

УДК 622.1/2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ПИТОМОЮ ПОВЕРХНЕВОЮ ЕНЕРГІЄЮ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
вул. Борщагівська, 115, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: Oltr_1@ukr.net, inna_hnipel@ukr.net

Представлено математичну модель управління питомою поверхневою енергією при руйнуванні гірських порід, яка відрізняється від відомих тим, що дозволяє врахувати у функціональному вигляді технологічні та фізико-механічні показники руйнування гірських порід, їх молекулярні параметри. Метою роботи є зниження питомої енергоємності процесу руйнування молекулярних зв'язків кристалічної решітки гірських порід. При проведенні досліджень використано метод математичного моделювання для складання моделі питомої поверхневої енергії породного масиву з урахуванням граничних виробничих умов видобутку корисних копалин, а також аналітичний метод для встановлення залежностей зміни питомої поверхневої енергії від технологічних параметрів процесу руйнування гірських порід: потужності приводу, відстані між ріжучими кромками, швидкості подачі робочого інструменту, швидкості різання. Представлені на обговорення результати досліджень мають перспективу застосування у процесі руйнування гірських порід для зниження питомої енергоємності.

Ключові слова: поверхнева енергія, гірська порода, руйнування.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

О. М. Терентьев, И. Н. Стрельцова

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
ул. Борщаговская, 115, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: Oltr_1@ukr.net, inna_hnipel@ukr.net

Представлена математическая модель управления удельной поверхностной энергией при разрушения горных пород, которая отличается от известных тем, что позволяет учесть в функциональном виде технологические и физико-механические показатели разрушения горных пород, их молекулярные параметры. Целью работы является снижение удельной энергоёмности процесса разрушения молекулярных связей кристаллической решетки горных пород. При проведении исследований использованы метод математического моделирования для составления модели удельной поверхностной энергии породного массива с учетом граничных производственных условий добычи полезных ископаемых, а также аналитический метод для установления зависимостей изменения удельной поверхностной энергии от технологических параметров процесса разрушения горных пород: мощности привода, расстояния между режущими кромками, скорости подачи рабочего инструмента, скорости резания. Представленные на обсуждение результаты исследований имеют перспективу применения в процессе разрушения горных пород для снижения удельной энергоёмности.

Ключевые слова: поверхностная энергия, горная порода, разрушение.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. В теоріях руйнування відсутнє чітке розуміння питомої поверхневої енергії як чинника, що впливає на руйнування твердого тіла. З часів досліджень Алана Гриффітса (20-ті роки ХХ ст.) питома поверхнева енергія розглядається як «константа матеріалу». Але до теперішнього часу немає чіткого цілісного уявлення про питому поверхневу енергію. Згідно експериментальних даних [1], питома поверхнева енергія залежить від оточуючого середовища і впливає на процес руйнування порід. Ці експериментальні факти спростовують припущення, що питома поверхнева енергія є «константою матеріалу». Тому, для зниження енергоємності руйнування гірських порід (ГП) необхідно провести дослідження питомої поверхневої енергії та виявити параметри управління нею.

Аналіз теорій руйнування ГП Кулона–Мора, Треска, Прандтля, Шлейхера, Ірвіна, Орвана, Гриффітса та інших, представлений в [1–3], показав, що вони базуються на механіці суцільних середовищ, не враховують: молекулярну будову ГП, наявність мікро тріщин. Також у залежностях теорій руйнування присутні емпіричні показники, які не завжди чітко враховують реальні процеси для різних технологічних умов. Наявність вказаних недоліків при-

зводить до збільшення енерговитрат і зниження ККД.

Створення нового математичного апарату та його практична апробація дозволила врахувати у функціональному вигляді технологічні та фізико-механічні показники руйнування ГП. Враховано молекулярну будову ГП та наявність мікро тріщин. Обрано основні параметри керування питомою поверхневою енергією (потужності приводу, відстані між ріжучими кромками, швидкості подачі робочого інструменту, швидкості різання) для зменшення енергоємності процесу руйнування ГП. Тому актуальною науковою задачею є управління питомою поверхневою енергією, що визначено у постанові Кабінету Міністрів України від 1 березня 2010 р. № 243 «Про затвердження Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010–2015 роки».

Метою роботи є зниження питомої енергоємності процесу руйнування молекулярних зв'язків кристалічної решітки ГП.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для досягнення мети поставлені наступні завдання:

1. Розробка математичної моделі управління питомою поверхневою енергією ГП із функціональними показниками для умов руйнування вибою одночасно декількома ріжучими інструментами.

2. Встановлення залежностей зміни питомою поверхневою енергією від технологічних параметрів процесу руйнування ГП: потужності приводу, відстані між ріжучими кромками.

3. Урахування молекулярних параметрів ГП і наявність мікротріщин у математичній моделі питомою поверхневою енергією.

При утворенні (збільшенні) поверхні розділення фаз витрачається робота на подолання питомою поверхневою енергією γ . Тому, γ пропорційна роботі утворення одиниці площі поверхні. На основі проаналізованих робіт [1–11], розроблено нову математичну модель поверхневою енергією ГП при руйнуванні. Кількісний аналіз моделі проведено на прикладі кам'яної солі:

$$\gamma = \frac{\sin \theta \cdot \hbar^4 \cdot \omega^4 \cdot \left(\frac{R}{[\sigma]}\right)^2 \cdot N_a^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot F^2 \cdot \sqrt{N_n^2 + N_p^2} \cdot t \cdot v \cdot s \cdot P_k \cdot \eta_n \cdot \arctg\left(\frac{v_n}{v_p}\right) \cdot T}{\eta \cdot \lambda \cdot \pi^3 \cdot d^4 \cdot m^2 \cdot (v_n^2 + v_p^2)^4 \cdot H^2 \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta \cdot j \cdot P_{yn} \cdot \sqrt{M_n^2 + M_p^2}} =$$

$$= \frac{\sin(45) \cdot (6,63 \cdot 10^{-34})^4 \cdot (1,43 \cdot 10^{13})^4 \cdot \left(\frac{15 \cdot 10^6}{600 \cdot 10^6}\right)^2 \cdot (6,62 \cdot 10^{23})^2 \cdot (10^{-5})^2 \cdot 0,01^2 \cdot}{2 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14^3 \cdot (5,56 \cdot 10^{-10})^4 \cdot (9,7 \cdot 10^{-26})^2 \cdot (5+8)^4 \cdot (2,9 \cdot 10^{19})^2 \cdot}$$

$$\cdot \sqrt{(3 \cdot 10^3)^2 + (4 \cdot 10^3)^2} \cdot 0,05 \cdot 306 \cdot 10^6 \cdot 306 \cdot 10^6 \cdot 0,25 \cdot 0,12 \cdot 1400 \cdot 10^6 \cdot 0,7 \cdot \arctg\left(\frac{5}{8}\right) \cdot 2}{\cdot 10^6 \cdot 26,68 \cdot 2165 \cdot 2,82 \cdot 10^{-10} \cdot 0,1 \cdot 120 \cdot 10^6 \cdot 2000} = 0,487 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \quad (1)$$

де θ – кут відбиття дифракційного потоку електронів матеріалу, градус; $\hbar = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ – постійна Планка, Дж·с [12]; ω – власна частота коливань молекули ($v_{\text{NaCl}} = 1,43 \cdot 10^{13}$ [13]), Гц; R – в'язкість руйнування ($R_{\text{NaCl}} = 15 \cdot 10^6$ [2]), Па· $\sqrt{\text{м}}$; $[\sigma]$ – тимчасовий опір руйнуванню ($[\sigma]_{\text{NaCl}} = 600$ [13]), МПа; N_a – число Авогадро ($N_a = 6,62 \cdot 10^{23}$, моль [14]); ε – деформація зсуву ($\varepsilon = 10^{-5}$, в.о. [15]); F – коефіцієнт тертя породи об інструмент ($F = 0,1$ [2]); N_n – потужність приводу подачі, м/с; N_p – потужність приводу різання, м/с; t – ширина ріжучої кромки, м; v – коефіцієнт Пуассона, в. о.; s – глибина руйнування породи, м; P_k – контактна міцність породи, Па; η_n – ККД двигуна, в. о.; v_n – швидкість подачі, м/с; v_p – швидкість різання, м/с; T – кількість ріжучих кромки, шт.; η – порядок дифракційного спектра потоку електронів матеріалу, в. о.; λ – довжина хвилі потоку електронів матеріалу, м; d – діаметр молекули ($d_{\text{NaCl}} = 5,56 \cdot 10^{-10}$ [16]), м; m – маса молекули ($m_{\text{NaCl}} = 9,7 \cdot 10^{-26}$), кг; H – загальне число атомів (іонів) в упакованні кристалів середовища на площі породи 1 м^2 ($H_{\text{NaCl}} = 2,9 \cdot 10^{19}$ [17]), в. о.; Z – кількість молекулярних шарів на поверхні матеріалу ($Z = 10^6$ [18]), шт.; Q – питома енергоємність плавлення, Дж/кг; ρ – густина, кг/м³; δ – товщина поверхневого шару матеріалу, м; j – відстань між ріжучими кромками, м; P_{yn} – навантаження на робочий інструмент, Н; M_n – крутний момент приводу подачі, Н·м; M_p – крутний момент приводу різання, Н·м.

На рис. 1 наведені залежності питомою поверхневою енергією від потужності приводу подачі для різних ГП, а саме для кам'яної солі – 1, кварцу – 2 і корунду – 3.

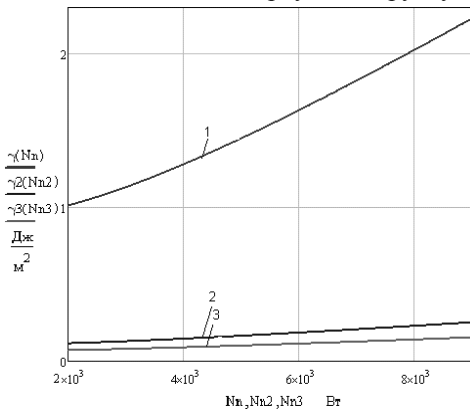


Рисунок 1 – Залежність питомою поверхневою енергією від потужності приводу подачі $\gamma=f(N_n)$: 1 – кам'яна сіль, 2 – кварц, 3 – корунд

Залежність $\gamma=f(N_n)$ є зростаючою функцією. Це пов'язано з тим, що при руйнуванні породи більша частина енергії йде на формування ядра ущільнення. Зі збільшенням потужності приводу збільшується щільність ядра.

При цьому питома поверхнева енергія накопичується у вигляді потенційної енергії в масиві.

Потужність приводу різання N_r має такий самий ваговий коефіцієнт, як і потужність приводу подачі, їх залежності матимуть однаковий характер.

Тому дослідження залежності $\gamma=f(N_n)$ достатньо для оцінки впливу зміни потужності приводу різання на питому поверхневу енергією руйнування.

На рис. 2 наведена залежність питомою поверхневою енергією γ від відстані між ріжучими кромками інструменту j .

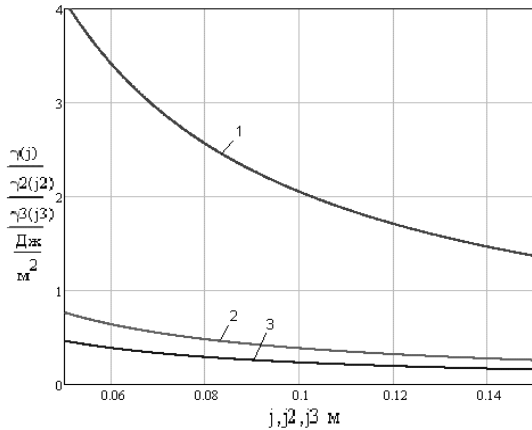


Рисунок 2 – Залежність питомої поверхневої енергії від відстані між ріжучими кромками інструменту $\gamma=f(j)$: 1 – кам’яна сіль (NaCl), 2 – кварц (SiO₂), 3 – корунд (Al₂O₃)

Залежність $\gamma=f(j)$ є гіперболічною спадною функцією. Навколо ріжучої кромки виникає зона пластичних деформацій. Якщо ріжучі кромки знаходяться на відстані, коли зони пластичної деформації перекриваються, то загальна площа руйнування зменшується, оскільки, технологія передбачає руйнування вибою одночасно двома інструментами. Тому, відстань між ріжучими кромками повинна бути не меншою, ніж $(2\sqrt{2} - 2) \cdot t$. Доцільним є підтримання мінімальної відстані між інструментами, при якій зони пластичної деформації не перекриваються. На рис. 3 показана залежність питомої поверхневої енергії від швидкості різання породи $\gamma=f(Vr)$.

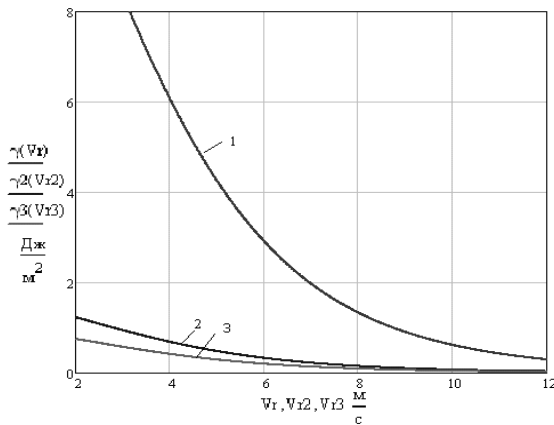


Рисунок 3 – Залежність питомої поверхневої енергії від швидкості різання породи $\gamma=f(Vr)$: 1 – кам’яна сіль (NaCl), 2 – кварц (SiO₂), 3 – корунд (Al₂O₃)

Залежність $\gamma=f(Vr)$ є гіперболічною спадною функцією. Це обумовлено втратами на нагрівання робочого інструменту та на тертя. При збільшенні швидкості різання від 4 до 12 м/с питома поверхнева енергія зменшується за від 6 до 0,3 Дж/м² для кам’яної солі, від 0,69 до 0,03 Дж/м² – для кварцу, від 0,41 до 0,02 Дж/м² – для корунду внаслідок збільшення енергії активації процесу знеміцнення.

На рис. 4 наведена залежність питомої поверхневої

енергії від швидкості подачі робочого інструменту $\gamma=f(Vn)$.

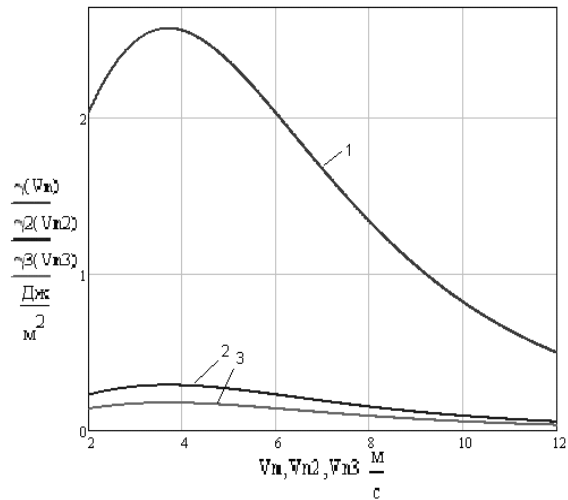


Рисунок 4 – Залежність питомої поверхневої енергії від швидкості подачі робочого інструменту $\gamma=f(Vn)$: 1 – кам’яна сіль (NaCl), 2 – кварц (SiO₂), 3 – корунд (Al₂O₃)

Залежність $\gamma=f(Vn)$ має параболічний характер, досягає піку при швидкості подачі робочого інструменту 3,7 м/с. Від швидкості подачі та різання залежить вектор руйнування. Він визначається кутом між передньою гранню породоруйнуючого інструменту та гірським масивом ф. При побудові $\gamma=f(Vn)$ швидкість різання була прийнята – $Vr=8$ м/с. При співвідношенні швидкості подачі до швидкості різання 1:2, $\phi=25^\circ$, енергоємність руйнування найбільша. Тому, при виборі технологічних параметрів, слід уникати такого співвідношення.

ВИСНОВКИ. 1. Вперше розроблено математичну модель управління питомою поверхневою енергією ГП на молекулярному рівні, яка відрізняється від відомих тим, що дозволяє врахувати:

- молекулярні параметри породи: власну частоту коливань молекули, діаметр молекули, масу молекули;
- властивості породи: питому теплоємність плавлення, довжину хвилі потоку електронів матеріалу;
- довжину критичної тріщини;
- параметри інструменту: ширина ріжучої кромки, відстань між ріжучими кромками, кількість ріжучих кромок;
- параметри приводу: потужність приводу подачі та різання, крутний момент приводу подачі та приводу різання, ККД двигуна; навантаження на робочий інструмент, швидкість подачі робочого інструменту та швидкість різання;
- параметри забою: глибину руйнування породи, контактну міцність породи.

2. Встановлено залежності зміни питомої поверхневої енергії від потужності приводу подачі, відстані між ріжучими кромками, швидкості подачі робочого інструменту та швидкості різання. При збільшенні потужності приводу подачі від 2 до 9 кВт питома поверхнева енергія зростає від 1,01 до

2,23 Дж/м² для кам'яної солі, від 0,11 до 0,25 Дж/м² – для кварцу, від 0,07 до 0,15 Дж/м² – для корунду.

3. Зі збільшенням відстані між ріжучими кромками інструменту від 0,05 до 0,15 м питома поверхнева енергія має гіперболічний характер і знижується від 4,1 до 1,4 Дж/м² для кам'яної солі, від 0,46 до 0,15 Дж/м² – для кварцу, від 0,76 до 0,26 Дж/м² – для корунду.

4. При збільшенні швидкості різання породного масиву від 4 до 12 м/с питома поверхнева енергія зменшується за гіперболічним законом від 6 до 0,3 Дж/м² для кам'яної солі, від 0,69 до 0,03 Дж/м² – для кварцу, від 0,41 до 0,02 Дж/м² – для корунду. Це обумовлено втратами на тертя і нагрівання робочого інструменту. Зі збільшенням швидкості різання, питома поверхнева енергія знижується внаслідок збільшення енергії активації процесу знеміцнення ГП.

5. Зі збільшенням швидкості подачі від 2 до 4 м/с питома поверхнева енергія зростає за параболічним законом від 2 до 2,5 Дж/м² для кам'яної солі, від 0,23 до 0,29 Дж/м² – для кварцу, від 0,14 до 0,18 Дж/м² – для корунду. Зі збільшенням швидкості подачі від 4 до 12 м/с питома поверхнева енергія знижується параболічним законом від 2,5 до 0,49 Дж/м² для кам'яної солі, від 0,29 до 0,06 Дж/м² – для кварцу, від 0,18 до 0,03 Дж/м² – для корунду. При швидкості подачі 4 м/с залежність досягає екстремуму. У цей момент співвідношення швидкості подачі до швидкості різання, приблизно, 1:2. При цьому енергоємність руйнування найбільша. Тому, при виборі технологічних параметрів, слід уникати такого співвідношення.

6. Представлені на обговорення результати досліджень мають перспективу застосування у процесі руйнування гірських порід для зниження питомої енергоємності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Механика разрушения твердых тел. / В.М. Пестриков, Е.М. Морозов. – Санкт-Петербург: «Профессия», 2002 – 300 с.
2. Eine Methode zur Herstellung einkristalliger Metalle/ I.W. Obreimow, L.W. Schubnikow // Zeitschrift für Physik. – 1924. – Vol. 25, Iss. 1. – PP. 31–36.
3. Прикладна геодинаміка вибуху в гірництві та геотехнічному будівництві / В.Г. Кравець, О.О. Вовк, В.В. Котенко, О.М. Терентьев. – Житомир, 2012. – 162 с.
4. Основы функционирования системы забой – горная машина / А.Ф.Кичигин, О.М. Терентьев. – К.: «УМК ВО», 1989. – 223 с.
5. Протасов Ю.И. Разрушение горных пород. – М.: «Горная книга», 2009. – 453 с.
6. Шаскольская М.П. Кристаллография. – М.: Высшая школа, 1984. – 376 с.
7. Мычко Д.И. Моделирование в химии // Хімія: проблеми викладання. – 2004. – № 6. – С. 49–59.
8. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. – М.: Машиностроение, 1986. – 359 с.
9. Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого тела / А.М. Кривцов, Н.В. Кривцова // Дальневосточный математический журнал ДВО РАН. – 2002. – Т. 3, № 2. – С. 254–276.
10. Сумм Б.Д. Новые корреляции поверхностного натяжения с объемными свойствами жидкостей // Вестник Московского Университета. Серия «Химия». – 1999. – Т. 40, № 6. – С. 400–405.
11. Физика прочности кристаллических тел / Р.И. Гарбер, И.А. Гиндин // Успехи физических наук. – 1960. – Т. 80, № 1. – С. 57–106.
12. Спиридонов О.П. Фундаментальные физические постоянные. – М.: Высшая школа, 2001. – 238 с.
13. Юбельт Р. Определитель минералов. – М.: Мир, 1978. – 165 с.
14. Справочник по элементарной химии / А.Т. Пилипенко, В.Я. Починок, И.П. Середа, Ф.Д. Шевченко. – К.: Наукова думка, 1985. – 560 с.
15. Моделирование поля деформаций и зон дилатансии в упругом полупространстве с комбинацией двойных сил / М.Е. Боброва, А.С. Пережогин // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2011. – № 1 (2). – С. 31–36.
16. О влиянии импульсного магнитного поля на граничную частоту спектра колебаний, локализованных вблизи точечных и линейных дефектов в щелочно-галоидных кристаллах / В.С. Абрамов, В.Л. Бусов // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14, № 2. – С. 101–106.
17. Терентьев О.М. Урахування міцності молекулярних зв'язків гірських порід при виборі робочих органів для її руйнування // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2010. – № 19. – С. 36–44.
18. О механических характеристиках наноразмерных объектов / А.М. Кравцов, Н.Ф. Морозов // Физика твердого тела. – 2002. – Т. 44, № 12. – С. 2158–2163.

A MATHEMATICAL MODEL OF CONTROL OF SURFACE ENERGY OF THE ROCK BREAKING

O. Terentiev, I. Streltcova

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

vul. Borschchagivska, 115, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: Oltr_1@ukr.net, inna_hnipel@ukr.net

The authors have presented a mathematical model of specific surface energy controlling during the rock breaking process. It differs from the well known models and allows taking into account the technological and physical-

mechanical properties of rock in functional form, as well as molecular parameters. The object of the study is reduction of specific energy consumption of the destruction process of intermolecular bonds of the rocks' lattice. During the research, the method of mathematical modelling was used to assembly specific surface energy of rock mass considering the limit operating conditions of mining. Also, the analytical methods were used for ascertainment of the specific surface energy dependences upon the technological parameters of the rock breaking process, such as drive power, distance between the cutting edges, speed of the working tool, cutting speed. The research results presented here may have the prospect application for the rock breaking with a view of reduction of specific energy consumption.

Key words: surface energy, rocks, destruction.

REFERENCES

1. Pestrikov, V.M. and Morozov, E.M. (2002), *Mekhanika razrusheniya tverdykh tel* [Mechanics of solid bodies breaking]. Professiya, Sankt-Petersburg, Russia.
2. Obreimow, I.W. and Schubnikow, L.W. (1924) «A method for producing a single metal crystal», *Zeitschrift für Physik*, Germany, vol. 25, iss. 1, pp. 31–36.
3. Kravets, V.H., Vovk, O.O., Kotenko, V.V. and Terentiev, O.M. (2012), *Prykladna heodynamika vybuhu v hirnyctvi ta heotekhnichnomu budivnyctvi* [Applied rock blast geodynamics and geotechnical construction], Zhitomyr, Ukraine.
4. Kichigin, A.F. and Terentiev, O.M. (1989), *Osnovy funkcionirovaniya sistemy zaboi – gornaia mashina* [Foundations of the system of slaughtering – mining machine], UMK VO, Kiev, Ukraine.
5. Protasov, Yu.I. (2009), *Razrushenie gornyykh porod* [Rock destruction], Gornaya kniga, Moscow, Russia.
6. Shaskolskaya, M.P. (1984) *Kristallografiya* [Crystallography], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.
7. Mychko, D.I. (2004), «Modeling in chemistry», *Himiya, Problemy vykladannya*, Minsk, Belarus, pp. 49–59.
8. Bakli, D. (1986), *Poverhnostnyie yavleniya pri adgezii i friktsionnom vzaimodeystvii* [Surface phenomena in adhesion and frictional interaction], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
9. Krivtsov, A.M. (2002), «Particle method and its use in solid mechanics», *Dalnevostochnyy matematicheskiy zhurnal DVO RAN*, Russia, vol. 3, no.2, pp. 254–276.
10. Summ, B.D. (1999), «The new correlation of surface tension with the bulk properties of liquids», *Vestnik Moskovskogo Universiteta seriya «Himiya»*, vol. 40, no. 6, pp. 400–405.
11. Garber, R.I. and Gindin, I.A. (1960), «Physics of strength crystalline bodies», *Uspehi fizicheskikh nauk*, Vol. 80, no 1, pp. 57–106.
12. Spiridonov, O.P. (2001), *Fundamentelnyie fizicheskie postoiannyye* [The fundamental physical constants], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.
13. Yubelt, R. (1978), *Opredelitel mineralov* [The determinant of minerals], Mir, Moskva, Russia.
14. Pilipenko, A.T., Pochinok, V.Ya., Sereda, I.P. and Shevchenko, F.D. (1985) *Spravochnik po elementarnoi khimii* [Handbook of elementary chemistry], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
15. Bobrova, M.Ye. and Peregozhyn, A.S. (2011) «Modeling of the deformation field and dilitsansii zones in an elastic half-space with a combination of double-strength», *Vestnik KRAUNTC, Fiz-mat. Nauki*, no. 1(2), pp. 31–36, Russia.
16. Abramov, V.S. and Busov, V.L. (2011) «The effect of pulsed magnetic field on the cutoff frequency of the oscillation spectrum localized near the point and line defects in alkali halide crystals», *Fizicheskaya mezomekhanika*, Vol. 11, pp. 101–106, Russia.
17. Terentiev, O.M. (2010) «Considering the strength of molecular bonds rocks the choice of working for its destruction», *Visnyk NTUU «KPI», seriia «Hirnyctvo»*, no. 19, pp. 36–44, Kyiv, Ukraine.
18. Kravtsov, A.M. and Morozov, N.F. (2002) «Mechanical characteristics nanosize objects», *Fizika tverdogo tela*, vol. 44, no.12, pp. 2158–2163, Russia.

Стаття надійшла 14.05.2013.