

DOI: <https://doi.org/10.20535/2707-2096.6.2021.241939>

УДК 502.63

А. І. Крючков, к.т.н., доц.,
ORCID: 0000-0002-2234-0546

А.І. Бахтин*, аспірант
ORCID: 0000-0002-7081-2894

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*Відповідальний автор: at_bahtin@i.ua

Подана 20.08.2021; Прийнята 28.09.2021

ЗМІНА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ ЛІТОСФЕРИ ПРИ ЇХ ДЕФОРМАЦІЇ

Мета та завдання. Метою даного дослідження є встановлення аналітичних закономірностей для прогнозування зміни напружень та щільності енергії, що витрачається на руйнування гірської породи за даними експериментальних досліджень. Для вирішення поставленої мети в роботі були поставлені наступні наукові задачі:
1) аналітичний опис залежності напруження σ_{ij} від головної деформації ϵ_{ij} ;
2) встановлення розрахункових параметрів, що входять в аналітичні закономірності;
3) аналітичний опис та дослідження кривих щільності енергії руйнування.

Наукова новизна. У ході аналітичних та експериментальних досліджень повних діаграм деформування гірських порід розроблено математичну модель залежності напруження від деформації при граничному напруженому стані породи. Проаналізовано та описано фізико-механічні процеси характерних ділянок повної діаграми деформування. Аналіз отриманої кривої показав, що гірський масив та елементи літосфери не являються ідеально пружними чи пластичними об'єктами. Разом із пружними завжди в тій чи іншій мірі присутні і пластичні.

Інтегрування отриманого аналітичного виразу $\sigma_{11}=f(\epsilon_{11})$ дозволило встановити об'ємну щільність енергії, що витрачається на руйнування зразка гірських порід під дією одновісного зовнішнього навантаження. Максимальна енергія активації для розглянутої породи складає 0,67 МДж/м³. Порівняння експериментальних і розрахункових значень енергетичної залежності $u(\epsilon_1)$ показує збіг майже на всьому діапазоні зміни деформації ($\epsilon_{ij}=0..0,04$).

Розроблено аналітичний опис енергетичної діаграми деформування та повної діаграми зміни напружень у вигляді єдиної залежності, яка враховує дограничні та заграничні ділянки. На відміну від метода кусково-лінійної апроксимації даний підхід відповідає фізиці процесу та знижує похибки при розрахунках.

Висновки та практичне значення. Дослідження зразків гірських порід при жорсткому навантаженні дозволило отримати повну деформаційну характеристики породи. Крива, що огинає цикли деформації (1) об'єднує дограничні, граничні, заграничні режими деформації і руйнування порід. Закономірність (4) дозволяє встановити, що руйнування може відбуватися при різних значеннях щільності енергії $U(\epsilon)$. Теоретико-експериментальний аналіз отриманих енергетичних діаграм руйнування та повних діаграм зміни напружень в гірських породах дозволяє оцінити несучу здатність гірського масиву або іншого твердого тіла. Це дозволяє прогнозувати критичні значення напружень та зовнішніх навантажень для своєчасного запобігання руйнуванню.

Ключові слова: повна діаграма руйнування; напруження; деформація; щільність енергії; гірська порода; елемент літосфери.

ВСТУП

Актуальність теми. Проведення буро-вибухових робіт на кар'єрах завжди супроводжується значними втратами енергії вибуху, які значно перевищують частку його корисної дії. Ця енергія, як правило, надходить в елементи літосфери і витрачається на деформування гірських порід, зміни рельєфу, утворення тріщин і пустот. Цей факт пояснюється самою природою вибуху, тобто значною втратою потенційної енергії.

Розробка аналітичних фізико-технічних основ енергетичного руйнування масиву гірських порід, при зовнішньому імпульсному чи статичному навантаженні, дозволить досягнути на прикладному рівні ефективної керованості енергетичних потоків в процесі масових вибухів.

В більшості випадків опис залежності напруження від деформації здійснюється за методами кусково-лінійної апроксимації, причому ділянки дограничного та заграничного напруження розглядаються як лінійні залежності. На практиці експериментальні дослідження показали, що даний підхід не відповідає дійсності в повній мірі, що призводить до накопичення похибок при розрахунках.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існуючі теорії руйнування гірських порід та інших елементів літосфери ґрунтуються на знаннях про їх міцність. Дослідженню та розробці аналітичних закономірностей деформування твердих тіл, станом на сьогодні, приділено значну увагу в гірничій та будівельній промисловості [1, 2, 3]. Переваги використання теорії повних діаграм деформування твердих тіл, для дослідження механізмів руйнування, обґрунтовано в роботах [4, 5].

В наукових працях [6, 7] запропоновано аналітичні закономірності зміни імпульсу напруження гірського масиву в часі при проведенні масових вибухів на кар'єрах. Дослідження енергії та механізму деформування твердих тіл представлені в роботах [8, 9].

Постановка завдання. Метою даної роботи є встановлення аналітичних закономірностей для прогнозування зміни напружень та щільності енергії, що витрачається на руйнування гірської породи за даними експериментальних досліджень.

Для перевірки аналітичного опису повної діаграми деформування та щільності енергії руйнування використані дані експериментальних замірів [10]. Для вирішення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові задачі: 1) аналітичний опис залежності головного напруження σ_{11} від головної деформації ϵ_{11} ; 2) встановлення розрахункових параметрів, що входять в аналітичні закономірності; 3) аналітичний опис та дослідження кривих щільності енергії руйнування.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Під час вибуху або іншого роду дії зовнішніх сил масив гірських порід змінює свою форму, розміри, об'єм, тобто деформується. Деформація – це зміна відносного положення частки породи чи іншої твердої системи, що викликає зміну об'єму чи форми зразка.

Деформації, які з'являються лише в момент прикладеного навантаження називаються миттєво-пружними, а деформації, що розвиваються на протязі часу – деформації повзучості.

Під час звичайних випробувань зразка гірських порід в так званому м'якому режимі навантаження досягнення максимального напруження σ_c (границя міцності при одновісному стисненні) призводить до різкого падіння несучої здатності зразка без збільшення деформацій, тобто загранична гілка на графіку деформації буде практично вертикальною. Під час руйнування масиву гірської породи накопичена енергія пружних деформацій переходить в кінетичну енергію елементів джерела навантаження і кінетичну енергію елементів частин зразка, який зміщується. Таким чином, традиційний м'який режим навантаження гірських порід дозволяє зафіксувати максимальну несучу здатність конкретного зразка, але не дозволяє встановити межу міцності самого матеріалу.

При жорсткому режимі навантаження (рис. 1) максимальна несуча здатність зразка σ_c відповідає межі миттєвої міцності масиву гірської породи на одновісне стискання σ_c^* [11].

Подальше збільшення деформації ε_{ij} призводить до плавного зменшення несучої здатності зразка до мінімального значення σ_{min} , яке називається залишковою міцністю гірської породи (міцністю руйнного стану) (табл. 1). Побудова таких повних діаграм навантаження можливе лише в жорсткому режимі навантаження, коли інтенсивність впливу перевищує жорсткість зразка. Найбільш простим способом досліджень в такому режимі [11] є побудова кривих деформації у вигляді циклічних навантажень на обладнанні з обмежувачами деформацій у вигляді жорстких упорів. Крива, що огинає окремі діаграми навантаження і розвантаження дає повну діаграму деформації і руйнування гірської породи як на дограничній, так і на граничній і позаграничній ділянках навантаження (табл. 1).

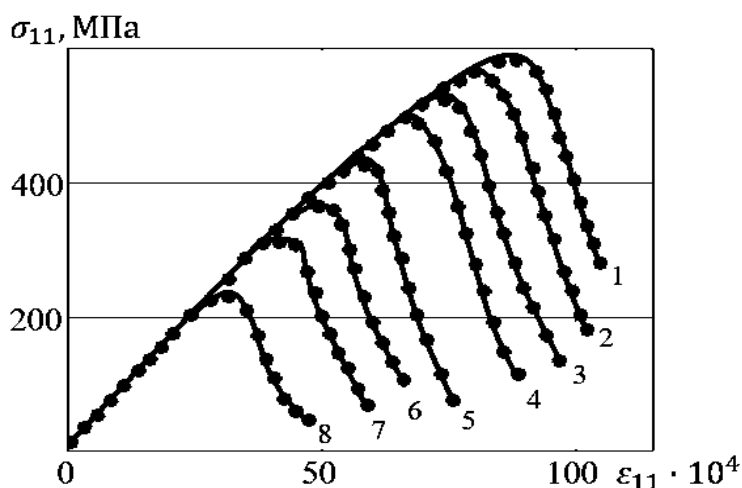


Рисунок 1 – Експериментальна повна діаграма деформування гірських порід при різних значеннях бокового стиснення, МПа [8]: 1 – $\sigma_3 = 2,45$; 2 – $\sigma_3 = 2,1$; 3 – $\sigma_3 = 1,75$; 4 – $\sigma_3 = 1,4$; 5 – $\sigma_3 = 1,05$; 6 – $\sigma_3 = 0,7$; 7 – $\sigma_3 = 0,35$; 8 – $\sigma_3 = 0,035$

Таблиця 1 – Повна діаграма деформування зразка алевроліту [10]

σ_{11} , МПа	0	10	20	30	34	30	20	10	4
ε_{11}	0	0,003	0,007	0,01	0,014	0,018	0,022	0,028	0,04

Результати експериментальних і аналітичних досліджень повних діаграм деформування порід дозволяють зробити припущення, що залежність максимального напруження σ_{11} від деформації ε_{11} може бути представлена у вигляді виразу:

$$\sigma_{11}(\varepsilon_{11}) = \frac{\sigma_c}{\alpha} \left[\exp\left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{11}}{\varepsilon_T}\right) \exp\left(-\exp\left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{11}}{\varepsilon_T}\right)\right) \right] + \sigma_{min}, \quad (1)$$

де $\sigma_{11}(\varepsilon_{11})$ – огибаюча функція максимального напруження при циклічному навантаженні і розвантаженні зразка породи; ε_{11} – змінна відносна деформація; ε_c – відносна деформація, яка відповідає напруженню $\sigma_{11} = \sigma_c$; ε_T – інтенсивність росту і спаду навантаження; α – коефіцієнт, який залежить від типу гірської породи.

Результати дослідження зв'язку мінімальної резистентності породи руйнуванню у випадку об'ємного напруженого стану [11] найменшим головним напруженням σ_{33} дозволяє записати співвідношення:

$$\sigma_{min} = (1 + 2\lambda)\sigma_{33}, \quad (2)$$

де λ можна виразити через кут внутрішнього тертя гірської породи φ :

$$\lambda = \frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (3)$$

Максимальне та мінімальне напруження для конкретних гірських порід є сталими і залежать від вологості, мінералізації та морфологічної структури.

Розрахункові параметри для алевроліту представлені в табл. 2.

Використовуючи рівняння (1) та одержані значення параметрів (табл. 2), розраховані значення головного напруження σ_{11} на діапазоні зміни деформації від 0 до 0,04. Результати розрахунків представлені на рис. 2, б.

Таблиця 2 – Розрахункові параметри для розглянутої кріогенної породи

Параметр	σ_c , МПа	σ_{\min} , МПа	ε_c	ε_T	α
Значення	32	2	0,0133	0,007	0,37

Враховуючи, що експериментальні точки лягають з невеликим відхиленням на аналітичну криву (рис. 2,б) можна зробити висновок, що досліджувана експериментальна закономірність може бути описана аналітичною залежністю (1).

На повній діаграмі деформування (рис. 2,б) спостерігається ряд характерних ділянок. Ділянка ОА представляє собою відрізок, що характеризує закриття дефектів зразка (пори, тріщини). АВ – ділянка, яка характеризує зону пружних деформацій. На даній ділянці спостерігається лінійна залежність напруження від деформації. На відрізку ВD відбувається виникнення пластичних деформацій та тріщин. Точка С відповідає максимальному напруженню в зразку і характеризує максимальний опір породи руйнуванню.

Аналіз вище описаної кривої показав, що гірський масив та елементи літосфери не являються ідеально пружними чи пластичними об'єктами. Разом із пружними завжди в більшій чи меншій мірі спостерігаються і пластичні деформації.

При дослідженні зразка гірської породи на одновісне стискання ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) мінімальний опір руйнуванню σ_{\min} наближається до нуля (рис. 2, а). Цей режим досліджень дозволяє встановити основні параметри залежності $\sigma_{11} = f(\varepsilon_{11})$, такі як U_c , U_0 . Для цього визначається об'ємна щільність енергії, що витрачається на руйнування зразка гірської породи, шляхом інтегрування виразу (1) (рис.2,а):

$$U(\varepsilon_{11}) = \int_0^{\varepsilon_{11}} \sigma_{11}(\varepsilon_{11}) d\varepsilon_{11}; \quad (4)$$

Після певних перетворень залежності (4) і взяття інтегралу отримаємо:

$$U(\varepsilon_{11}) = U_0 \left[1 - \exp \left(- \exp \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{11}}{\varepsilon_T} \right) \right) \right] + \sigma_{\min}. \quad (5)$$

Результати інтегрування представлені на рис. 2,а. Максимальна енергія активації для алевроліту складає $u_0 = 0.67$ МДж/м³. Порівняння експериментальних і розрахункових значень енергетичної залежності $u(\varepsilon_1)$ (5) показує їх збіг майже на всьому діапазоні зміни деформації ($\varepsilon_1 = 0..0,04$).

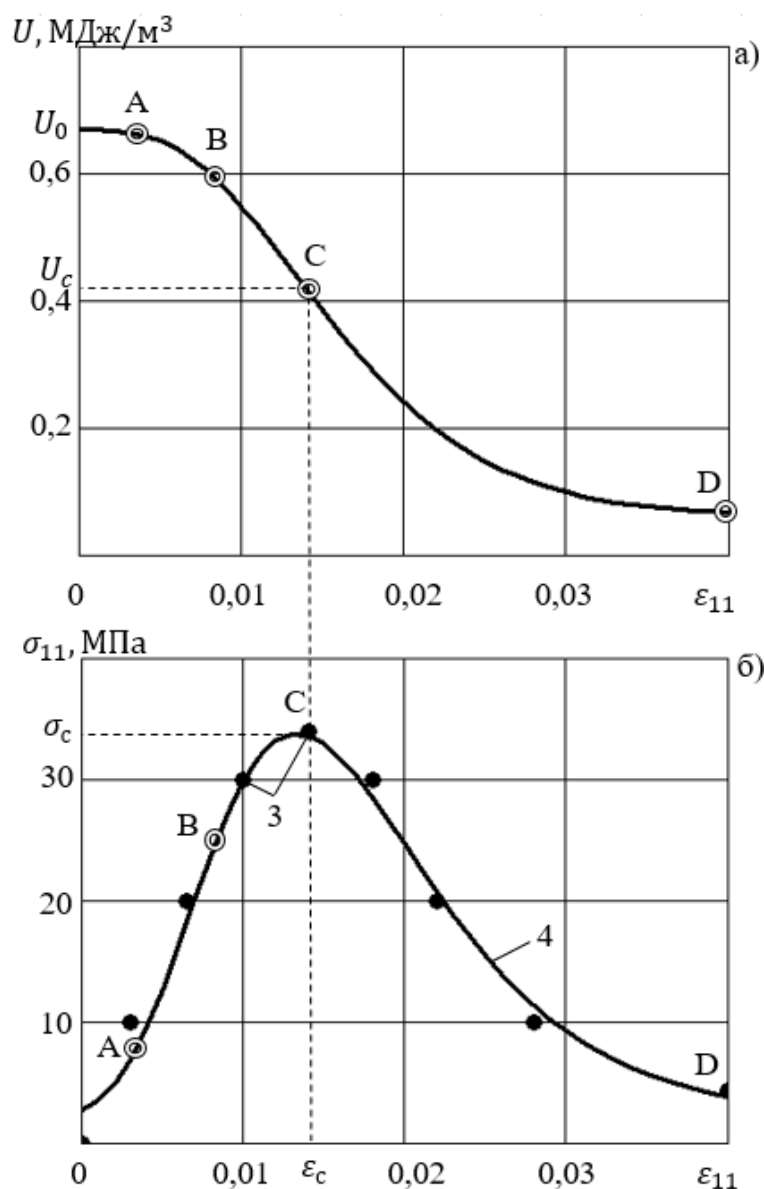


Рисунок 3 – Енергетична діаграма (а) деформування зразка алевроліту і повна діаграма зміни напруження (б):

1 – аналітичні криві енергетичного деформування за рівнянням (5); 2 – експериментальні значення напружень алевроліту; 3 – аналітична закономірність залежності головного напруження від головної деформації, рівняння (1)

Проведені дослідження показують, що щільність енергії, яка витрачається на деформацію і руйнування гірської породи, визначається величиною лінійної деформації ϵ_{11} за встановленою залежністю (5).

ВИСНОВКИ та практичне значення

1. Дослідження зразків гірських порід при жорсткому навантаженні дозволяє отримати повну деформаційну характеристики породи.
2. Крива, що огинає цикли деформації (1) об'єднує дограничні, граничні, заграничні режими деформації і руйнування порід.
3. Енергетична крива, що огинає цикли деформації аналітично може бути описана виразом (4), що підтверджений експериментами. Закономірність (5) дозволяє встановити, що руйнування може відбуватися при різних значеннях щільності енергії $U(\epsilon)$. Максимальна енергія активації для алевроліту складає $U_0=0,67$ МДж/м³.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. А. Кириченко, О. А. Крупченко, и І. А. Юрко, «Расчет железобетонных колонн с учетом полной диаграммы деформирования бетона», *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, №162, с. 201-207, 2016. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.162.2016.78464>
- [2] В. Э. Вильдеман и М. П. Третьяков, «Испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования», *Проблемы машиностроения и надежности машин*, №2, с. 93-98, 2013.
- [3] Ю. В. Мольков, «Застосування методу цифрової кореляції зображень до побудови діаграм деформування», *Фізико-хімічна механіка матеріал*, №6, с. 121-125, 2012. Доступно: <http://dspace.nbuu.gov.ua/handle/123456789/135811>
- [4] Н. Г. Чаусов, «Полная диаграмма деформирования как источник информации о кинетике накопления повреждений и трещиностойкости материалов», *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, №7(70), с. 42-49, 2004.
- [5] А. А. Лебедев, *Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки*. Киев, Украина: Изд-во ИПП НАН Украины, 2004.
- [6] А. І. Крючков, та А. І. Бахтин, «Опис форми, розповсюдження та поглинання вибухового імпульсу в гірському масиві», *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*, № 23, с. 18-27, 2019. DOI: <https://doi.org/10.30929/2074-1537.2019.1.18-27>
- [7] О. О. Фролов, А. І. Крючков, та Т. В. Косенко, *Керування енергетичними потоками при вибуховому руйнуванні гірських порід на кар'єрах*. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. Доступно: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7327>
- [8] А. И. Крючков, «Энергетические характеристики горных пород при разрушении», *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія "Гірництво"*, №6, с. 6, 13-17, 2001.
- [9] С. В. Клишин, и А. Ф. Ревуженко, «Потоки энергии в массиве горных пород в процессе приливного деформирования», *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, № 3(1), с. 76-79, 2016. Доступно: https://www.researchgate.net/profile/Sergey-Klishin/publication/311454446_Potoki_energii_v_massive_gornyh_porod_v_processe_prilivnogo_deformirovania/links/5847896d08ae8e63e6308fc4/Potoki-energii-v-massive-gornyh-porod-v-processe-prilivnogo-deformirovania.pdf
- [10] И. В. Баклашев, *Деформирование и разрушение породных массивов*. Москва, Россия: Недра, 1988.
- [11] И. В. Баклашев, и Б. А. Картозия, *Механические процессы в породных массивах*. Москва, Россия: Недра, 1988.

A.I. Kryuchkov PhD, Associate Professor,
ORCID: 0000-0002-2234-0546

A.I. Bakhtyn*, PhD student
ORCID: 0000-0002-7081-2894

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: at_bakhtyn@i.ua

Received 20.08.2021; Accepted 28.09.2021

CHANGE OF ENERGY CHARACTERISTICS OF LITHOSPHERE ELEMENTS DURING THEIR DEFORMATION

Purpose. The purpose of this study is to establish analytical patterns for predicting changes in stress and energy density spent on the destruction of rocks according to experimental studies. To solve this purpose in the article were set the following scientific problems: 1) analytical description of the dependence of the stress σ_{ij} on the main deformation ϵ_{ij} ; 2) establishment of calculation parameters that are included in the analytical patterns; 3) analytical description and study of fracture energy density curves.

Methodology. In the course of analytical and experimental researches of full diagrams of deformation of rocks the mathematical model of dependence of the stress on the deformation is developed. Physico-mechanical processes of all characteristic sections of the complete deformation diagram were also analyzed and described. Analysis of the resulting curve showed that the rock mass and elements of the lithosphere are

not perfectly elastic or plastic objects. Along with the elastic ones, plastic ones are always present to one degree or another.

The integration of the obtained analytical expression $\sigma_{11} = f(\varepsilon_{11})$ allowed to establish the volumetric energy density spent on the destruction of the rock sample under the action of external load. The maximum activation energy for the considered rock is 0.67 MJ/m³. A comparison of the experimental and calculated values of the energy dependence $u(\varepsilon_1)$ shows a coincidence over almost the entire range of deformation changes ($\varepsilon_{11} = 0..0.04$).

Findings. The study of rock samples at hard stress allowed to obtain a complete deformation characteristics of the rock. The curve that surrounds the deformation cycles (1) combines pre-boundary, boundary, extremal modes of deformation and destruction of rocks. Equation (4) allows us to establish that the destruction can occur at different values of energy density $U(\varepsilon)$.

Originality. An analytical description of the energy diagram of deformation and a complete diagram of stress change in the form of a single dependence, which takes into account the boundary and extremal areas, was developed in the work. In contrast to the method of piecewise linear approximation, this approach corresponds to the physics of the process and reduces errors in calculations.

Practical implications. Theoretical and experimental analysis of the obtained energy fracture diagrams and complete stress change diagrams in rocks allows to estimate the bearing capacity of a rock mass or other solid body. This allows you to predict critical values of stresses and external loads to prevent failure in a timely manner.

Keywords: complete diagram of destruction; stress; deformation; energy density; rock; element of the lithosphere.

REFERENCES

- [1] V. A. Kyrychenko, O. A. Krupchenko, and I. A. Yurko, "Calculation of reinforced concrete columns using the full deformation diagram concrete", Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport, №162, pp. 201-207, 2016. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.162.2016.78464>
- [2] V. E. Vildeman and M. P. Tretyakov, "Material testing with full deformation diagrams", Problems of mechanical engineering and machine reliability, №2, pp. 93-98, 2013.
- [3] Yu. V. Molkov, "Application of digital image correlation method for construction of deformation diagrams", Physico-chemical mechanics of the material, №6, pp. 121-125, 2012. Available: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/135811>
- [4] N. G. Chausov, "Complete deformation diagram as a source of information on the kinetics of damage accumulation and crack resistance of materials", Factory laboratory. Diagnosis of materials, №7(70), pp. 42-49, 2004.
- [5] A. Lebedev, New methods for estimating the degradation of the mechanical properties of metal structures in the process of development. Kyiv, Ukraine: Publishing house of NAS of Ukraine, 2004.
- [6] I. Kriuchkov, and A. I. Bakhtyn, "Description of the form, dissemination and damping of the explosive impulse in the rocks massif", Modern resource-saving technologies of mining production, № 23, pp. 18-27, 2019. DOI: <https://doi.org/10.30929/2074-1537.2019.1.18-27>
- [7] O. O. Frolov, A. I. Kriuchkov, and T. V. Kosenko, Control of energy flows during explosive destruction of rocks in quarries. Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Publishing house «Politehnika», 2019. Available: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7327>
- [8] I. Kriuchkov, "Energy characteristics of rocks during destruction", Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Mining Series, №6, pp. 6, 13-17, 2001.
- [9] S. V. Klishin, and A. F. Revuzhenko, "Energy flows in a rock massif in the process of tidal deformation", Fundamental and applied issues of mining sciences, № 3(1), pp. 76-79, 2016. Available: https://www.researchgate.net/profile/Sergey-Klshin/publication/311454446_Potoki_energii_v_massive_gornyh_porod_v_processe_prilivnogo_deformirovania/links/5847896d08ae8e63e6308fc4/Potoki-energii-v-massive-gornyh-porod-v-processe-prilivnogo-deformirovania.pdf
- [10] V. Baklashev, Deformirovanie i razrushenie porodnykh massivov [Deformation and destruction of rock massifs]. Moscow, Russia: Nedra, 1988.
- [11] V. Baklashev, and B. A. Kartoziya, Mehanicheskie protsessyi v porodnykh massivah [Mechanical processes in rock massifs]. Moscow, Russia: Nedra, 1988.