

### Раздел 3. Физика горных процессов на больших глубинах

УДК 620.16:536

Л.М.Захарова<sup>1</sup>, О.Л. Тютюкін<sup>2</sup>, О.В.Чеснокова<sup>1</sup>, І.В.Назимко<sup>3</sup>,  
О.Б. Кусень<sup>1</sup>, Н.К. Петросян<sup>2</sup>, А.В.Шибяєва<sup>2</sup>

#### ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ БАГАТОЦИКЛОВИХ ВИПРОБУВАНЬ ЗРАЗКА ПОРОДИ В ОБ'ЄМНОМУ НАПРУЖЕНОМУ СТАНІ

<sup>1</sup> Інститут фізики гірничих процесів НАН України,  
49600, г. Дніпро, вул. Сімферопольська, 2-а

<sup>2</sup> Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна МОН України  
49010, Україна, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2

<sup>3</sup> Донецький національний технічний університет МОН України  
85300, Україна, Донецька область, м. Покровськ, пл. Шибанкова, 2

*Мета дослідження полягає у встановленні закономірностей необоротних процесів, які можуть виникати в гірських породах під час їх деформування у межах навантаження, яке відповідає пружному стану, коли порода не переходить через межу міцності.*

*Методика дослідження базувалась на основах термодинаміки необоротних процесів й результатах випробування зразків пісковика в умовах нерівнокоп-монентного напруженого стану.*

*Основні результати дослідження полягають у встановленні максимальної чутливості виробництва ентропії до дотичного типу напружень, причому вказана чутливість згасає зі зростанням всебічного стискування породних зразків.*

*Наукова новизна. Вперше встановлені закономірності зміни виробництва ентропії у гірських породах під дією флуктуацій гірського тиску.*

*Практична значимість полягає у тому, що з'являється можливість більш детального аналізу напружено-деформованого стану масиву гірських порід навколо діючого очисного й підготовчого вибію під час виконання елементарних операцій виїмки корисних копалин.*

**Ключові слова:** гірський тиск, деформації, необоротні процеси, виробництво ентропії.

### Вступ

Механічні властивості гірських порід відіграють ключову роль в оцінці стійкості масиву, прилеглого до гірничих виробок. Широко поширена думка про те, що пружні показники гірських порід є константами, за умов, що порода не перейшла за межу міцності [1]. Особливо ця думка є стійкою для пісковиків, які мають високу міцність і крихкість. Лабораторні випробування зразків подібних порід за традиційною схемою, як правило, підтверджують цю точку зору [2]. Підкреслимо, що вона настільки усталилася, що піддати її сумніву вважається просто недоречним. Разом з тим навіть досить міцний пісковик, якому присутні виражені крихкі властивості, містить мікрodefекти. Межі зони контакту зерен навіть при самому міцному цементі є вираженими мікрodefектами, які за певної схеми навантаження можуть проявитися у вигляді необоротних деформацій.

Теоретично, з точки зору термодинаміки незворотних процесів це цілком можливо, що описується рівнянням Гіббса для внутрішньої енергії тіла (1).

$$dU = TdS - PdV + \sum \mu_i dC_i, \quad (1)$$

де  $T$  – температура,  $S$  – ентропія,  $P$  являє собою тиск,  $V$  – об'єм породи,  $\mu_i$  і  $C_i$  – хімічні потенціали компонентів речовини системи і середовища, з якою вона обмінюється цими речовинами і масова концентрація зазначених речовин.

Можна з упевненістю припустити, що хімічні реакції між речовинами навколо гірничої виробки не впливають істотно на прояви гірничого тиску. У зв'язку з цим в подальшому будемо розглядати компоненти  $TdS$  і  $PdV$ , які безпосередньо пов'язані з гірським тиском або його проявами. Навіть з урахуванням анізотропії масиву гірських порід і багатокомпонентного тензора напружень, параметр  $P$  можна вважати за характерну інтенсивну характеристику гірського тиску, наприклад, в якості  $P$  можна розглядати шаровий тензор напружень, що діють в гірському масиві. Знак мінус перед другою компонентою характеризує закономірний взаємозв'язок між тиском і збільшенням об'єму будь-якої термодинамічної системи. Оскільки усі фізичні процеси, що пов'язані з перерозподілом гірського тиску можна з припустимою похибкою вважати ізотермічними, зменшення тиску призводить до збільшення обсягу масиву гірських порід і навпаки.

Компонента  $TdS$  з урахуванням практично сталої температури визначається ентропією системи.

Якщо компонента  $PdV$  у чистому вигляді відображає оборотний процес і є теоретичною основою сталості деформаційних параметрів породи до настання межі її міцності, то друга компонента  $TdS$  визначає можливість протікання необоротних процесів за умов «пружного» деформування породного зразка. Неоднорідності і місця контактів зерен пісковіку є фізичними передумовами для протікання таких незворотних процесів. Для виникнення таких

незворотних процесів необхідно лише створити умови, які за традиційної схеми випробувань не реалізовувалися.

Автору робіт [3,4] вдалося знайти такі режими випробувань, за яких міцний крихкий пісковик продемонстрував зміну деформаційних властивостей практично у два рази.

Метою даної статті було дослідити термодинаміку необоротних процесів, що супроводжували навантаження пісковика у режимі пружного деформування.

### **Методика досліджень**

У роботі застосована сучасна теорія необоротних процесів [5], яка вивчає процеси виробництва ентропії під час розвитку нерівноважних станів системи. Залучена також кінетична теорія міцності твердих тіл [6], яка вважає флуктуації термодинамічного стану системи головним чинником, що визначає довговічність твердого тіла. Як експериментальну методику застосовано випробування зразків гірських порід у нерівнокомпонентному напруженому стані, причому активація флуктуацій здійснювалась за допомогою багаточислових навантажень-розвантажень зразків породи. Процес накопичення необоротних деформацій зразків без переходу породи у позамежний стан вивчається на основі аналізу динаміки ентропії.

Випробування пісковика, що має міцність на одноосьовий стиск порядку 90-100 МПа, здійснювалося в установці тривісного стиску з сервомеханізмом, що дозволяє задавати будь-які режими випробувань і реалізовувати їх у часі. Для чистоти експерименту використовувався ізотропний пісковик, міцність і деформованість якого перпендикулярно і паралельно нашарування була практично однаковою, оскільки її відмінності перебували в межах 5%, тобто не перевищували помилку вимірювань. Діаметр зразка становив 44,4 мм, а його висота 88 мм, що повністю відповідає вимогам міжнародного стандарту, відповідно до яких висота зразка повинна бути не менше півтори величини його діаметра.

До і після експериментів з породних зразків виготовлялися шліфи, які піддавалися мікроскопічному дослідженню мікроструктури пісковика і можливого виявлення її еволюції в результаті тривісних випробувань.

На випробовуванні зразки були наклеєні тензодатчики з високоякісного матеріалу (константанової фольги, що була заламінована у поліамідну плівку). Зразки оберталися мідною фольгою товщиною 0,127 мм. У процесі випробувань зразок навантажували осьовим зусиллям і бічним тиском, що створювалося у камері тривісного стиску. Осьові і радіальні компоненти деформацій ( $\varepsilon_{11}$  і  $\varepsilon_{\theta\theta}$ ) і напружень ( $\sigma_{11}$  і  $\sigma_{\theta\theta}$ ) вимірювалися тензометрами і манометрами з подальшим перетворенням в електричні сигнали і їх посиленням.

### Результати

Режим навантаження зразків, за якого вдалося виявити накопичення необоротних деформацій вдалося знайти, використавши елементарні обурення або флуктуації, що виражаються наступними формулами (2 і 3) [5,7].

$$\Delta\delta S = (1/T)\sum\Delta X_i\Delta J_i . \quad (2)$$

Величину  $\Delta\delta S$  назвали надмірним виробництвом ентропії, яке було викликане збуренням системи відносно стаціонарного нерівноважного стану. Величини  $X_i$  і  $J_i$  являють собою відповідно термодинамічні сили і потоки. У даному випадку в якості термодинамічних сил виступають напруження, що діють у зразку гірської породи, а в якості потоків – необоротні деформації зразка, що відбуваються у процесі його випробувань.

Процес релаксації ентропії після впливу флуктуації описується рівнянням [6, 7]:

$$S_j(t) - S_j(0) = \sum \{L_{jk}\exp(-t/\tau_k)\} . \quad (3)$$

У даному рівнянні ентропія використана як екстенсивний термодинамічний параметр. Символом  $\tau_k$  позначено час релаксації  $k$ -того процесу, який впливав на  $j$ -й процес. Символи  $S_j(t)$  і  $S_j(0)$  позначають нерівноважне і рівноважне значення екстенсивного параметра, відповідно. Різниця зазначених величин являє собою приріст ентропії або її виробництво.  $L_{jk}$  являє собою коефіцієнт взаємності Онзагера термодинамічних сил і потоків.

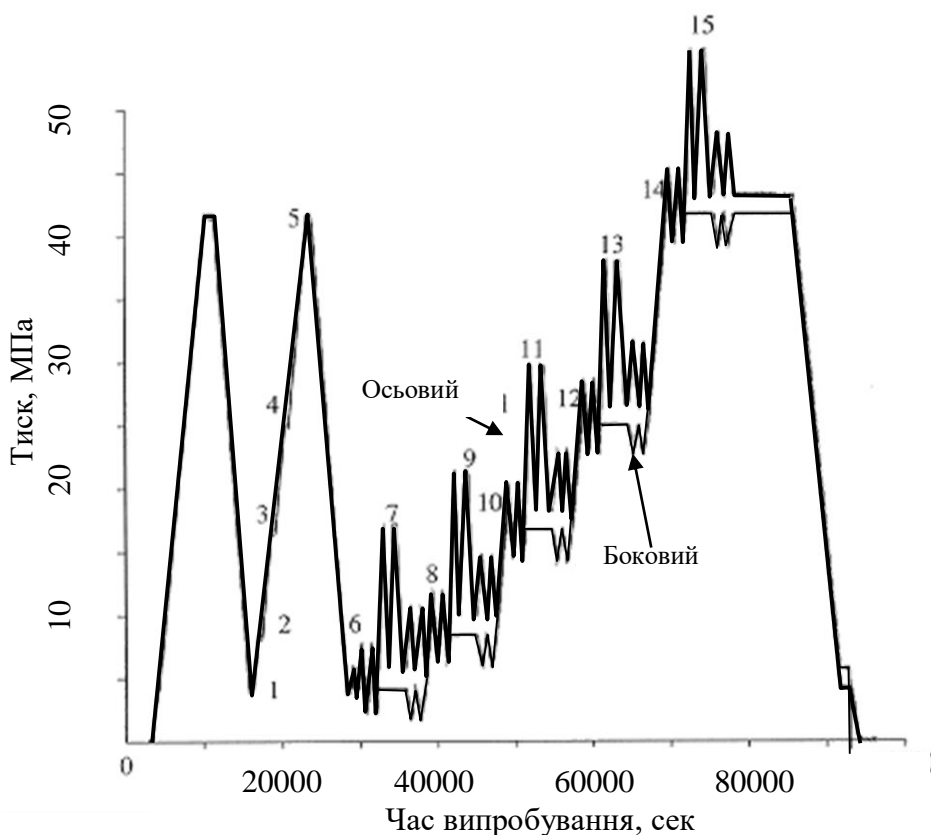
До початку основних випробувань зразки піддавалися спеціальному тренуванню шляхом гідростатичного обтиску. Це робилось для усунення можливого впливу дефектів і перевірки анізотропності зразка. Обробка результатів випробувань зразків на їх гідростатичне обтиснення підтвердила, що зразки практично ізотропні, і крім того показала, що зразки мають ідеально лінійну оборотну стискуваність. У процесі циклічного навантаження-розвантаження петлі гістерезису на діаграмі «напруження - деформації» не утворювалися. Іншими словами за умов гідростатичного обтиснення зразки пісковика дійсно демонстрували лінійні пружні властивості і при цьому реально деформувалися оборотно, а їх внутрішня енергія змінювалася лише завдяки компоненті  $PdV$  (див. формулу 1).

Таким чином, були забезпечені найпростіші властивості породи, яка випробувалась: ізотропність й лінійна пружність, а значить і умови сталості деформаційних її характеристик і незалежність їх від рівня напружень. При цьому в наявності були всі умови, які підтверджують традиційні ознаки сталості деформаційних властивостей міцної ізотропної крихкої породи.

Основні випробування зразків пісковика проводилися згідно спеціальному режиму. По-перше, навантаження зразка здійснювалося у межах пружності, а точніше в межах міцності на одновісний стиск. При міцності випробуваного

пісковика на одноосьовий стиск не менше 90 МПа активна осьова компонента напружень не перевищувала 50 МПа. Якщо врахувати, що навіть при невеликому бічному стисненні міцність породи збільшиться у кілька разів, можна зробити висновок про те, що випробування зразків проводилися в межах пружності з великим запасом.

По-друге, зразки, як уже вказувалося, тренувалися гідростатичним обтискуванням перед проведенням основних випробувань. На рис. 1 показаний графік зміни осьової і бічної компонент напружень, створюваних в установці тривісного стиску.



**Рис. 1.** Режим зміни осьового і бокового тиску під час випробування породного зразка. Цифрами позначені етапи випробувань

На графіку видно, що на початку випробувань здійснювалося двічі рівномірне збільшення осьової і радіальної компоненти напружень до 40 МПа і зниження до 5 МПа. Як уже згадувалось, залишкових деформацій зразків при цьому не було зафіксовано, що свідчить про чисто пружний характер деформацій.

По-третє, у процесі подальших випробувань рівень навантаження збільшувався декількома ступенями, причому на кожному рівні здійснювалися збурення зразка шляхом варіації (флуктуації) осьової і радіальної компоненти на

5-10 МПа. При цьому навіть на першому ступені навантажування, коли рівень напружень у зразку був мінімальний, амплітуда флуктуацій або збурень зразка була менше рівня напружень у два рази. На останньому щаблі амплітуда збурень становила всього 25% від рівня діючих напружень. Якщо врахувати, що міцність зразків була не менше 90 МПа, то слід зробити висновок про те, що амплітуда збурень не перевищувала 12% від межі міцності. Отже, збурення, що прикладались до зразків, відповідали поняттю «флуктуації», оскільки вони несуттєво відхиляли напружений стан від поточного ступеня навантажування, на якому зразок встигав приходити в рівноважний стан.

У процесі випробування зразків розраховувалися нормальні  $\sigma$ , і дотичні  $\tau$  напруження, а також відповіді їм об'ємні  $\kappa$  і дотичні  $\gamma$  деформації.

Модулі об'ємних  $K$  і дотичних  $G$  деформацій визначалися на кожному ступені навантажування згідно залежностям

$$K = \partial\sigma/\partial\kappa, \quad G = \partial\tau/\partial\gamma,$$

де  $\sigma$  і  $\tau$  позначають нормальні та дотичні напруження, а  $\kappa$  і  $\gamma$  – відповідні їм деформації.

При цьому в якості збільшень об'ємних і дотичних деформацій приймалися величини відповідних деформацій, які генерувалися елементарними збуреннями. По суті модулі деформації визначалися найбільш точним чином як тангенс кута нахилу дотичних до графіків деформування. Крім того, завдяки сервомеханізму і можливості управління співвідношенням осевої і радіальної компонент напружень і деформацій, розрізняли кілька типів модулів.

Традиційно модуль пружності визначають в одноосьовому напруженому стані. Тому величину модуля при одноосньому навантаженні визначали за залежністю  $K_{us} = \partial\sigma_{11}/\partial\varepsilon_{11}$  при  $\Delta\sigma_{\theta\theta} = 0$ , де  $\Delta\sigma_{\theta\theta}$  означає збурення радіального напруження.

Модуль, що визначався за умов відсутності радіальних деформацій знаходився згідно залежності  $Y_{u\varepsilon} \equiv \partial\sigma_{11}/\partial\varepsilon_{11}$  при  $\Delta\varepsilon_{\theta\theta} = 0$ . Зрозуміло, що відсутність збурень радіальних деформацій зразка тепер підтримувалося за допомогою сервомеханізму шляхом регулювання радіальних збурень напружень. Аналогічно визначалася величина коефіцієнта бічних деформацій  $D_{us} \equiv -\partial\varepsilon_{\theta\theta}/\partial\varepsilon_{11}$  при  $\Delta\sigma_{\theta\theta} = 0$ .

Для підвищення достовірності результатів випробувань модулі деформації вимірювали динамічними методами шляхом пропускання ультразвукових коливань через випробуваний зразок. Таким чином, всі запобіжні заходи, забезпечення точності вимірювань, а також однорідності породних зразків були виконані, щоб гарантувати достовірність висновків досліджень. Це зроблено для того, щоб мати вагомі підстави для спростування усталеної думки про сталість деформаційних характеристик гірських порід на етапі навантаження, що відповідав пружному стану зразків.

Виявилось, що завдяки спеціальному режимові навантаження зразків вдалося отримати істотно різні величини деформаційних показників породи в залежності від рівня нормальних напружень. При зростанні щарового девіатору нормальних напружень від 5 до 45 МПа модуль деформації  $Y$ , визначений в умовах відсутності радіальних деформацій зразка змінився у межах 20-39 МПа. Модуль пружності (модуль Юнга), визначений за відсутності радіальних збурень напруженого стану  $E$  наростав від 20 до 36 МПа. Модуль об'ємної деформації  $K$  збільшився від 7 до 15 МПа, а модуль зсуву  $G$  від 9 до 14 МПа. Коефіцієнт Пуассона  $\nu$  при цьому змінювався в межах 0,1-0,24.

Таким чином, деформаційні характеристики міцного крихкого зразка породи, що деформується при рівні навантажень, які перевищують 60% від межі міцності на одноосьовий стиск, можуть змінюватися практично в два рази в залежності від режиму навантаження. Такий ефект досягнутий саме завдяки застосуванню режиму елементарних збурень, що дозволило з'явитися прихованим дефектам у зразках пісковика. Важливо, що виконані дослідження мають прямий вплив на практику видобутку горючих копалин.

Так, при видобутку вугілля або нафти напружений стан навколо гірничої виробки або вибію нафтової свердловини істотно відрізняється від одновісного, і більш того, при виконанні елементарних процесів видобутку відбувається багаторазове збурення напружень. Часто амплітуда цих збурень не перевищує десятка відсотків від межі міцності порід, що вміщують корисну копалину. Прикладом таких збурень при виконанні операцій в очисному вибої є елементарні процеси видобутку вугілля і розвантаження однієї секції механізованого кріплення, а також посування очисного вибію на довжину заходки. Саме такі процеси незначно збурюють напружений стан масиву навколо чинного очисного вибію.

При цьому такі збурення часто носять знаковмінний характер, тобто такий, що моделювався під час випробування пісковика. Характерно, що зазначені елементарні збурення є першопричиною розвитку масштабних аварій і як наслідок втрати стійкості роботи виїмкової дільниці.

Очевидно, що характер перерозподілу напружень при дії елементарних збурень визначається не середнім модулем або усередненою величиною коефіцієнта Пуассона. Навпаки, на кожному елементарному шляху навантаження масиву навколо виїмкової дільниці зміна напруженого стану регулюється саме поточною величиною деформаційних характеристик порід, які відповідають рівню нормальних і дотичних напружень, що діють в момент обурення.

Неврахування залежності деформаційних параметрів порід від рівня нормальних і дотичних напружень призводить до суттєвої похибки розрахунку діючих напружень. Ця похибка, як показує експеримент, може досягати 100%, оскільки величини деформаційних показників змінюються практично в два рази у діапазоні напружень, що найчастіше характеризують стан оточуючих виїмкових ділянку порід на глибинах 500-1000 м.

В результаті обробки даних випробувань з'ясувалося, що зміна деформаційних показників випробуваної породи залежить як від збурень нормальних, так і дотичних напружень. Завдяки цьому виявилось можливим виділити внесок по збуренню обох компонент у загальну зміну величини деформаційних показників згідно з такими формулами:

$$\Delta \kappa = \frac{\Delta \sigma}{\widehat{K}_\sigma} + \Delta \tau \zeta(\sigma, \tau); \quad \Delta \gamma = \frac{\Delta \tau}{\widehat{G}_\tau} + \Delta \sigma \psi(\sigma, \tau).$$

При цьому компонента  $\zeta$  відповідає за зміну деформаційного показника від збурення дотичних напружень, а член  $\psi$  від збурення нормальних. Важливо, що ці компоненти дають можливість одночасно врахувати кооперативний ефект збурень різної природи. Порівнюючи ці формули з залежністю (2), можна зробити висновок, що другі множники є по суті добутком термодинамічних сил на відповідні феноменологічні коефіцієнти, які визначаються у формулі (3) через символи  $L$ . У ролі термодинамічних сил в даному випадку виступають збурення нормальної і дотичної компоненти напружень. Роль термодинамічних потоків відіграють реальні мікропотoki необоротних зрушень берегів контактів між зернами, які відображають процеси дисипації енергії гірського тиску під дією зазначених збурень.

Були встановлені емпіричні коефіцієнти залежності  $\zeta$  і  $\psi$  від нормальних і дотичних напружень. Використовуючи ці залежності, авторами цієї статті підраховані величини виробництва ентропії всередині гірської породи за рахунок внутрішніх процесів дисипації енергії гірського тиску на дефектах типу контактів зерен і мікропорах. При цьому обчислення виробництва ентропії виконані з розрахунку одиничного збурення, а саме при флуктуації компонент напружень рівній 1 МПа. Це дуже зручно, оскільки характеризує зміни стану системи, обумовлені одиничними збуреннями або флуктуаціями. На верхньому графіку рис. 2 показаний графік зміни виробництва ентропії із зростанням величини об'ємного стиснення породи і рівні дотичних напружень 1 МПа (не плутати з такою ж величиною флуктуації).

Аналіз графіків свідчить про те, що найбільш чутливим до збільшення всебічного стиснення є коефіцієнт, який відображає вплив флуктуацій дотичних напружень. Так загасання виробництва ентропії від одиничного збурення дотичних і нормальних напружень спостерігається вже при 20 МПа. При цьому виробництво ентропії падає в сотні разів. Частка виробництва ентропії під впливом збурень нормальної компоненти напружень також зменшується зі збільшенням всебічного стиснення, однак вона не настільки чутлива до зростання напружень. Так, при збільшенні всебічного стиснення від 0 до 50 МПа виробництво ентропії, обумовлене флуктуаціями нормальних напружень, знижується лише у 8 разів.



Аналогічна залежність в якісному плані отримана і при рівні дотичних напружень 10 МПа (рис. 2, нижній фрагмент). Однак слід зазначити, що величина дотичних напружень сильно впливає на рівень виробництва ентропії. Так, при зростанні рівня дотичних напружень усього в 10 раз, порядок величини виробництва ентропії (а значить й інтенсивності дисипації енергії гірського тиску) зріс приблизно в 100-500 разів.

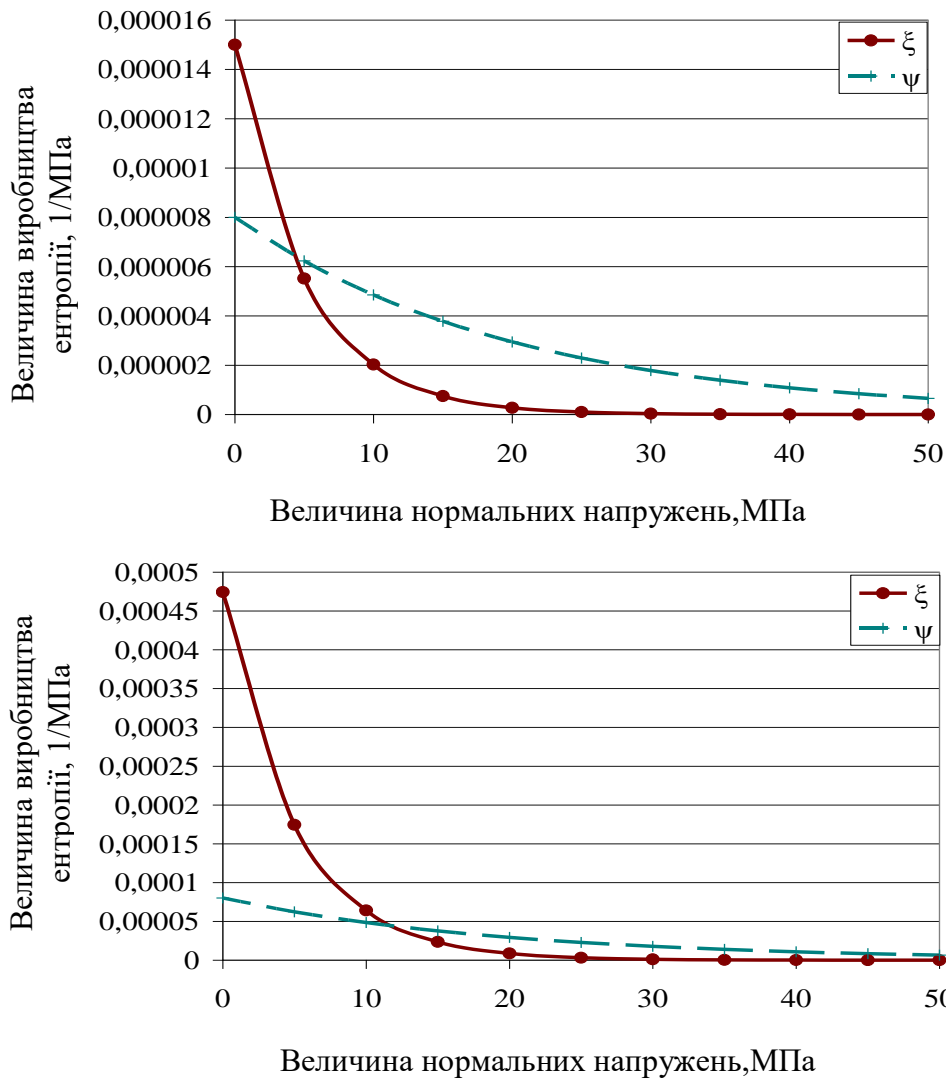


Рис. 2. Зміна виробництва ентропії при рівні дотичних напружень 1 і 10 МПа

При синхронному збільшенні рівня нормальних і дотичних напружень графіки зміни виробництва ентропії мають екстремум в діапазоні всебічного стиснення 8-30 МПа (рис. 3). При більш високому рівні всебічного стиснення темпи виробництва ентропії починають падати.

Це добре узгоджується з тим, що збільшення всебічного стиснення значно підвищує межі міцності гірських порід, а також енергоємність їх деформу-

вання за межею міцності [8]. Можна сказати, що загасання виробництва ентропії обумовлено зростанням енергоємності всіх необоротних процесів деформування гірської породи (не тільки руйнування, але і деформацій зруйнованої породи за межею міцності).

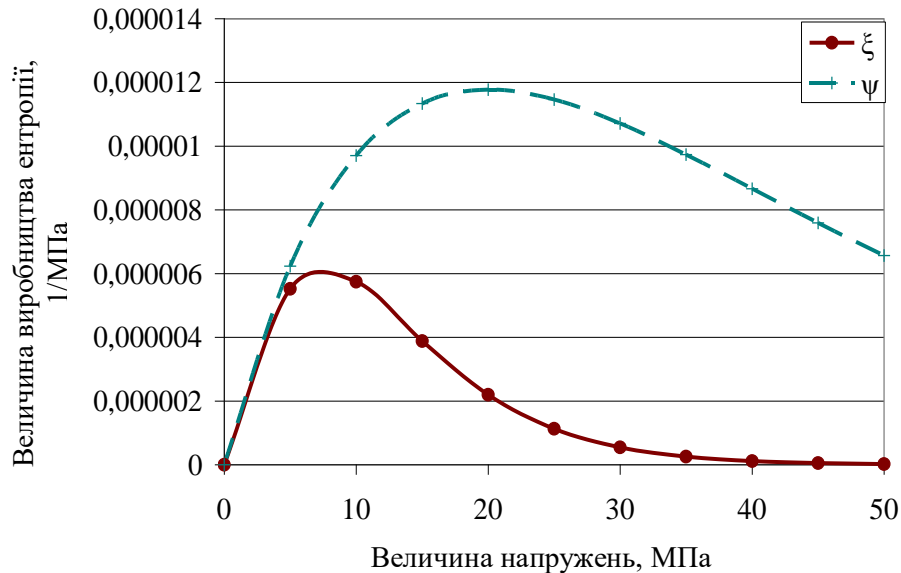


Рис. 3. Характер зміни виробництва ентропії при різному рівні всебічних напружень

### Обговорення

Порівнюючи встановлену закономірність з графіками на рис. 1-2 можна зробити однозначний висновок про зміцнення зразка породи при збільшенні всебічного стиснення і зростання необоротних деформацій. Отже, незворотні і, зокрема, пластичні деформації зразка відображають процес його зміцнення з накопиченням незворотних деформацій.

Підйом функції виробництва ентропії на початковій ділянці кривих має іншу природу і обумовлений тим, що приріст виробництва ентропії від збільшення дотичних деформацій не встигає придушуватися низьким поки рівнем напружень всебічного стиснення. У той момент, коли ефекти зростання виробництва і його придушення порівнюються за масштабами свого впливу, настає максимум виробництва, після якого слід його спад. Виконаний в цій роботі аналіз показує, що отримані експериментально висновки про залежність деформаційних характеристик гірської породи від рівня напружень в межах навантажень, де порода повинна поводити себе як пружне тіло мають теоретичне обґрунтування і не є випадковими.

Таким чином, порівняння результатів лабораторних випробувань зразків гірської породи з результатами теоретичного опису термодинаміки гірського масиву навколо гірничої виробки свідчить про добре узгодження практики і

теорії. Це означає, що розроблені критерії стійкості гірничої виробки можуть використовуватися для аналізу геомеханічних процесів, які протікають навкруги виїмкової ділянки і недостатньо на сьогоднішній день вивчені.

### **Висновки**

На основі аналізу результатів випробування зразків пісковіку в умовах всебічного напруженого стану підраховані величини виробництва ентропії всередині гірської породи за рахунок внутрішніх процесів дисипації енергії гірського тиску на дефектах типу контактів зерен і мікропорах, які відбувались під дією флуктуацій напружень під час багатоциклового навантаження й розвантаження породи.

Найбільш чутливим до збільшення всебічного стиснення є коефіцієнт, який відображає вплив флуктуацій дотичних напружень. Частка виробництва ентропії під впливом збурень нормальної компоненти напружень також зменшується зі збільшенням всебічного стиснення, однак вона не настільки чутлива до зростання напружень.

При синхронному збільшенні рівня нормальних і дотичних напружень графіки зміни виробництва ентропії мають екстремум в діапазоні всебічного стиснення 8–30 МПа. При більш високому рівні всебічного стиснення темпи виробництва ентропії починають падати. Отже загасання виробництва ентропії обумовлено зростанням енергоємності всіх необоротних процесів деформування гірської породи (не тільки руйнування, але і деформацій зруйнованої породи за межею міцності).

1. Kořst'ák B., Mrlina J. Stemberk J. Chán B. (2018). Tectonic movements monitored in the Bohemian Massif, *Journal of Geodynamics* 52, 34–44.
2. Ortlepp W.D., Armstrong R, Ryder JA, O'Connor D. (2015). Fundamental study of micro-fracturing on the slip surface of mine-induced dynamic brittle shear zones. In: Sixth international symposium rockburst and seismicity in mines, Australia, 229–237.
3. Boitnott G. N. (1997). Experimental characterization of the nonlinear rheology of rock // *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* Vol. 34, No. 3-4.
4. Boitnott G. N. (1993). Fundamental observations concerning hysteresis in the deformation of intact and jointed rock with applications to nonlinear attenuation in the near source region, in *Proceedings of the Numerical Modeling for Underground Test Monitoring Symposium*, Durango, Colorado, LA-UR-93-3839, 121–134.
5. Kondepudi, D., & Prigogin, I. (2015). *Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures*. 2nd ed. New York, John Wiley & Sons; XXVI
6. Kolari, K. (2017). A complete three-dimensional continuum model of wing-crack growth in granular brittle solids, *International Journal of Solids and Structures*, 115–116, 27–42.
7. Glensdorf, P., & Prigogine, I. (1971). *Thermodynamic theory of Structure, Stability and fluctuations*. Brussels: Wiley.

*Л.Н. Захарова, А.Л. Тюткин, О.В. Чеснокова, И.В. Назимко, А.Б. Кусень,  
Н.К. Петросян, А.В. Шibaева*

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МНОГОЦИКЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦА ПОРОДЫ В ОБЪЕМНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Цель исследования заключается в установлении закономерностей необратимых процессов, которые могут возникать в горных породах при их деформации в пределах нагрузки, соответствующей напряженному состоянию, когда порода не переходит через предел прочности.

Методика исследования базировалась на основах термодинамики необратимых процессов и результатах испытания образцов песчаника в условиях неравнокомпонентного напряженного состояния.

Основные результаты исследования заключаются в установлении максимальной чувствительности производства энтропии к касательным напряжениям, причем указанная чувствительность угасает с ростом всестороннего сжатия породных образцов. Научная новизна. Впервые установлены закономерности изменения производства энтропии в горных породах под действием флуктуаций горного давления.

Практическая значимость заключается в том, что появляется возможность более детального анализа напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг действующего очистного и подготовительного забоя при выполнении элементарных операций выемки полезных ископаемых.

**Ключевые слова:** горное давление, деформации, необратимые процессы, производство энтропии.

*L.M. Zakharova, A.L. Tiut'kin, O.V. Chesnokova, I.V. Nazimko, O.B. Kusen',  
N.K. Petrosian, A.V. Shibaieva*

## THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE RESULTS OF MULTI-CYCLE TESTING OF A SAMPLE IN A THREE-DIMENSIONAL STATE

Purpose of this investigation is study of irreversible behavior of a rock sample, which might occur in rocks during deforming under load, which is less than critical strength.

Methodology of thermodynamics of irreversible processes has been employed in this research as well as results of sandstone sample testing in three dimensional state.

Results. Amount of entropy production is extremely sensitive to tangential stress, thereat this sensitivity decays as three-dimensional stress components grow.

Novelty. It was in the first time when behavior of entropy production has been investigated under ground pressure fluctuation.

Practical importance of the results is essential because we developed approach to investigate fine important details of the stress-strain state of the rock mass in vicinity of a longwall during elementary operation execution.

**Keywords:** rock pressure, deformation, irreversible processes, entropy production.