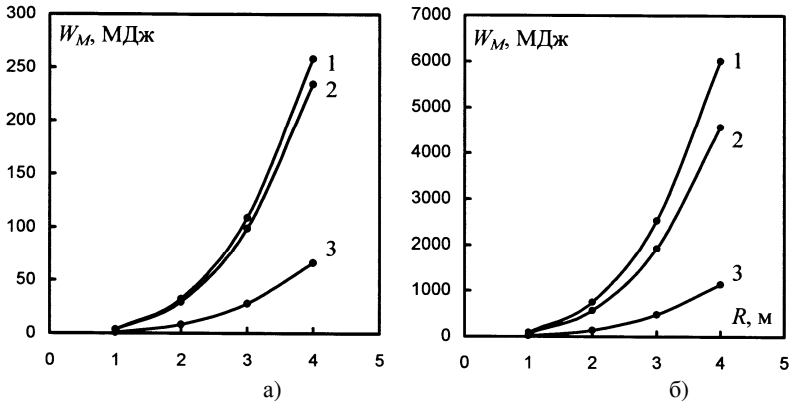


Рис. 2. Залежність енергії пружних деформацій W_M в граничному шарі від радіуса виробки R для мінімальних а) і максимальних б) значень фізико-механічних характеристик гірських порід (1 – аргіліт, 2 – алевроліт, 3 – пісковик)

Таблиця 2

Теоретичні розрахунки коефіцієнтів інтенсивності напруг в зоні незворотніх деформацій

$R, \text{ м}$	$k_1 \cdot 10^{-8}, \text{ Н/м}^{3/2}$		
	Аргіліт	Алевроліт	Пісковик
1	2,5 – 6,2	0,9 – 7,4	1,2 – 7,3
2	3,1 – 8,4	0,9 – 10,2	1,4 – 9,9
3	3,2 – 9,8	0,8 – 12,1	1,5 – 11,7
4	3,0 – 10,8	0,5 – 13,5	1,4 – 12,9

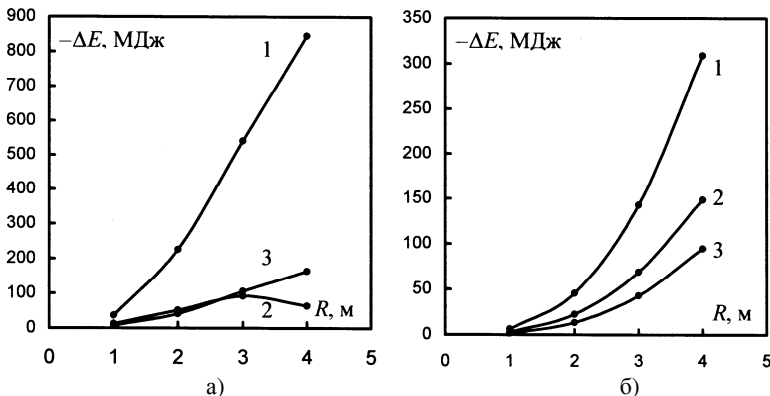


Рис. 3. Залежність енергії $-\Delta E$, що надходить із вміщуючих порід при динамічному явищі від радіуса виробки R для мінімальних а) і максимальних б) значень фізико-механічних характеристик гірничих порід (1 – аргіліт, 2 – алевроліт, 3 – пісковик)

Висновки. Оцінка величин W_M і $-\Delta E$ балансу енергії (1) показує, що в результаті проходження динамічного процесу техногенного характеру, пов'язаного із руйнуванням межового шару незакріпленої виробки та можливою втратою стійкості стінок може виділитися від 7 до 1100 МДж енергії залежно від розмірів незакріпленої гірничої виробки та механічних характеристик оточуючих порід.

Енергетична оцінка джерел надходження енергії з зони техногенного процесу дає можливість провести комплексний аналіз складових правої частини співвідношення (1), що визначають еволюцію розвитку процесу як фактор зовнішнього збурення на структурні складові ГТС з відповідною зміною їх енергетичного стану.

1. Садовенко І. О. Динаміка фільтраційного масопереносу при веденні та згортанні гірничих робіт / І. О. Садовенко, Д. В. Рудаков. – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2010. – 216 с.
2. Баклашов І. В. Механика подземных сооружений и конструкций крепей / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия. – М. : Недра, 1984. – 415 с.
3. Петухов И. М. Механика горных ударов и выбросов / И. М. Петухов, А. М. Линьков. – М. : Недра, 1983. – 280 с.
4. Геомеханічні та технологічні проблеми закриття шахт Донбасу / за загальн. ред. С. С. Гребьонкіна, В. М. Єрмакова. – Донецьк : ДонНТУ, 2002. – 266 с.
5. Михлин С. Г. Распределение напряжений в полуплоскости с эллиптическим вырезом / С. Г. Михлин // Тр. сейсм. ин-та АН СССР. – 1934. – № 29. – С. 212-220.
6. Божидарнік В. В. Елементи теорії пружності / В. В. Божидарнік, Г. Т. Сулим. – Львів : Світ, 1994. – 560 с.
7. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с.

Рецензент: д.геогр.н., професор Калько А. Д. (НУВГП)