

УДК 622.24.051

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ФРАКТАЛІВ ДО ПИТАНЬ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Т.О.Пригоровська

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422)

e-mail: spring@nung.edu.ua

Рассмотрены основные закономерности процесса разрушения пород резанием с фрактальных позиций.

In the article there has been analysed the main features of rock destruction by cutting in order of their fractal nature.

Процес руйнування породи різання різця-ми доліт з АТП характеризується рядом взаємопов'язаних параметрів, що відображають різні фізичні явища процесу руйнування породи. Сукупність цих параметрів прийнято виражати загальним терміном “буримість породи”, під яким мається на увазі властивість гірської породи піддаватися руйнуванню інструментами заданої конструкції при певних параметрах буріння. Фактично, не існує чітких характеристик, що відповідають не зовсім зрозумілому, такому, що не має точного формулювання, але зрозумілому буровикам терміну “буримість” породи [2]. Їх можна висловити за допомогою різних критеріїв, причому порода може мати добру “буримість” за одним критерієм і погану за іншим критерієм при виконанні різних технологічних операцій та використанні різних інструментів. В роботі [2] запропонований критерій ефективності для руйнування породи шарошковими долотами, який характеризує породу такою ж мірою як і зубець, і був названий “критерієм ефективності” зубця стосовно даної породи:

$$K = \frac{V(Z)P_{ш}}{\int_0^Z R(Z)dz}$$

де: V – об'єм зруйнованої породи; $P_{ш}$ – твердість породи за штампом; $R(Z)$ – сила опору породи проникненню зубця; Z – заглиблення зубця (глибина проникнення) в породу.

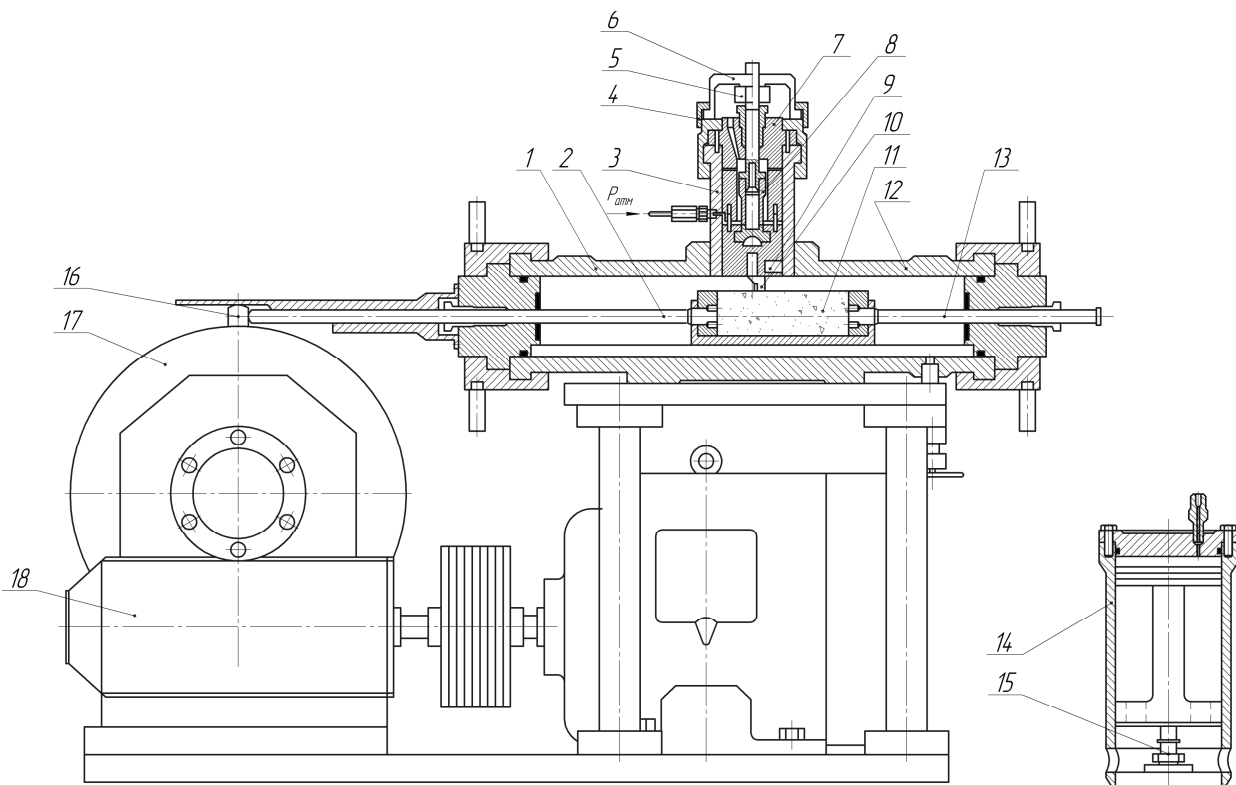
Аналогічно можна використати цей критерій ефективності щодо руйнування породи і алмазним різцем. Фізичний зміст “критерію ефективності” зубця зводиться до оцінки об'єму зруйнованої породи на одиницю затраченої роботи. Введення в критерій твердості породи за штампом дає можливість робити невеликі поправки, що враховують дисперсію властивостей породи у різних взірцях. При визначенні величини “ K ” за результатами серії експериментів та випробувань, вона обчислюється окремо для кожного взірця з урахуванням властивості йому твердості за штампом.

З одного боку, в даному критерії бере участь значення інтегральної величини сили опору породи різанню, яке нерозривно пов'язане з поняттям “буримість”. З другого боку, традиційно поняття здатності до певного виду

обробки (наприклад, різанням стосовно порід) пов'язують зі структурою та механічними властивостями матеріалів загалом і гірських порід зокрема. В даній роботі ставиться за мету проаналізувати, наскільки пов'язані сили опору породи (або реакції породи) з її структурою, тобто представити величину реакції породи як відображення структурних неоднорідностей гірських порід.

Ідея можливого взаємозв'язку між цими параметрами виникла після аналізу осцилограм, які були отримані в ВНДІБТ (м. Москва) Драганчук О.Т. при проведенні серії експериментів стосовно визначення реакції опору породи руйнуванню [3]. Дані залежності отримані при проведенні експериментів щодо дослідження лінійної взаємодії різців її зразками гірських порід при наявності тиску бурового розчину на стенді КИПР-Р (рисунок 1), розробленому у ВНДІБТ (м. Москва). Даний стенд був використаний в режимі сталого навантаження на різець. Це дало можливість дослідити всі стадії природно сформованої борозни заглиблення, включаючи початкову ділянку вривання та ділянку стабілізації.

Методика роботи на даному стенді полягала в такому: зразки гірської породи в формі паралелепіпеда виготовлялися з керну діаметром 90 на відрізаному алмазному верстаті. Розміри зразків 60×60×150 мм, поверхня зразків плоска і гладка. Для співставлення результатів при повторних експериментах проводився контроль зразків за допомогою визначення твердості за штампом на кожній стороні. Однотипні повторні експерименти проводяться на сторонах взірців, на яких середнє квадратичне відхилення не більше ±0,15%. Пластини АТП для підготовки до випробувань припаювалися до державки різця таким чином, щоб передні кути їх відповідали матриці планування експерименту. Початкове взаємне положення різця і зразка породи в стенді вибиралося так, щоб ріжуча кромка різця і зразка породи контактувала з поверхнею породи на відстані 15 мм від краю зразка. Після того, як камера стенда підготовлена до роботи, в ній створюється заданий тиск середовища. Експеримент виконується включенням протягуючого пристрою, в результаті чого зразок переміщується з заданою швидкістю відносно різця. В процесі руху різець під



1 – горизонтальний корпус камери; 2 – силовий шток; 3 – вертикальний патрубок камери; 4,5 – гайки натискні; 6 – скоба; 8, 9 – тензометричні динамометри; 10 – різець; 11 – досліджуваний зразок породи; 12 – платформа; 14 – пневматичний циліндр навантаження; 15 – електродвигун; 16 – черв’ячний редуктор; 17 – маховик; 18 – штовхач

Рисунок 1 — Стенд КИПР та його навантажуючий пристрій

Таблиця 1 — Змінні фактори

Рівні	Фактори			
	V, м/с	δ, мм	α, град	G _N , кН
Основний	2,25	1,25	15	2,0
Інтервал зміни	1,75	1,25	10	1,0
Верхній	4	2,5	25	3,0
Нижній	0,5	0	5	1,0

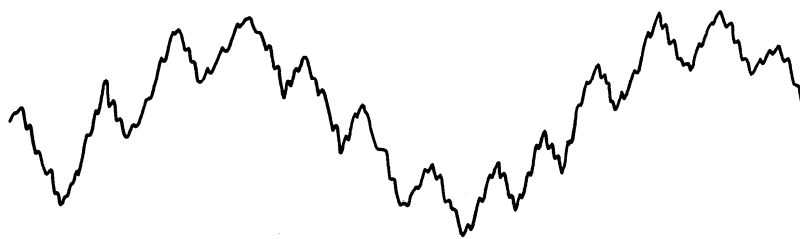
дією нормального навантаження вривався в породу, формуючи борозну руйнування.

Обробка результатів експерименту велася на осцилограмах у відповідності до масштабів, які визначені при таруванні датчиків. На рисунках 2, 3 наведені зразки осцилограм, на кожній з яких записані залежності $G_n(t)$ та $G_t(t)$. Вони були перебудовані в аналогічні залежності $G_n(l)$ та $G_t(l)$, де l – довжина різця. Незважаючи на значну різницю в абсолютних значеннях сил, що вимірюються, загальний характер цих кривих є аналогічним. В усіх випадках $G_n(t)$ зберігає в середньому задану величину; $G_t(t)$ різко зростає в початковий момент різання, а відтак незначно зростає в міру заглиблення різців. Характерно, що обидві сили мають різко виражений коливний характер. Це пов’язано з механізмом руйнування порід. Залежно від швидкості руху різця зміна тангенційної сили

буде відбуватися або до нуля, або до певної мінімальної величини. Аналогічне, хоч і менш виражене коливання, повинно відбуватися і відносно нормальної сили. Тільки в даному випадку верхнім обмеженням є задана величина $G_n(t)$.

Розглянувши вплив нормального навантаження, конструктивних та кінематичних параметрів на динамічні показники процесу руйнування, було встановлено, що залежності $G_n(t)$ та $G_t(t)$ мають виражений коливний характер. При цьому можна спостерігати дві частоти коливань, які є накладені одне на одне: високочастотні коливання з малою амплітудою і коливання зі значною амплітудою і на порядок меншою частотою пов’язані безпосередньо з процесом руйнування.

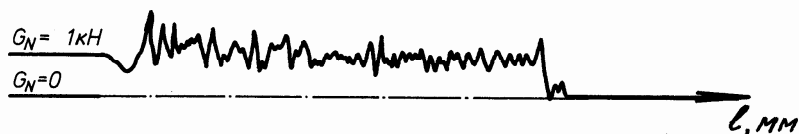
Аналізуючи дані осцилограми, бачимо, що вони показують нерівномірність значень сили



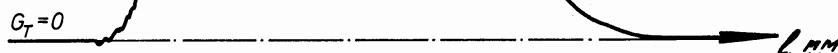
$\alpha = -25^\circ, V = 0,5 \text{ м/с}, G_N = 3 \text{ кН}$

Рисунок 2 — Осцилограма, що відображає три типи коливань нормального навантаження на різець

$\alpha = -25^\circ, V = 4 \text{ м/с}$

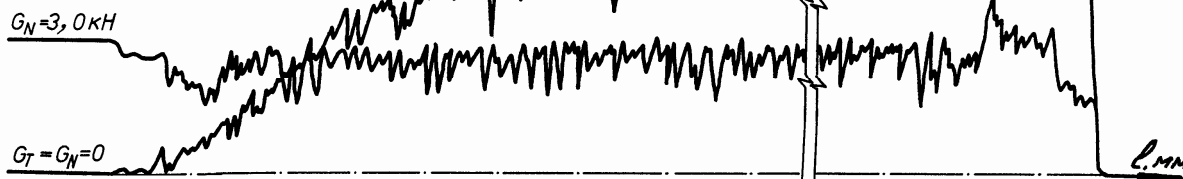


а)



б)

$\alpha = -5^\circ, V = 0,5 \text{ м/с}$



а - $\alpha = -25^\circ, V = 4 \text{ м/с}$; б - $\alpha = -5^\circ, V = 0,5 \text{ м/с}$

Рисунок 3 — Типові осцилограми компонент навантаження на різці

реакції породи, що діє на різець. При цьому можна говорити, що значення величини реакції різко змінюється в діапазоні до 1 кН, крім того, можна виділити певну періодичність зміни. Таке явище можна пояснити фактором неоднорідності породи, а саме тим, що процес руйнування відбувається стрибкоподібно, переважно по границях зерен породи. При цьому діапазон зміни від найбільшого до найменшого значень реакції є характерним для певної породи.

Аналізуючи дані осцилограми, виникла думка щодо фрактальної природи сили різання породи, на величину якої найперше впливають властивості породи. Однією з основних властивостей фракталів є самоподібність. Визначення фракталу, яке було дане Мандельбортом (3), означає, що фракталом є структура, яка складається з частин, які є дещо подібними до цілого. Для математичного опису фрактальності величини сили реакції породи можна використати, наприклад, множину Жюліа, загальний вигляд якої представлено на рисунку 3, математичний

закон якої має вигляд $f(z) = a(z^2 + b^2)$, при цьому на рисунку колір кожної точки залежить від кількості ітерацій комплексної функції, яка може бути виконана, поки точка z не вийде за межі кола радіуса r ($|z| > r$), де $z = x + iy$ – комплексне число, що відповідає точці (x, y) . В даному випадку важливим є не так визначення математичного закону зміни величини сили різання (хоча це має теж суттєве значення), як сам факт встановлення фрактальної природи руйнування порід. Слід зазначити, що такий підхід до питань руйнування матеріалів не є новим, оскільки подібні роботи щодо встановлення фрактальної природи інших матеріалів (наприклад, металів) та методи їх розрахунку представлені в науковій літературі [5, 6].

Крім того, аналізуючи наведені вище осцилограми, можна визначити інтегральний показник сили опору породи, тобто визначити критерій ефективності руйнування. Більше того, простий з математичної точки зору опис множини Жюліа дає змогу не використовувати

складні числові методи для отримання інтегрального значення сили опору породи. Власне, питання зміни сили опору породи є досить складним, пов'язаним, з одного боку, з структурою порід, а, з другого, є таким, що суттєво впливає на процеси роботи інструменту загалом. Якщо додати всі сили, що діють на всі різці долота, то отримаємо результуючі значення сили та момент, що діють на долото в цілому, проекції яких на вісь Z являть собою бічні сили, що діють на інструмент, та відповідні згинні моменти. Власне, якщо векторно просумувати сили, що діють на різці долота, то отримаємо результуючу силу та момент, які діють на долото в цілому, проекції яких на центральну вісь долота Z являють собою відповідно навантаження на різці та інструмент, долото та крутний момент. Проекції на інші осі являють собою бічні сили, що діють на нього, і відповідні згинні моменти. В ідеалі ці сили рівні нулю. Якщо ж вони є, то свердловина буриться в напрямку, відмінному від заданого проектом, долото при цьому обертається не тільки відносно своєї осі, а свердловина має діаметр, що перевищує заданий. Це явище викликано, найперше, несталістю та нестабільністю сил, що діють на різці долота, що, в свою чергу, викликано неоднорідністю розбурюваних порід [3, 7]. Крім того, вібрація генерується не тільки внаслідок дисбалансу сил на долоті, а й внаслідок масового дисбалансу, тертя об стінки свердловини під час буріння та калібрування, коливання всієї бурильної колони.

Повертаючись до поняття “буримості”, спочатку визначимось з поняттям “гірська порода”. Гірські породи являють собою неоднорідне, багатоконпонентне середовище, яке 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 [8]. Про однорідність властивостей гірської породи можна говорити лише в граничному малому її об'ємі, так щоб $\lim \Delta V \rightarrow 0$. Тому доцільно при побудові моделей руйнування гірських порід враховувати неоднорідність їх структури. Структура гірських порід порівняно з іншими матеріалами (наприклад, металами) володіє значно більшою неоднорідністю. Тому процес пластичного деформування гірських порід протікає досить складно, оскільки він пов'язаний з мікро- та макрон неоднорідністю їх будови та різного роду дефектами кристалічної решітки [9]. Ця обставина впливає на процес деформування гірських порід. Під терміном “геологічна неоднорідність” розуміється зміна значень геолого-фізичних ознак на множині всіх елементарних неумовних та умовних геологічних тіл, що виділяється в досліджуваному зразку геологічного простору за тими базисними ознаками і на тому ієрархічному рівні, який відповідає меті дослідження [10].

Ідея про розподіл мікродфектів була використана в багатьох статистичних теоріях міцності і, зокрема, в теорії крихкої міцності Я.І.Френзеля та Т.А.Конторової, а також теорії масштабного фактора гірських порід М.М.Протодьяконова. Статистична теорія, що була розвинута В.Т.Бреді (1970 рік), розглядає поведінку матеріалів, що мають тріщини з різною орієнтацією стосовно осей головних напружень.

При моделюванні гірських порід вони розглядаються у вигляді сукупності структурних елементів (зерен), кожен з яких володіє однорідними реологічними властивостями. Простір між структурними елементами заповнено ізотропним однорідним матеріалом. Проте для спрощення побудови моделі породи віднесемо їх до категорії суцільних середовищ, властивості яких є досить специфічними – їх характеризує складний мінералогічний склад зерен, що з'єднані між собою, пористість і ряд інших фізико-механічних властивостей [11]. При побудові моделі руйнування гірської породи вважатимемо, що властивості гірської породи є однаковими у всіх напрямках, тобто середовище є ізотропним та неоднорідним. Під ізотропним неоднорідністю мається на увазі ізотропне тіло, в якому при переході від точки до точки змінюються модулі пружності, коефіцієнт Пуассона, але, якщо в довільній точці властивості є однаковими у всіх напрямках.

Для спрощення побудови моделі використаємо припущення, що неоднорідності розміщені у формі множини Жюліа (аналогічно, як і для сили реакції породи).

Проаналізуємо, як впливає неоднорідність макроструктури на процес руйнування породи. Розглянемо неоднорідну площину, яка є в стиснутому стані (в реальних умовах на масив гірських порід діють сили ваги, сили порового, гідростатичного тиску і т.д.). Руйнування гірської породи, поширення тріщини є процесом імовірнісним [12]. При цьому, якщо в деякій точці $\sigma < \sigma_n$ (σ_n – граничне напруження), то руйнування в цій точці неможливе, тобто, в загальному випадку, тріщина під дією навантаження буде проходити саме по місцях дислокацій. Функція, яка описує розподіл дефектів в породі, може бути використана для опису пустот, що виникають в породі. Міцність елементарного об'єму породи залежить від співвідношення менш міцних ділянок цього об'єму, межа міцності яких становить σ до загального числа ділянок в даному об'ємі. Тоді дійсне напруження на аналізованій ділянці становить

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1 + P(\sigma)}$$

Згідно з [13] функція густини ймовірності інтенсивності напружень становить

$$P(\sigma_i) = 2\lambda[\sigma] \sqrt{\frac{1+\mu}{6E}} \cdot e^{\left(-\lambda\sigma_i \cdot \frac{1+\mu}{6E}\right)},$$

де: σ_i – інтенсивність напружень в точці; μ – коефіцієнт Пуассона, E -модуль Юнга породи;

λ – величина обернена середній питомій енергії деформації в деформованій області масиву. Дана формула дає змогу визначити імовірнісне значення величини напружень в довільній точці $A(x_i, y_i)$, проте не враховує масштабного фактора і не дає змоги оцінити міцність в іншій точці масиву, наприклад, в точці $A(x_{i+1}, y_{i+1})$. Тому доцільно ввести масштабний фактор і прийняти, що дислокації розміщені в одиничному зразку породи за деяким законом. Тобто, наведена вище формула набуває вигляду

$$P(\sigma_i) \cdot M(\rho, \theta) = 2\lambda[\sigma] \sqrt{\frac{1+\mu}{6E}} \cdot e^{\left(-\lambda\sigma_i \frac{1+\mu}{6E}\right)}, \quad (1)$$

де $M(\rho, \theta)$ – коефіцієнт (характеристика) розподілу дислокацій, який вказує, чи є неоднорідність в точці з певною координатою. При цьому, коефіцієнт $M(\rho, \theta)$ може приймати такі значення:

$$M(\rho, \theta) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \rho = k \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases}$$

де k – коефіцієнт пористості породи.

Методики, описані в [5, 6], містять чимало емпіричних коефіцієнтів, що вимагають додаткових досліджень властивостей порід. Всі величини, що входять у формулу (1), є визначеними попередньо для кожної породи окремо.

В початковий момент часу середовище деформується в межах закону Гука, тобто пластичні деформації відсутні. При зростанні інтенсивності дотичних напружень в пластичних елементах з'являються пластичні деформації, розвиток яких призводить до накопичення мікронапружень, що екранують зовнішні зусилля, і таких, що запобігають подальшому розвитку пластичної деформації. При подальшому зростанні мікронапруження в пластичних елементах настільки зростає, що це призводить до руйнування зв'язків між зернами, тобто утворення тріщин. Істотну роль при виникненні та розвитку мікротріщин відіграють саме різного роду дислокації, оскільки мікротріщина може розвинутися на межі включення або саме з нього. Дані тріщини є нерегулярними, нерівномірними, усіляких розмірів, тобто їхні конфігурації є фрактальними кривими з дробовими розмірностями (D), при цьому величина $1 < D < 2$ є тим більшою, чим більш порізаним є берег тріщини. Проте, застосовуючи для моделювання тріщини фрактальної кривої, необхідно пам'ятати, що така поверхня з математичної точки зору є безмежною, а фрактальна крива є нескінченно звивистою, а ці характеристики є скінченими для тріщини. Тому, фрактальна модель тріщини є застосовною для масштабів r , $l_0 \ll r \ll L_0$, де l_0 – характеристика мікроструктури середовища, L_0 – геометричний розмір середовища.

Нехай тріщина є стохастичним фракталом певної розмірності D (приймемо, що D умовно дорівнює величині зерна мікроструктури) і поширюється вздовж осі OX , відповідно напруження σ перпендикулярні до осі OY . Поточний розмір тріщини уздовж осі OX становить R_1 , а середній розмір вздовж осі OY $R_2 \ll R_1$. Вважа-

ємо поверхні тріщини гладкими, а її фронт – фрактальною кривою. З точки зору фізики критерієм руйнування твердого тіла (до якого відносимо і породи) може бути лише енергетична характеристика. За критерієм Гріффітса, зі збільшенням розміру тріщини на ΔR пружна енергія, що вивільнюється, дорівнює збільшенню поверхневої енергії розрізу, тобто:

$$R^{2-D} \cong \frac{2\gamma DE}{\sigma^2}, \quad \text{де } E - \text{модуль пружності мате-}$$

ріалу, γ – питома поверхнева енергія, приймаємо $\gamma=1$ [6]. При цьому, маючи орієнтовну величину зерна породи, маємо можливість моделювати процес руйнування порід, визначати параметри даного процесу.

Література

1. Хайн Норман Дж. Геология, разведка, бурение и добыча нефти. Серия: для профессионалов и неспециалистов. – М.: Олимп-бизнес, 2003.
2. Драганчук О.Т. Научно-методологические основы конструирования озброення шарошковых долот: Дис... д-ра техн. наук: 05.15.12 – Машини нафтової і газової промисловості. – Івано-Франківськ, 1999.
3. Драганчук О.Т. Выбор рациональных конструктивных параметров долот, оснащённых алмазотвердосплавными пластинами: Дисс... канд. техн. наук: 05.15.10 – Бурение нефтяных и газовых скважин. – М., 1990.
4. Application of fractals and chaos. 1993, Springer-Verlag, Berlin.
5. Клименко С.А., Мельничук Ю.А. Фрактальный подход к обработке резанием материалов и изделий // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин: Зб. наук. праць (серія «Г») – К.: НАН України, ІНМ ім. В.М.Бакуля, 2001. – 179 с.
6. Усов В.Н., Шкатулок Н.М. Фрактальная природа крихких зламів металу // Физико-химическая механика материалов. – 2005. – № 1. – Т. 24. – С.58-61
7. [http://www.pgpi.ru/product.phtml?print=1&id=2925&cat_id=5583].
8. [Glowka D.A. Use of single cutter data of PDC bit design part 2 – Development and use of PDCWEAR Computer Code // J.Petrol Technology – 1980 – v.41 № 8 – p. 850-859].
9. Ставрогин А.Н, Протосеня М.К. Механика деформирования и разрушения горных пород. – М.: Недра, 1992.
10. Дементьев Л.Д. Математические методы и ЭВМ в нефтегазовой геологии: Учебное пособие для вузов. – М.: Недра, 1983. – 189 с.
11. Мишлаевский Л.Л. Совершенствование конструкции режущих буровых долот на основе моделирования процесса бурения: Автореф. дисс... канд. техн. наук: 05.15.11 / АН СССР. Институт горного дела Севера. – Якутск, 1990. – 17 с.