

УДК 622.026

КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ РОЗСІЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ ГІРСЬКОГО МАСИВУ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЇХ В ГЛИБОКОМУ БУРІННІ

Е.М.Барановський

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

Рассматривается возможность прогнозирования и предупреждения осложнений с использованием критериев оценки рассеивания энергии горного массива при бурении глубоких скважин. Предложена формула для определения коэффициента рассеивания энергии. Установлен характер зависимости его от глубины скважины и упругих характеристик горной породы. На основании анализа известных формул для оценки стойкости пород к саморазрушению получена зависимость между коэффициентом стойкости и рассеивания энергии. В результате установлено, что снижение коэффициента стойкости породы к саморазрушению происходит с одновременным снижением коэффициента рассеивания энергии горного массива.

The article considers the possibility of forecasting and preventing complications with the application of the criteria of massif energy dissipation while deep-hole drilling. The formula for defining energy dissipation coefficient has been introduced. The character of its dependence upon the depth of a hole and elastic characteristics of the massif has been defined. On the basis of the analysis of the given formulae for estimating rocks rigidity against self-destruction the dependence between massif rigidity coefficient against self-destruction occurs at the simultaneous fall of the energy dissipation coefficient.

Розглядаючи гірський масив як систему з великим запасом накопиченої потенціальної енергії стало можливим створення нових способів руйнування гірських порід та запобігання динамічним явищам на основі керування станом гірського масиву [1]. При проведенні гірничих виробок робота, яка йде на деформування гірських порід, накопичується у вигляді потенціальної енергії. Частина її витрачається на зміну об'єму, а частина — на зміну форми.

Характер зміни потенціальної енергії гірського масиву при бурінні глибоких свердловин засвідчив, що за своїми розмірами тільки питома потенціальна енергія деформації і питома потенціальна енергія зміни об'єму можуть бути перетворені в роботу. Енергія, яка затрачена на формозміну, при непружному деформуванні може повністю розсіюватися. Причому, чим більше тіло наділене непружними властивостями, тим більше енергії буде витрачатися на формозміну. Отже, чим міцніша порода, тим менше роботи деформації витрачається на зміну форми і тим більше йде її на накопичення потенціальної енергії, яка при досягненні певної межі може перейти в роботу крихкого руйнування [2].

При проведенні виробки по міцних породах більша частина потенціальної енергії реалізується у вигляді пружних деформацій. У цьому випадку при швидкому відриві породи на значній довжині одночасно буде звільнюватися досить велика кількість потенціальної енергії, що може призвести до раптового руйнування породи. Тому для зменшення ймовірності викиду породи чи втрати її стійкості при проведенні виробки необхідно звільнювати накопичену масивом енергію невеликими порціями. Технічно це можна здійснювати за рахунок швидкості зміни напруженого стану масиву

(проведення виробки комбайном, буріння). Оскільки з часом питома потенціальна енергія зменшується, то при руйнуванні породи більша частина її встигне розсіятися, і тим самим знизиться ймовірність виникнення викиду породи. Крім цього, при проведенні виробки вказаними способами швидкість звільнення енергії пружних деформацій буде стримуватись вибоєм виробки, що, в свою чергу, позитивно відіб'ється на її стійкості. Таким чином, зменшення енергії в часі дає змогу зміною швидкості проведення виробки керувати характером руйнування порід.

Результати розв'язання практичних задач стійкості гірничих виробок засвідчили, що неможливо ігнорувати непружні властивості порід, оскільки це спотворює не тільки кількісну, але й якісну сторону динамічного явища. Для врахування непружних властивостей матеріалів при динамічних розрахунках використовується низка теорій [3, 4]. Загальноприйнята міра непружних властивостей (внутрішнього тертя) визначається із енергетичних міркувань і виражається коефіцієнтом поглинання (розсіювання) енергії [4]

$$\psi = \frac{\Delta u}{u}, \quad (1)$$

де: Δu – незворотно розсіяна тілом за один цикл частина енергії деформації;

u – потенціальна енергія тіла, яка відповідає амплітуді деформації за той же цикл.

Оскільки під внутрішнім тертям в матеріалі розуміють незворотні в енергетичному відношенні процеси, які супроводять циклічне деформування тіл при будь-якій величині напружень, то в динамічних розрахунках використовують коефіцієнт непружного опору (γ_0), який знаходиться із відношення

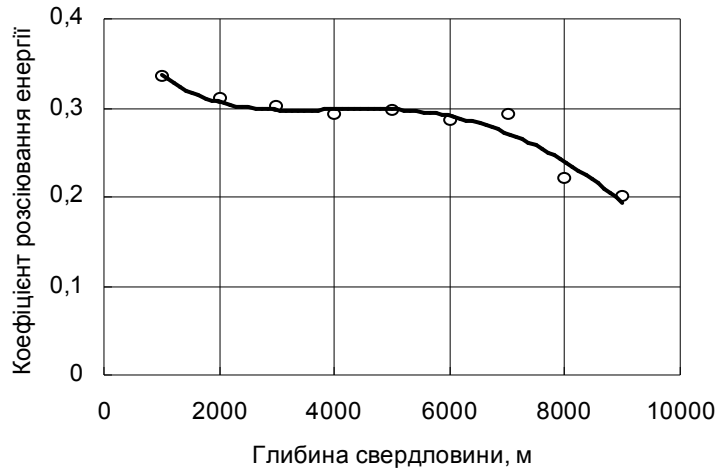


Рисунок 1 — Залежність коефіцієнта розсіювання енергії від глибини свердловини

$$\psi = 0,2 \pi \gamma_0. \quad (2)$$

Вираз (2), який пов'язує ψ і γ_0 , зберігає силу для напружених станів будь-якого виду.

Проведені експериментальні дослідження з вивчення коефіцієнта непружного опору засвідчили, що для більшості матеріалів він практично не залежить: від швидкості деформування для частот від 0,01 до 10000 Гц; амплітуди деформацій; статичних напружень; кількості випробувань; розмірів зразків і закону зміни зовнішнього навантаження [2].

Викладене вище дає підстави вважати коефіцієнти ψ і γ_0 важливими характеристиками при динамічних розрахунках. Незважаючи на це, для гірських порід при їх розбурюванні вони не визначаються. У зв'язку з цим для умов глибокого буріння виведено формулу для визначення коефіцієнта ψ . Оскільки повна питома потенціальна енергія деформації дорівнює

$$u = u_{об} + u_{\phi}, \quad (3)$$

можна записати, що

$$\psi = \frac{u_{\phi}}{u_{об} + u_{\phi}}, \quad (4)$$

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

u_{ϕ} – питома потенціальна енергія формозміни, яка накопичується за рахунок зміни форми елемента.

Визначення питомої потенціальної енергії деформації та її складових у випадку об'ємного напруженого стану провадиться за формулами [5]

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

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

$$u_{\phi} = \frac{1 + \mu}{3E} g^2 H^2 (3 \rho_n^2 - 6 \rho_n \rho_p + 3 \rho_p^2). \quad (7)$$

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

Розглянемо характер зміни коефіцієнта розсіювання енергії з ростом глибини свердловини. На основі середніх значень фізико-механічних властивостей основних типів порід розрізу надглибокої свердловини СГ-3 побудовано графік залежності коефіцієнта розсіювання енергії від глибини свердловини (рис. 1). Аналіз графіка засвідчує, що зв'язок між коефіцієнтом розсіювання енергії і глибиною свердловини загалом має нелінійний характер, а сам коефіцієнт — тенденцію до зниження.

Результати розрахунку коефіцієнтів розсіювання енергії використано також і для побудови графіка залежності їх від зміни модуля пружності гірських порід (рис. 2). Із графіка видно, що із збільшенням модуля пружності порід коефіцієнт розсіювання енергії збільшується. Доказано, що підвищення непружних властивостей порід, які вміщують виробку, є одним із способів підвищення безпечних умов її проведення. Це узгоджується з відомим в механіці фактом про те, що із зростанням співвідношення межі міцності на стиснення до межі міцності на розтяг підвищується схильність порід до крихкого руйнування, тобто знижується їх стійкість при деформуванні [6].

З метою перевірки даного твердження для умов глибокого буріння побудовано графік залежності коефіцієнта ψ від зміни співвідношення σ_{cm} / σ_p (рис. 3). З отриманої графічної

залежності видно, що із збільшенням вказаного співвідношення коефіцієнт розсіювання енергії знижується.

На основі аналізу відомих аналітичних виразів для оцінки стійкості порід до саморуйнування отримано залежність між коефіцієнтом стійкості і коефіцієнтом розсіювання енергії, яка має вигляд

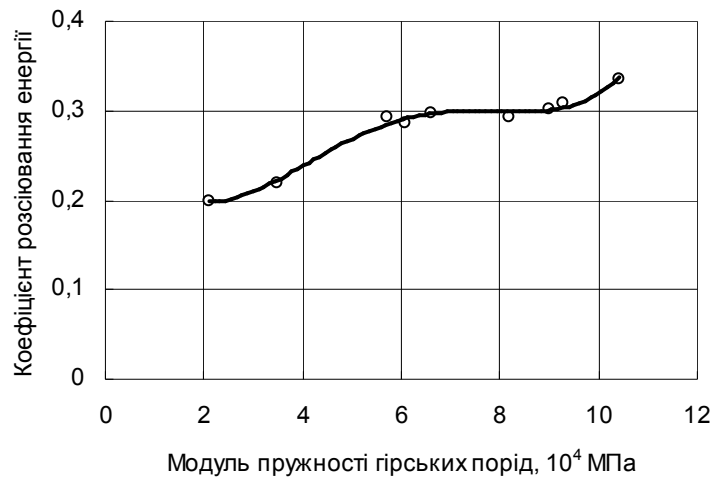


Рисунок 2 — Залежність коефіцієнта розсіювання енергії від модуля пружності гірських порід

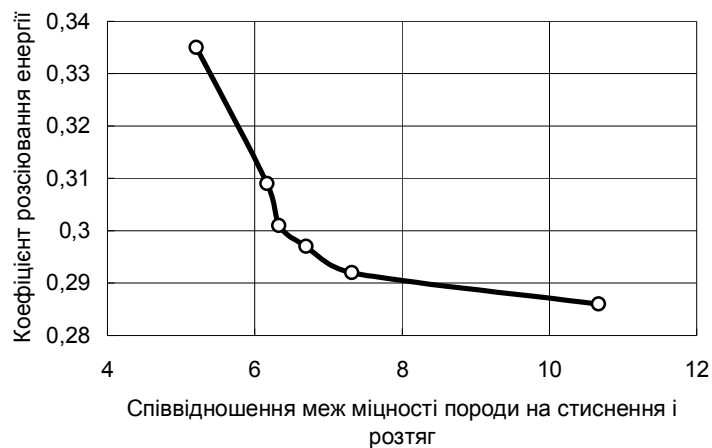


Рисунок 3 — Залежність коефіцієнта розсіювання енергії від співвідношення меж міцності породи на стиснення і розтяг

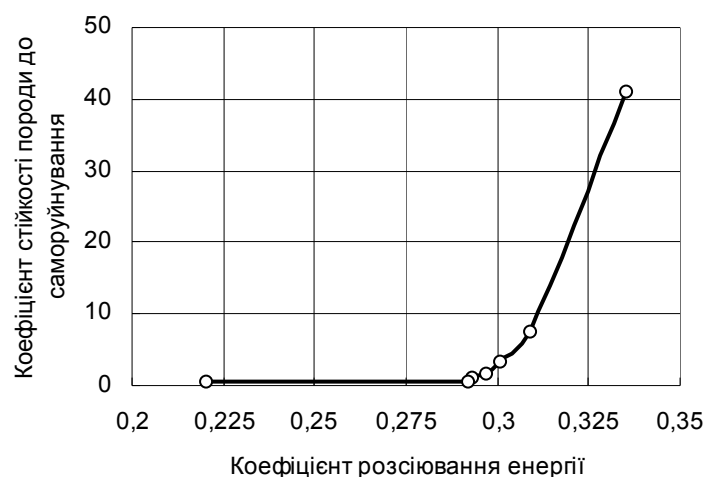


Рисунок 4 — Залежність коефіцієнта стійкості породи до саморуйнування від коефіцієнта розсіювання енергії

$$K_{cm} = \frac{[u_\phi]}{\psi(u_{об} + u_\phi)}, \quad (8)$$

де $[u_\phi]$ – питома потенціальна енергія формозміни при лінійному напруженому стані породи.

За даною формулою проведено розрахунки, результати яких подано у вигляді графіка (рис. 4). З отриманої графічної залежності видно, що зниження коефіцієнта стійкості породи до саморуйнування проходить одночасно із зниженням коефіцієнта розсіювання енергії.

Для оцінки небезпечності викиду порід гірничих виробок широке використання знайшов коефіцієнт непружного опору (γ_0). На основі промислового матеріалу встановлено, що інтенсивність викиду обернено пропорційна величині коефіцієнта непружного опору породи. Отримані результати досліджень дають підстави вважати, що даний параметр непружних властивостей порід є одним із найважливіших при розв'язанні практичних задач прогнозування і боротьби з викидами порід. Однак пряме перенесення в практику глибокого буріння рішень, які мають місце в гірничій справі, неможливе.

При бурінні 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 обвали стінок свердловин, утворення кулеподібних каверн, дискування і саморуйнування керн, самовільне скривлення свердловин. Встановлення причин і розробка методики прогнозування цих явищ має важливе значення для підвищення ефективності різних процесів при бурінні глибоких свердловин.

В цьому аспекті заслуговує уваги дослідження пружних параметрів по розрізу Кольської та інших глибоких свердловин. Загальну уяву про пружну анізотропію по цілому розрізу свердловини СГ-3 можна скласти, аналізуючи показник анізотропії B [7]. Інтервали глибин, в межах яких спостерігається найбільша анізотропія порід (1800-2100; 4400-4700; 6200-6400 м і 7500-7600 м), супроводжуються найбільшим діапазоном зміни кутів α і γ (α – кут між площиною пружної анізотропії порід і віссю свердловини; γ – кут шаруватості відносно тієї ж осі). В межах цих же інтервалів глибин відмічена найбільша кавернозність стовбура свердловини.

Деякі параметри просторового положення свердловини, форми її поперечного перерізу безпосередньо пов'язані з пружною анізотропією порід. Так відомо, що при бурінні в анізотропних породах [8] стовбур свердловини відхиляється від вертикалі в напрямку перпендикуляра до площини анізотропії (площини шаруватості, сланцюватості, смугастості). Найбільш

наочно цей ефект проявив себе при бурінні ряду свердловин, в тому числі і Криворізької надглибокої. Відповідно за азимутом відхилення свердловини від вертикалі можна судити про просторове положення площини анізотропії.

Як правило, на всіх розрізах глибоких і надглибоких свердловин, проведених в кристалічних породах, спостерігається, зокрема в нижніх горизонтах, явне розходження між результатами інтерпретації геофізичних робіт і розкритим геологічним розрізом. Для свердловини СГ-3 задовільну відповідність між геофізикою і геологією розрізу отримано лише до глибини 4500 м. Розходження стає зрозумілим при аналізі результатів вивчення реальної анізотропії порід. На глибині 4400 м проходить межа, яка відокремлює анізотропні породи від ізотропних. Таким чином, пружна анізотропія чинить суттєвий вплив на відхилення свердловини від вертикалі і на кавернозність її стовбура [7].

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 (див. табл. 1). У даному випадку під терміном “поверх” розуміється інтервал глибин, в межах якого витримуються приблизно однакові значення азимута, простягання кута падіння площини анізотропії параметра B .

Згідно з даною моделлю в межах першого поверху (0-1200 м) суттєвого відхилення свердловини від вертикалі не відмічено, що дало змогу отримати усереднений показник анізотропії $B_c = 0,5$. Це значення є пороговим і дозволяє відрізнити ізотропні породи від анізотропних [9]. Коефіцієнт розсіювання енергії в цьому інтервалі склав 0,335. Другий поверх (1300-1800 м) теж складений ізотропними породами ($B_c = 0,04$), а коефіцієнт розсіювання енергії $\psi = 0,32$. Помітних ускладнень у цих інтервалах не відмічено. Третій поверх (1800-2100 м) представлений сильно анізотропними породами ($B_c = 0,13$). Коефіцієнт розсіювання енергії становить 0,32. Значні варіації пружних і пружно-анізотропних властивостей викликали утворення в межах третього поверху великих каверн в стовбурі свердловини. В межах четвертого поверху (2100-4400 м) розмістився найбільш однорідний, ізотропний і стабільний блок. Це підтверджує параметр анізотропії $B_c = 0,06$ і коефіцієнт розсіювання енергії, $\psi = 0,301$. Стовбур свердловини відрізняє найнижча кавернозність. П'ятий поверх (4440-6200 м) на відміну від вищезалюгаючих характеризується значно більшим параметром пружної анізотропії $B_c = 0,18$. На початку цього поверху в свердловині суттєво зростає кавернозність. Попередньо на прикладі Уральської надглибокої свердловини було показано, що зростання кавернозності тісно пов'язане з анізотропією порід [9]. Коефіцієнт

Таблиця 1 — Параметри пружної анізотропії та коефіцієнт розсіювання енергії масиву по розрізу 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	—

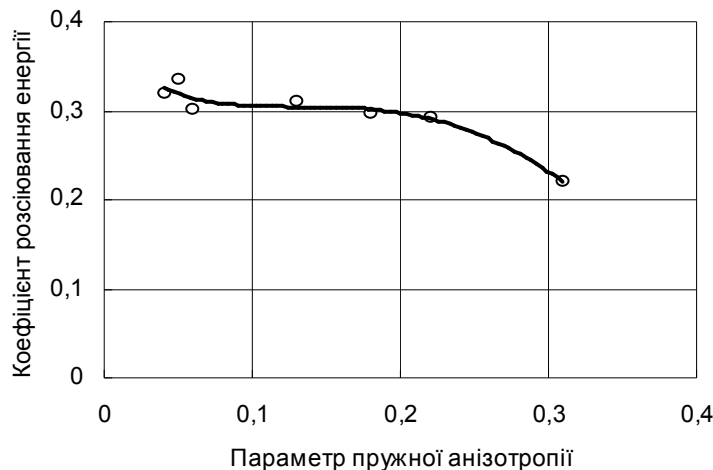


Рисунок 5 — Залежність коефіцієнта розсіювання енергії від параметра пружної анізотропії

розсіювання енергії в цьому інтервалі становить 0,297. На шостому поверсі (6200-7600 м) залягають ще більш анізотропні породи, ніж на п'ятому ($B_c = 0,22$). На глибині 6340-6470 м стовбур свердловини ускладнений кавернами неправильної форми. На ділянці 6424,5-6426 м каверна різко звужується, і переріз стовбура являє собою вузьку щілину. Коефіцієнт розсіювання енергії на даному поверсі становить 0,293. З глибини 7200 м переважає овальна форма перерізу стовбура свердловини з різними значеннями максимальних відстаней від умовної осі.

Сьомий поверх (7600-8600 м) відрізняє найбільш висока анізотропія порід ($B_c = 0,31$). Вона супроводжується високою кавернозністю стовбура свердловини. Для цього поверху характерне різке зниження коефіцієнта розсіювання енергії, $\psi = 0,220$. В межах восьмого поверху (8600-10150 м) пружна анізотропія порід в середньому дещо нижча, ніж на попередньо-

му ($B_c = 0,28$). Коефіцієнт розсіювання теж знизився і становить 0,199. На дев'ятому і десятому поверхах відмічено подальше зниження пружної анізотропії порід. Коефіцієнти розсіювання енергії не визначались через відсутність значень коефіцієнта Пуассона.

З метою встановлення характеру залежності коефіцієнта розсіювання енергії від параметра пружної анізотропії на основі даних табл. 1 побудовано графік (рис. 5). Аналіз графіка засвідчує, що він аналогічний графіку, представленому на рис. 1. Це підтверджує той факт, що із зростанням глибини свердловини відбувається зростання параметра пружної анізотропії. Отримані результати аналізу табл. 1 свідчать про те, що в умовах глибокого буріння коефіцієнт розсіювання енергії може слугувати параметром для прогнозування і попередження ускладнень.

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. Зорин А.Н. Управление динамическими проявлениями горного давления. – М.: Недра, 1978. – 175 с.
3. Писаренко Г.С. Рассеяние энергии при механических колебаниях. – К.: Изд. АН УССР, 1962. – 436 с.
4. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. – М.: Госстройиздат, 1960. – 131 с.
5. Барановський Е.М. Енергетична оцінка стану гірського масиву при бурінні глибоких свердловин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ, 2005. – Випуск 1(14). – С. 34-39.
6. Филин А.П. Прикладная механика твёрдого деформируемого тела: В 2-х т. – М.: Наука, 1975. – Т.1. – 832 с.
7. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований. – М.: МФ «Технонефтегаз», 1998. – 260 с.
8. Бахвалов А.И., Кузнецов Ю.И., Пономарёв В.Н. и др. Магнитометрические исследования Кольской сверхглубокой скважины // Советская геология. – 1989. – № 9. – С.83-87.
9. Горбачевич Ф.Ф., Козловская О.В., Розаев А.Е., Шамрай Г.И. Инженерно-геологическая характеристика пород разреза Уральской сверхглубокой скважины // Изв. РАН. Сер.: Геоэкология. – 1993. – №5. – С.66-74.

УДК 622.24.051

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД З ВРАХУВАННЯМ НЕОДНОРІДНОСТІ ЇХ СТРУКТУРИ

Т.О.Пригорювська

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 45369,
e-mail: spring@nung.if.ua

Проанализирован процесс разрушения горных пород с учётом их структурной неоднородности. Показано, что данный процесс является вероятностным, рассчитана вероятность прочности породы в заданной точке с учётом функции распределения неоднородностей.

The process of rock destruction with their heterogeneity was analyzed. It was determined, that this process is probabilistic, the rock hardness probability of given point was calculated.

Знання механізму руйнування гірських порід, розвитку в них мікро- та макродеформацій під дією механічних навантажень лежить в основі проектування найбільш прогресивних конструкцій породоруйнівних інструментів, які застосовуються в бурінні [3]. Буровий інструмент проектується з врахуванням взаємозв'язків між конструктивними елементами, міцнісними характеристиками матеріалу і т.д., але, оскільки основне призначення бурового інструменту — руйнування породи, то доцільно використати інший шлях — від властивостей породи до умов руйнування, що створюються інструментом.

У світовій практиці буріння такий підхід є досить поширеним, оскільки проектування моделі гірського масиву для конкретної свердловини є початковим етапом моделювання процесу буріння. Модель масиву використовується для вибору траєкторії свердловини. Такий комплексний підхід, за даними науковців фірми Schlumberger, дав змогу їм суттєво знизити витрати, пов'язані з будівництвом свердловин

з меж пластів, розломів, констант пружності, напрямків напружень і їх змін зі зміною глибини, міцності порід і розподілу пластового тиску.

Згідно з означенням [1], під термінами “гірська порода” та “корисні копалини” на сучасному етапі розвитку геологічних наук розуміють природний агрегат відповідного мінерального складу, будови, текстурних та структурних особливостей, який утворився в надрах Землі або на її поверхні в результаті різноманітних геологічних процесів і займає певний простір. Гірські породи являють собою неоднорідне, багатоконпонентне середовище, що складається з структурних елементів — зерен, які різняться між собою фізичними та механічними властивостями, та з пор, мікротріщин та субмікротріщин, насичених рідиною або газом. Опис фізичних явищ при пластичному деформуванні гірських порід з використанням моделі однорідного суцільного середовища викликає значні труднощі [4]. Про однорідність властивостей гірської породи можна говорити лише в границ-