

УДК 622.240(075.8)

## ЕНЕРГЕТИЧНІ ТЕОРІЇ МІЦНОСТІ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В МЕХАНІЦІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

*Е. М. Барановський.*

*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*

*В. М. Мойсишин*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15  
e-mail: publicl@nuing.edu.ua*

*В статье рассматривается возможность использования энергетических теорий прочности при оценке напряженного состояния горного массива. Установлен характер зависимости саморазрушения породы на забое и в стенке от глубины скважины. Результаты расчётов стойкости породы к саморазрушению показали, что наиболее приемлемыми есть данные, в которых используются удельные потенциальные энергии изменения объёма и формоизменения. Предложены формулы для оценки удельной работы саморазрушения горных пород, обладающих пластической деформацией. Анализ формул показал, что удельная работа саморазрушения пластической породы может превысить удельную работу саморазрушения хрупкой породы в три и более раз при постоянной прочности и постоянных упругих свойствах пород.*

*In the paper the possibility of usage of the power theories of hardness is considered at an estimation of a tension of the mountain array. The nature of dependence of self-corrupting of formation on a bottom-hole back and in a wall from well depth is installed. The results of accounts of rigidity of rock to self-corrupting are shown the most reasonable there are datas, in which one the specific potential energy change of size and changing of the form are used. The formulas for an estimation of specific operation of self-corrupting of rocks having a plastic deformation are proposed. The analysis of the formulas has shown, that the specific operation of self-corrupting of plastic formation can exceed specific operation of self-corrupting of fragile formation in three and more times at constant hardness and constant elastic properties of formations.*

Сучасні теорії міцності, які створювались, головним чином, для конструкційних матеріалів, дозволяють із деякими допущеннями проводити розрахунки, опираючись на показники міцності або пластичності, що отримані при стандартних випробуваннях, не вдаючись до спеціальних випробувань у складному напруженому стані. Слід зазначити, що ці теорії міцності придатні тільки для ізотропних матеріалів з однаковим опором руйнуванню або межею текучості при одноосових випробуваннях на розтяг і стиснення. Гірські породи не є такими, однак однозначність характеристик граничного стану, отримана при використанні цих теорій, дуже зручна при аналізі напруженого стану в твердих тілах. Останнє й визначило застосування енергетичних теорій міцності в механіці гірських порід для якісного аналізу.

Нам відомий ряд наукових праць, у яких стверджується, що традиційні технології і засоби проведення гірничих виробок, що ґрунтуються на руйнуванні гірських порід як інертного матеріалу, є джерелом і причиною активації сил гірського тиску [1, 2]. Отримані аналітичні дані свідчать про те, що при проведенні гірничих виробок робота, яка 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 питома потенціальна енергія деформації дорівнює:

$$u = u_{об} + u_{ф}, \quad (1)$$

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

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

Визначення питомої потенціальної енергії деформації та її складових у випадку об'ємного напруженого стану здійснюється за формулами [3]:

$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)], \quad (2)$$

$$u_{об} = \frac{1-2\mu}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2, \quad (3)$$



$$u_{\phi} = \frac{1+\mu}{3E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1), \quad (4)$$

де  $E$  – модуль Юнга;

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – головні напруження.

Аналіз виразів потенціальної енергії дозволив зробити ряд висновків [4]:

потенціальна енергія завжди додатна, оскільки в її вирази входять квадрати напружень, деформацій і сил;

потенціальна енергія деформації бруса, викликана групою сил, не дорівнює сумі потенціальних енергій, які виконані кожною із сил окремо. З математичної точки зору це є наслідком того, що потенціальна енергія пропорційна квадрату напруження або сили, а квадрат суми не дорівнює сумі квадратів доданків;

кількість (величина) потенціальної енергії не залежить від послідовності прикладання навантаження, так як кінцеві значення напружень і сил, які входять в її вираз, не залежать від цієї послідовності.

Враховуючи вказані висновки, особливо другий, стає очевидною необхідність визначення питомої потенціальної енергії деформації з урахуванням наведеної невідповідності. В зв'язку з цим запропоновані два варіанти розрахунку для визначення питомої потенціальної енергії деформації. У першому варіанті передбачене визначення цієї енергії безпосередньо за формулою, а в другому – як суму її складових.

При розрахунку питомої потенціальної енергії деформації та її складових використані формули, в яких головні напруження визначені за рівняннями С. Г. Лехницького [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  $g$  – прискорення вільного падіння;

$H$  – глибина виробки;

$\rho_n, \rho_p$  – густина породи й рідини відповідно.

Для випадку лінійного напруженого стану вирази питомих потенціальних енергій можна отримати із формул (2), (3) і (4), прийнявши  $\sigma_1 = \sigma$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ :

$$[u] = \frac{\sigma^2}{2E}, \quad (8)$$

$$[u_{об}] = \frac{1 - 2\mu}{6E} \sigma^2, \quad (9)$$

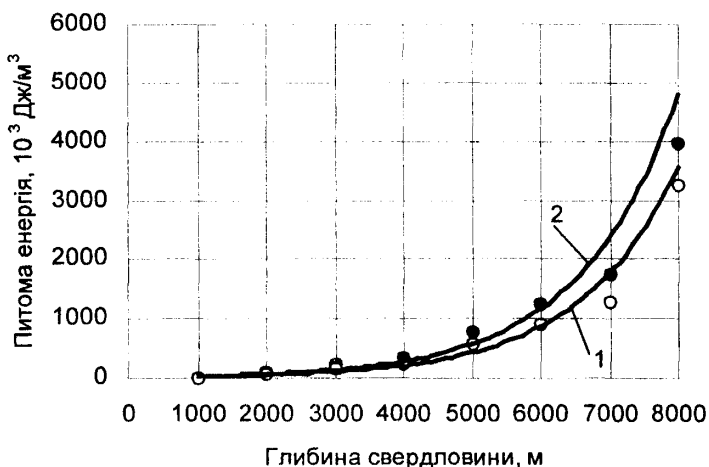
$$[u_{\phi}] = \frac{1 + \mu}{3E} \sigma^2, \quad (10)$$

де  $\sigma$  – допустиме значення нормального напруження, прийняте для лінійного розтягу або стиснення.

Розглянемо характер зміни потенціальної енергії гірського масиву при бурінні глибоких свердловин із врахуванням методики її розрахунку. На основі розрахунків питомої потенціальної енергії деформації та її складових для основних типів порід розрізу надглибокої свердловини СГ-3 побудований графік залежності питомої потенціальної енергії деформації від глибини свердловини (рис. 1). Характер зміни її вказує на те, що в інтервалі глибин 1000–4000 м вплив методики



розрахунку потенціальної енергії на розбіжність її визначення не відмічений. З глибини 4000 м і вище він стає суттєво помітним.



- 1 – питома потенціальна енергія деформації, визначена за першим варіантом розрахунку;
- 2 – питома потенціальна енергія деформації, визначена за другим варіантом розрахунку

**Рисунок 1. Залежність питомої потенціальної енергії деформації від глибини свердловини**

Згідно першої енергетичної теорії міцності — теорії Бельтрама [6], 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:

$$u \leq [u]. \tag{11}$$

Підставляючи у формулу (11) значення  $u$  і  $[u]$  та їхніх складових ( $u_{об}$ ,  $u_{\phi}$ ) із наведених вище формул отримаємо:

$$u = \frac{1}{2E} g^2 H^2 [\rho_n^2 (5 - 4\mu) - 4 \rho_n \rho_p (1 + \mu) + 2 \rho_p^2 (1 + \mu)] \leq \frac{\sigma^2}{2E}, \tag{12}$$

$$u_{об} = \frac{1 - 2\mu}{6E} g^2 H^2 (9 \rho_n^2 + 12 \rho_n \rho_p + 4 \rho_p^2) \leq \frac{1 - 2\mu}{6E} \sigma^2, \tag{13}$$

$$u_{\phi} = \frac{1 + \mu}{3E} g^2 H^2 (3 \rho_n^2 - 6 \rho_n \rho_p + 3 \rho_p^2) \leq \frac{1 + \mu}{3E} \sigma^2. \tag{14}$$

Вирази (12), (13) і (14) є умовою міцності породи при дії питомої потенціальної енергії деформації та її складових.

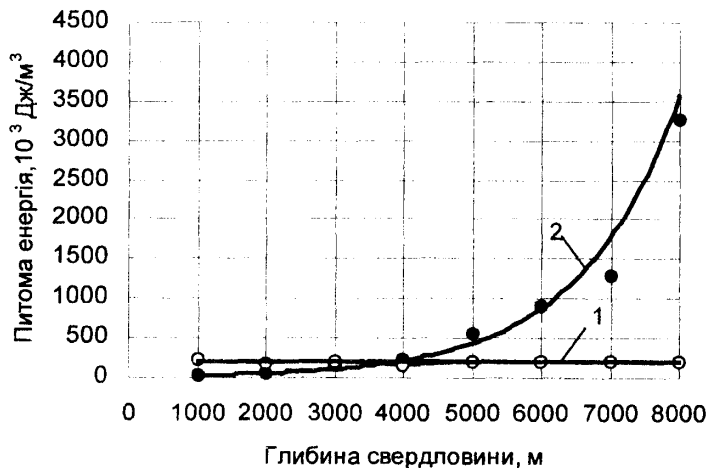
Умову міцності за енергетичною теорією формозміни (14) називають четвертою теорією міцності або теорією Губера–Мізеса–Генкі. Досліди свідчать, що найкращі результати одержують, якщо в якості критерію міцності розглядають не всю енергію деформації, а лише ту частину, яка пов'язана зі зміною форми тіла.



Кожна із вказаних теорій міцності придатна при певних умовах для конкретних гірських порід. Правильний вибір її суттєво залежить від практичного досвіду виконавця відповідних досліджень.

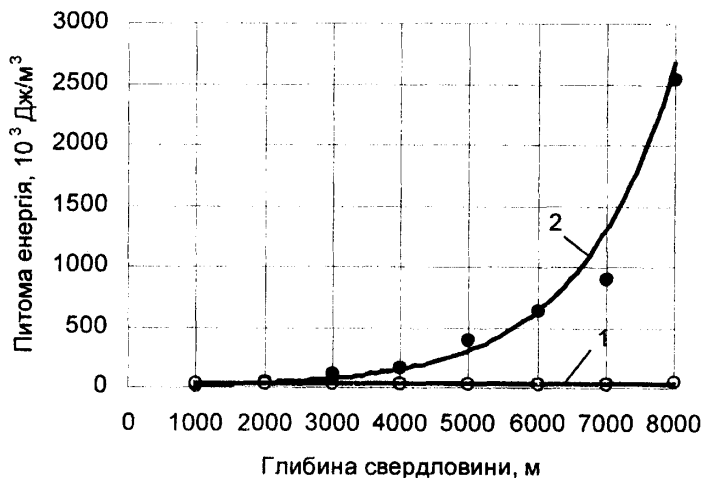
З переходом гірничих робіт на великі глибини геомеханічні процеси в масивах порід зазнають якісних і кількісних змін. При дії статичних і динамічних навантажень гірські породи довкола виробок і свердловин переходять граничний стан і руйнуються в умовах неоднорідних об'ємних напружених станів. Неоднорідність будови гірських порід – причина специфічної їх поведінки при деформуванні і руйнуванні в умовах складного напруженого стану і зміни швидкості навантаження. Найбільш суттєвими особливостями в поведінці гірських порід є ефект збільшення об'єму в процесі незворотної деформації. В цьому і полягає принципова відмінність їх від пластичної деформації металів, у яких відсутнє явище росту об'єму. Цей факт пояснює невикористання питомої потенціальної енергії зміни об'єму при розрахунках металів на міцність.

Для перевірки доцільності використання умови міцності гірських порід на основі питомої енергії деформації чи питомої енергії зміни об'єму проведені відповідні розрахунки. Вони полягають у визначенні початку саморуйнування породи на вибої свердловини на базі рівнянь (12) і (13). За даними, розрахованими для свердловини СГ-3 [7] побудовано графіки (рис. 2 і рис. 3), на яких показана залежність саморуйнування породи на вибої свердловини від співвідношення питомих потенціальних енергій деформації та зміни об'єму при лінійному й об'ємному напружених її станах.



- 1 – питома потенціальна енергія деформації при лінійному напруженому стані породи;  
2 – питома потенціальна енергія деформації при об'ємному напруженому стані породи

**Рисунок 2.** Залежність початку саморуйнування гірської породи на вибої свердловини від співвідношення питомих потенціальних енергій деформації при лінійному і об'ємному напружених станах породи



- 1 – питома потенціальна енергія зміни об'єму при лінійному напруженому стані породи;  
2 – питома потенціальна енергія зміни об'єму при об'ємному напруженому стані породи

**Рисунок 3.** Залежність початку саморуйнування гірської породи на вибої свердловини від співвідношення питомих потенціальних енергій зміни об'єму при лінійному та об'ємному напружених станах породи

При використанні питомої потенціальної енергії деформації початок саморуйнування гірської породи на вибої відбувається на глибині 4000 м, а при використанні питомої енергії зміни об'єму – на глибині 2000 м.

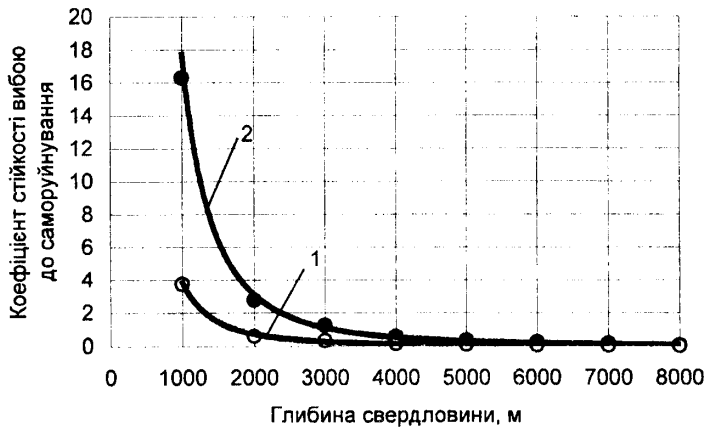
Прогнозування проявів гірського тиску загалом пов'язане з вирішенням проблем стійкості виробки в процесі її проведення та експлуатації. Стійкість її можна розглядати як здатність матеріальної системи зберігати свій стан в умовах збурюючих чинників технологічної дії. Кількісну оцінку стійкості ( $K_{cm}$ ) з урахуванням енергії гірського масиву можна визначити з формул (12), (13) і (14).

$$K_{cm} = \frac{[u]}{u} = \frac{\sigma^2}{g^2 H^2} \times \frac{1}{[\rho_n^2(5 - 4\mu) - 4\rho_n\rho_p(1 + \mu) + 2\rho_p^2(1 + \mu)]}, \quad (15)$$

$$K'_{cm} = \frac{[u_{об}]}{u_{об}} = \frac{\sigma^2}{g^2 H^2 (9\rho_n^2 + 12\rho_n\rho_p + 4\rho_p^2)}, \quad (16)$$

$$K''_{cm} = \frac{[u_{\phi}]}{u_{\phi}} = \frac{\sigma^2}{g^2 H^2 (3\rho_n^2 - 6\rho_n\rho_p + 3\rho_p^2)}. \quad (17)$$

За формулами (15) і (16) зроблені розрахунки для свердловини СГ-3, результати яких подані у вигляді графіка (рис. 4). на ньому представлений характер зміни коефіцієнта стійкості породи вибою до саморуйнування від глибини свердловини. Із графіка видно, що найбільш прийнятними є дані, отримані за формулою (16). Таким чином, для умов глибокого буріння при розрахунках стійкості вибою свердловини до саморуйнування слід брати рівняння, в яких використовується питома потенціальна енергія зміни об'єму.

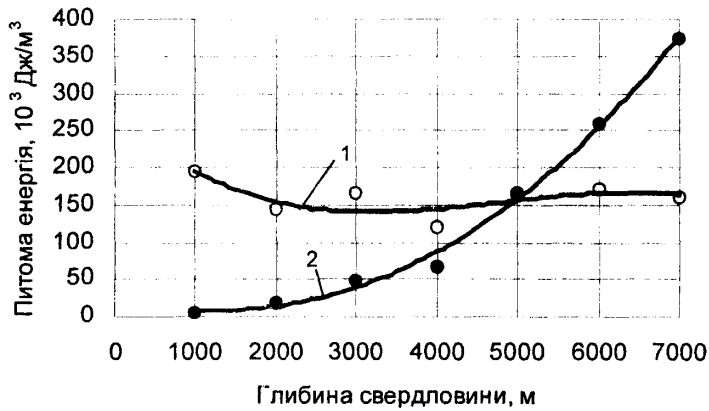


1 – при дії питомої потенціальної енергії зміни об'єму;  
2 – при дії питомої потенціальної енергії деформації

Рисунок 4. Залежність коефіцієнта стійкості вибою свердловини до саморуйнування від глибини свердловини

Для підтвердження результатів досліджень при використанні теорії постійної пружної енергії формозміни зроблені відповідні розрахунки за формулою (14). Вони представлені графіком (рис. 5) залежності початку дискування ядра від співвідношення питомих потенціальних енергій його формозміни при лінійному та об'ємному станах. Як видно з графічної залежності дискування ядра розпочалось на глибині біля 5000 м, що підтверджується промисловим матеріалом [7].

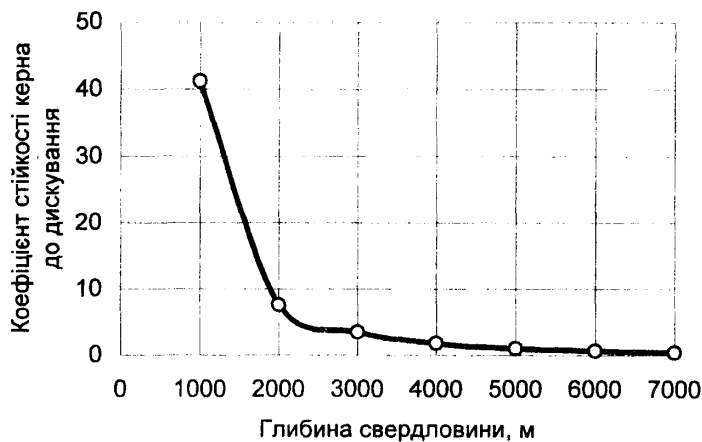




1 – питома потенціальна енергія формозміни при лінійному напруженому стані керна;  
 2 – питома потенціальна енергія формозміни при об'ємному напруженому стані керна

**Рисунок 5.** Залежність початку дискування керна від співвідношення питомих потенціальних енергій його формозміни при лінійному та об'ємному напружених станах

За формулою (17) проведені розрахунки, результати яких подані у вигляді графіка (рис. 6). отримана залежність зміни коефіцієнта стійкості керна до дискування в залежності від глибини його відбору підтверджується дослідженнями в роботі [8].



**Рисунок 6.** Залежність коефіцієнта стійкості керна до дискування від глибини його відбору

Для оцінки питомої роботи саморуйнування гірської породи можна використати залежності (8), (9) і (10). Якщо породи володіють пластичною деформацією, то до енергії пружної деформації  $u$  необхідно додати витрати енергії на пластичне деформування  $u_{пл}$ :

$$u' = u + u_{пл}. \tag{18}$$

Для одноосьового стиснення вираз (18) можна записати так [9]:

$$[u'] = \sigma_{ст}^2 \left( \frac{1}{E_{деф}} - \frac{1}{2E} \right), \tag{19}$$

де  $\sigma_{ст}$  – границя міцності при стисненні;

$E_{деф}$  – модуль повної деформації.



Модуль повної деформації отриманий із формули для оцінки пластичності порід [9]:

$$\kappa_{пл} = \frac{E}{E_{деф}}, \quad (20)$$

де  $\kappa_{пл}$  – коефіцієнт пластичності породи.

Підставляючи параметр  $E_{деф}$  із формули (20) у формулу (19) отримаємо:

$$[u'] = \sigma_{см}^2 \frac{2\kappa_{пл} - 1}{2E}. \quad (21)$$

При використанні складових питомої потенціальної енергії деформації ( $u_{об}$  і  $u_{ф}$ ) питома робота саморуйнування гірської породи може визначатись за формулами:

$$[u'_{об}] = \sigma_{см}^2 \frac{(1 - 2\mu)(2\kappa_{пл} - 1)}{6E}, \quad (22)$$

$$[u'_{ф}] = \sigma_{см}^2 \frac{(1 + \mu)(2\kappa_{пл} - 1)}{3E}. \quad (23)$$

Якщо коефіцієнт пластичності породи  $\kappa_{пл} = 2$ , то

$$[u'] = \frac{3\sigma_{см}^2}{2E},$$

тобто питома робота саморуйнування пластичної породи перевищить роботу саморуйнування крихкої в три рази (при постійній міцності й постійних пружних властивостях порід).

Отже, підвищення межі міцності порід не завжди утруднює її розробку. Високоміцні, але крихкі породи значно легше піддаються динамічному руйнуванню (наприклад, висаджуванню), аніж більш слабкі, але високопластичні. залежності (21), (22) і (23) можуть застосовуватися для оцінки енергоємності руйнування порід різними способами.

Розглядаючи гірський масив як систему з великим запасом накопиченої енергії відкрились нові можливості у використанні енергетичних теорій міцності при оцінюванні напруженого стану гірського масиву, стійкості його порід та питомої роботи їх саморуйнування.

#### Література:

1. Управление состоянием горного массива. / Зорин А. Н., Колесников В. Г., Минав С. П., Прусова А. А., Ковтун Е. Д. / – К.: Наук. думка, 1986. – 212 с.
2. 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.
3. Писаренко Г. С., Агарев В. А., Квитка А. Л. и др. Соппротивление материалов. – К.: Вища школа. Главное изд-во, 1986. – 775 с.
4. Дарков А. В., Шпиро Г. С. Соппротивление материалов. – Изд. 3-е. – М.: Высш. шк., 1969. – 734 с.
5. Барановський Е. М. Енергетична оцінка стану гірського масиву при бурінні глибоких свердловин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. Випуск 1 (14). – Івано-Франківськ, 2005. – С. 34-39.
6. Степин П. А. Соппротивление материалов. – Изд. 8-е. – М.: Высш. шк., 1988. — 367 с.
7. Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины. – М.: Недра, 1984. – 490 с.
8. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований. – М.: МФ “Технонефтегаз”, 1998. – 260 с.
9. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. – Изд. 3-е. – М.: Недра, 1978. – 390 с.

