

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**Клещов Антон Йосипович**

УДК 622.271

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАЗМО-МЕХАНІЧНОГО  
РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

Спеціальність 05.15.03 – відкрита розробка родовищ корисних копалин

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електромеханічного обладнання енергоємних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор  
**ТЕРЕНТЬЄВ Олег Маркович**,  
Національний технічний університет  
України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»,  
професор кафедри  
електромеханічного обладнання  
енергоємних виробництв.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**СОБКО Борис Юхимович**,  
Національний гірничий університет,  
завідувач кафедрою відкритих  
гірничих робіт;

кандидат технічних наук  
**ВИНОГРАДОВА Олена Петрівна**,  
Інститут надтвердих матеріалів ім.  
В.М. Бакуля,  
науковий співробітник відділу  
комп'ютерного моделювання та  
механіки композиційних матеріалів.

Захист відбудеться «15» червня 2017 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.22 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115, корпус 22, кімната 701.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги 37.

Автореферат розісланий «11» травня 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 26.002.22



В. В. Вапнічна

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Питаннями удосконалення технології руйнування гірських порід (ГП), при їх відкритому видобутку, займалися такі вітчизняні та закордонні вчені, як Бабат Г.І., Бартенєв Г.М., Болдирєв Г.Г., Воробйов А.А., Воробйов Г.А., Гриффітс А, Денисюк Т.Д., Додіс Я.М., Зінов'єв Н.Т., Нарісава І., Регель В., Сьомкін Б.В., Усов А.Ф., Фортов В.Е., Черепанов Г.П. та інші. Проте, у їх дослідженнях енергія молекулярних зв'язків розглянута як сила протидії зовнішньому енергетичному впливу. Не розглянуті можливості вивільнення та направлення цієї енергії на розвиток та поширення природної тріщинуватості. Класичне руйнування (різання, шарошкове, обертове, вибухове та інші) у комбінації з фізичним руйнуванням (термічне, імпульсне, гідравлічне тощо) кристалічної структури масивів дозволяє використовувати внутрішні та зовнішні джерела енергії. Їх сумісний вплив на ГП і на продуктивність її руйнування не був досліджений переліченими вище вченими. Тому, є актуальним встановлення закономірностей підвищення продуктивності руйнування ГП фізико-механічними навантаженнями зовнішніх і внутрішніх енергетичних джерел для відкритої розробки родовищ корисних копалин. Актуальність обраної теми відповідає пункту 7, статті 4 глави 2 Директиви Європейського Парламенту та Ради «Про енергоефективність» 2012/27EU від 25 жовтня 2012 р.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі електромеханічного обладнання енергоємних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та охоплює задачі, які визначені:

- статтею 7 «Гірничого закону України» № 191-VIII від 12.02.2015;
- розділом 3 «Стратегії державної екологічної політики України на період до 2020 року».

Дисертація виконана відповідно до науково-дослідної роботи за темою № 2643-п «Геотехнічний комплекс з інтелектуально-адаптивним виконавчим органом імпульсного руйнування гірських порід та видобутку корисних копалин» (№ ДР 0113U001628), в якій автор приймав участь у якості виконавця.

**Мета та задачі дослідження.** Метою є зниження енергоємності руйнування гірських порід сумісними механічним та плазмовим навантаженнями.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні задачі:

1. Визначення характеру залежності міцнісних параметрів гірських порід від енергії молекулярних зв'язків їх кристалічних структур.
2. Встановлення залежності питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування гірських порід від зміни індуктивності та сили струму плазмо-механічного навантаження при відкритій розробці родовищ корисних копалин.
3. Визначення зміни продуктивності буріння вибухових свердловин при регулюванні режимів плазмо-механічного навантаження.
4. Розробка методики розрахунку та вибору параметрів плазмо-механічного руйнування гірських порід.

*Об'єкт дослідження* – процес руйнування гірських порід комбінованими плазмо-механічними навантаженнями при відкритій розробці родовищ корисних копалин.

*Предмет дослідження* – закономірності впливу міцнісних показників гірських порід на технологічні параметри плазмо-механічного буріння вибухових свердловин при відкритих гірничих роботах.

**Методи дослідження.** При проведенні дослідження використані наступні методи: *методом індукції* визначено спільні недоліки існуючих теорій руйнування; *методом Жордано-Гаусса* визначено домінуючі умови руйнування кристалічних структур; *методом синтезу* енергетичного критерію у систему руйнування потоком індуктивної плазми забезпечено зв'язок між складовими руйнування гірських порід (інструментом та ГП); *методом ортогонального центрального композиційного планування* обрано параметри проведення експерименту; *методом теоретичного моделювання* визначено залежності модулю пружності I роду та питомої енергоємності від технологічних параметрів, параметрів потоку індуктивної плазми та параметрів кристалічних структур; *методом експериментального моделювання* встановлено коригуючі функції двокомпонентної системи зміни індуктивності та сили струму; *методом мікроіндентування* визначено залежність сили вдавлювання від глибини відбитку індентора в експериментальні зразки, *методом експерименту* підтверджено аналітичні залежності модулю пружності I роду та питомої енергоємності від технологічних параметрів, параметрів потоку індуктивної плазми та параметрів кристалічних структур.

**Наукова новизна одержаних результатів,** що виноситься на захист, представлена науковими положеннями, в яких вперше:

- встановлено зміну модулю пружності I роду за квадратичною залежністю від енергії молекулярних зв'язків кристалічних структур, що дозволило оцінити енергетичний потенціал гірських порід;
- визначено залежності питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування гірських порід за унімодальним розподілом із позитивною асиметрією від індуктивності та із негативною асиметрією від сили струму, що дозволило обрати раціональний режим комбінованого навантаження гірських порід при відкритій розробці родовищ корисних копалин;
- розроблено математичну модель питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування гірських порід, яка відрізняється від відомих тим, що враховує потужність плазмового індуктивного навантаження.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в наступному:

- досягнуто зниження питомої енергоємності руйнування гранітів на Пинязевицькому кар'єрі модернізованим буровим станком Sorco ROC L8 на 11 % з 61,38 кВт·год/м<sup>3</sup> до 54,69 кВт·год/м<sup>3</sup>;
- зафіксовано фізичний ефект, виражений у попередньому ослабленні алевролітів та пісковиків на ДП «Волиньвугілля» ВП «Шахта Бужанська». Модуль пружності I роду алевролітів при використанні блоку плазмового руйнування знизився з 30,5 ГПа до 11,7 ГПа, пісковиків – з 15,0 ГПа до 4,5 ГПа;
- результати досліджень впроваджені в навчальний процес Державним вищим навчальним закладом «Київський електромеханічний коледж»;
- розроблено методику розрахунку та вибору параметрів плазмо-механічного руйнування гірських порід, що дозволила визначити питому енергоємність комбінованого буріння вибухових свердловин із врахуванням потужності

плазмового індуктивного навантаження;

– підвищено продуктивність плазмо–механічного буріння вибухових свердловин до 26 % пропорційно збільшенню сили струму та індуктивності блоку плазмового руйнування за рахунок сумісного у часі комбінованого навантаження на гірську породу.

**Особистий внесок здобувача** в роботах, які написані із співавторами полягає в наступному: [1] – запропоновано модель внутрішньої енергії власних кругових коливань кристалічних структур; [2] – визначено спільні недоліки відомих теорій руйнування; [3] – обрано енергоощадний спосіб руйнування гірських порід; [4] – визначено адекватність регресійного рівняння; [5] – визначено основні чинники планування експерименту; [6] – встановлено вплив субрезонансних явищ на кристалічні структури; [7] – визначено вплив анізотропії гірських порід на модуль пружності I роду; [8] – встановлено залежності внутрішньої енергії потоку індуктивної плазми від сили струму та індуктивності; [9] – розроблено систему руйнування гірських порід індуктивною плазмою; [10] – запропоновано модель переходу від класичних теорій руйнування до показника квантової механіки; [11] – запропоновано модель модулю пружності I роду; [12] – визначено вплив субрезонансних плазмових потоків на гірські породи; [13] – встановлено вплив власної енергії кристалічних структур на міцність гірської породи; [14] – запропоновано математичну модель питомої енергоємності руйнування гірських порід; [15] – визначено домінуючі умови руйнування гірських порід; [16] – методом синтезу обрано плазмо-механічне зовнішнє навантаження для руйнування гірських порід; [17] – визначено необхідну кількість дослідів для експериментальних досліджень руйнування гірських порід плазмовими навантаженнями; [18] – визначено залежність внутрішньої енергії кристалічних структур від енергетичних параметрів зовнішнього навантаження при руйнуванні гірських порід; [19] – обґрунтовано параметри плазмо-механічного руйнування рапаківіподібних гранітів.

**Апробація результатів наукової роботи.** Наукові роботи за темою дисертації доповідались та були відмічені на:

– *конкурсах*: дипломом II ступеня на Всеукраїнському конкурсі «Молодь – енергетиці України 2012: відкритий конкурс молодих енергетиків та вчених» (у номінації “Паливно-енергетичні ресурси”), 11.04.2013;

– *конференціях*: на Десятій науково-методичній конференції “Проблема вдосконалення машин та обладнання геотехнічних виробництв. Наукові дослідження студентів”, 12.06.2013; International Scientifical Practical Conference, Belgrade, Serbia “Theoretical and applied Science”, 30.11.2013; II аспірантських читаннях пам'яті д.т.н., проф. А. В. Праховника, 17.04.2014; VII міжнародній науково-технічній конференції інституту енергозбереження та енергоменеджменту національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» «Енергетика. Екологія. Людина.» 29.05.2015, міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина», 01.06.2016; на міжнародному брокерському заході “Cities of the Future – H2020”, Стамбул, Туреччина, 30.09.2016 р.;

– *робочих засіданнях*: в Київській міській інноваційній організації роботодавців «Центр ресурсоефективного та чистого виробництва» на робочому засіданні від

15.06.2016 р. із позитивним висновком по актуальності досліджень і рекомендації до захисту. На робочому засіданні ТОВ «Гірничодобувна компанія «Мінерал» відбулася доповідь за темою дисертаційних досліджень із постановою про те, що результати та методика дослідження мають практичне значення та можуть бути впроваджені в умовах гірничодобувної компанії «Мінерал». Витяг з робочого засідання від 05.09.2016 р.;

– *наукових семінарах*: відділу № 9 «Комп'ютерного матеріалознавства структурованих надтвердих матеріалів для породоруйнуючих інструментів» Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України відбулась доповідь за темою дисертаційних досліджень із ухваленням рішення про актуальність теми дисертаційної роботи та її відповідність вимогам «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р., щодо кандидатських дисертацій. Витяг з протоколу наукового семінару №5 від 26 листопада 2015 р.

**Публікації.** Результати досліджень опубліковано у 19 наукових працях, в тому числі 8 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданні іноземної держави, 7 статей у виданнях України, з яких 5 включено до переліку міжнародних науково-метричних баз даних), 1 патент на корисну модель, 10 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Об'єм і структура роботи.** Дисертація викладена на 132 сторінках, складається зі вступу, 5 розділів, заключення та 2 додатків, уміщує 25 рисунків, 45 таблиць, 87 формул, список використаних джерел із 140 найменувань на 17 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **ВСТУПІ** відмічено, що дисертація направлена на підвищення продуктивності механічного руйнування гірських порід на кар'єрах шляхом удосконалення технології плазмо-механічного руйнування. Визначено актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, мету і завдання дослідження, об'єкт, предмет та методи дослідження, наукові положення та новизну одержаних результатів, практичне значення, особистий внесок здобувача в роботах, які написані зі співавторами. Викладено дані щодо апробації та публікації результатів досліджень, об'єм і структура роботи.

У **ПЕРШОМУ РОЗДІЛІ** проведено аналіз руйнування гірських порід. Визначено спільні недоліки різних видів руйнування ГП: неврахування кристалічних структур, як джерел внутрішньої енергії, яку можна вивільнити з кристалу для його руйнування; використання емпіричних фізико-механічних параметрів кристалічних структур замість функціональних; неврахування впливу зовнішніх джерел енергії на фізико-механічні параметри кристалічних структур. Встановлено домінуючі умови руйнування ГП: можливість примусового видалення зруйнованих частинок гірських порід із зони руйнування; стала продуктивність при збільшенні міцності породи. За енергетичним критерієм та діаграмою Ейлера-Венна виділено плазмо-механічне руйнування індуктивною плазмою для подальшого його удосконалення.

У **ДРУГОМУ РОЗДІЛІ** розроблено програму експерименту руйнування гірських порід плазмо-механічними навантаженнями. Ортогональне центральне композиційне планування забезпечило необхідну достатню кількість рівнів варіювання чинників – 3. Ядром плану є модифікований повночинниковий експеримент типу  $3^3$  – 3 чинники із різною кількістю рівнів, 20 дослідів. Головні чинники:  $x_1$  – кристалічна структура зразків;  $x_2$  – сила струму блоку плазмового руйнування;  $x_3$  – індуктивність блоку плазмового руйнування. Виведено рівняння регресії залежності питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування гірських порід ( $y$ ) від головних чинників. За критерієм Кохрена визначено, що рівняння регресії адекватне реальним процесам, так як його значення більше за табличне на 0,013 в.о. і становить 0,289 в.о. Визначено, що розсіювання результатів знаходиться у межах норми, так як ентропія становить 0,765 в.о. і не перевищує максимально допустиме значення 0,903 в.о. Тому, модель є раціональною і за методикою планування експерименту в електромеханіці, оптимізація не виконується.

Для дослідження впливу плазмового потоку до механічних навантажень, розроблено схему блоку плазмового руйнування (БПР) потоком індуктивної плазми, рисунок 1.

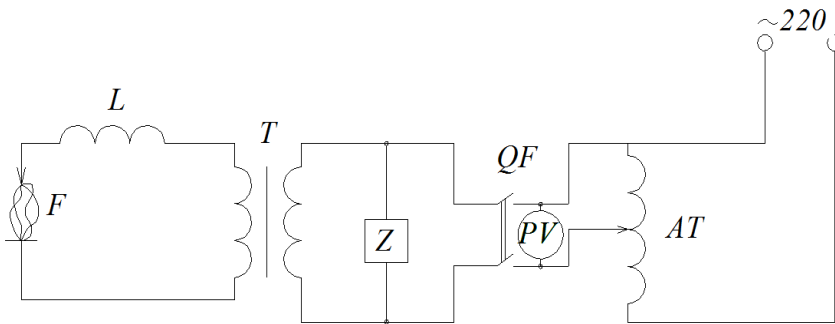


Рисунок 1 – Схема блоку плазмового руйнування, де F – розрядник; L – котушки індуктивності; T – високовольтний трансформатор; Z – фільтр; QF – вимикач; PV – вольтметр; AT – автотрансформатор

Від мережі 220 В живиться автотрансформатор AT, із вихідною напругою від 0 В до 127 В. Фільтр Z згладжує синусоїду напруги. Напруга на виході трансформатора T через дросель L пробиває повітряний проміжок між розрядниками F плазмовим каналом. Утворюється коливальний контур. Котушка індуктивності складається з 2217 витків мідного проводу виток до витку, діаметром 0,45 мм.

У **ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ** проведено моделювання плазмо-механічного руйнування гірських порід. За початковими рівняннями Денисюка Т.Д. та Фортова В.Е. розроблено модель внутрішньої енергії потоку плазми,  $U$ , Дж:

$$U = \frac{r_m^4 \cdot \rho_0 \cdot N_{пл} \cdot V \cdot \varepsilon \cdot (r+1) \cdot U_a}{2 \cdot (\gamma-1) \cdot h \cdot \omega_{пл} \cdot L \cdot I_m \cdot t}, \quad (1)$$

де  $r_m$  – максимальний радіус потоків плазми, м;  $\rho_0$  – щільність незбудженого розрядного середовища,  $\text{кг/м}^3$ ;  $N_{пл}$  – концентрація потоків індуктивної плазми,  $\text{м}^{-3}$ ;  $V$  – об'єм потоків індуктивної плазми,  $\text{м}^3$ ;  $\varepsilon$  – власна енергія потоку плазми, Дж;  $r$  – радіус зони ефективної дії хвилі стиснення, м;  $l$  – довжина потоків індуктивної плазми, м;  $U_a$  – напруга, В;  $\gamma$  – ефективний показник адіабати потоків плазми, в.о.;

$\hbar$  – постійна Планка, Дж·с;  $\omega_{пл}$  – кругова частота власних коливань плазмового потоку, с<sup>-1</sup>;  $L$  – індуктивність, Гн;  $I_m$  – сила струму, А;  $t$  – час впливу потоків індуктивної плазми на кристалічну структуру, с.

Запропонована модель внутрішньої енергії потоку плазми відрізняється від відомих тим, що встановлює її залежність від індуктивності та сили струму БПР, рисунок 2.

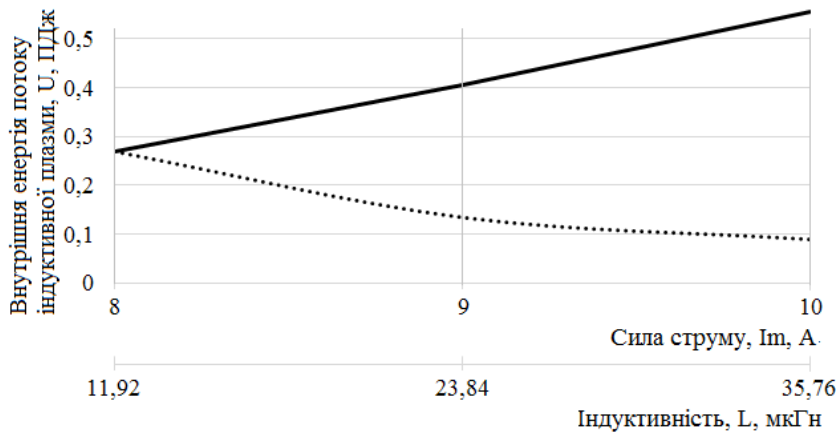


Рисунок 2 – Залежність внутрішньої енергії потоку індуктивної плазми від сили струму (-) та індуктивності (····)

При зміні сили струму з 8 А до 10 А, внутрішня енергія потоку індуктивної плазми зростає лінійно з 269 ТДж до 555 ТДж. При збільшенні індуктивності з 11,92 мкГн до 35,76 мкГн, внутрішня енергія потоку індуктивної плазми знижується з 269 ТДж до 89 ТДж. Плазмові потоки руйнують ГП термічною та субрезонансною складовою, впливаючи на координаційне число та внутрішню енергію зв'язків кристалічних

структур ГП. Запропоновано математичну модель, яка враховує залежність модулю пружності I роду від координаційного числа та внутрішньої енергії зв'язків кристалічних структур ГП,  $E_0$ , Па:

$$E_0 = (Z \cdot \hbar \cdot \sum \varepsilon_i / \hbar \cdot m \cdot c)^2 \cdot \rho, \quad (2)$$

де  $Z$  – координаційне число кристалічних решіток,  $\hbar$  – постійна Дірака, Дж·с;  $\varepsilon_i$  – енергія зв'язків елементів, Дж;  $h$  – постійна Планка, Дж·с,  $m$  – маса елементарних частинок, кг;  $c$  – швидкість світла, м/с;  $\rho$  – щільність гірської породи, кг/м<sup>3</sup>.

Результати розрахунків модулю пружності I роду на рівні кристалічних структур та порівняння значень із табличними у таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняння модулю пружності I роду

Структура	Модуль пружності I роду розрахунковий, ГПа	Модуль пружності I роду кадастрове значення, ГПа	Похибка, %
Гематит	191,5	207,9	7,8
Кварц	107,0	101,0	5,9
Кальцит	71,5	56,9 – 88,3	-
Магнезит	45,7	44,1	6,4

Запропонована модель (2) дозволяє визначити енергетичний потенціал кристалічних структур для його вивільнення та направлення на руйнування ГП. Методика визначення енергії зв'язків структур відповідає наближенням зонної

теорії, коли багатоелектронні системи зводяться до одноелектронних. Поєднано зонну із квантовою теорією поля та хімічною теорією зв'язку. Враховано необхідність направлених зв'язків (класична хімія) із наявністю відокремлених електронів (фізика), що відповідають за гальванічні властивості (енергія зв'язків, кругова частота власних коливань структури). Запропонована модель (2) відрізняється від відомих тим, що:

- визначає енергетичний потенціал кристалічних структур;
- враховує вплив параметрів кристалічної структури на модуль пружності I роду;
- визначає квадратичну залежність модулю пружності I роду від внутрішньої енергії кристалічних структур;
- за координаційним числом враховує тип кристалічної структури;
- узгоджує модуль пружності I роду із даними з кадастру фізичних властивостей гірських порід.

За базову модель модулю пружності I роду після плазмового руйнування прийнято модель електротермічного впливу на гірську породу Додіса Я.М., Е<sub>к</sub>, Па:

$$E_k = \frac{124 \cdot t \cdot \sigma_p \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{(1-\nu) \cdot V_{\text{пор}} \cdot \kappa_{\text{пл}}}{R}}}{\alpha \cdot [L \cdot I_m^2 + C \cdot U_a^2] \cdot \ln R}, \quad (3)$$

де  $t$  – час прикладеного навантаження, с;  $\sigma_p$  – міцність породи на розрив, Па;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона, в.о.;  $V_{\text{пор}}$  – об'єм зразка ГП, що руйнується, м<sup>3</sup>;  $\kappa_{\text{пл}}$  – коефіцієнт пластичності, в.о.;  $R$  – радіус розігрітого зразка, м;  $\alpha$  – коефіцієнт лінійного теплового розширення, К<sup>-1</sup>;  $L$ ,  $I_m$ ,  $C$ ,  $U_a$  – індуктивність, сила струму, ємність, напруга, відповідно, Гн, А, Ф, В.

Запропоновано модель модулю пружності I роду, яка враховує параметри кристалічних структур (параметр кристалічної структури, власна частота коливань, внутрішня енергія кристалічних структур) та параметри плазмового навантаження (власна частота коливань елементарних частинок, концентрація потоку плазми), Е<sub>к</sub>, Па:

$$E_k = \frac{496 \cdot t \cdot \varepsilon_{\text{пор}} \cdot p \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{(1-\nu) \cdot V_{\text{пор}} \cdot \kappa_{\text{пл}}}{R}} \cdot \left( 4144,1526 \cdot 1,9584^{\ln(L)} \right) \cdot (9,0295 \cdot \ln(I_m) - 17,8055)}{\omega_{\text{пор}} \cdot h \cdot a_{\text{кр}} \cdot \delta_m^2 \cdot \alpha \cdot [L \cdot I_m^2 + (C_m \cdot U_a \cdot \omega)^2 \cdot L]} \cdot N_{\text{пл}} \cdot \ln R}, \quad (4)$$

де  $\varepsilon_{\text{пор}} = Z \cdot \sum \varepsilon_i$  – внутрішня енергія кристалічної структури, Дж;  $Z$  – координаційне число кристалічної структури, в.о.;  $\varepsilon_i$  – енергія зв'язків елементів, Дж;  $p$  – тиск оточуючого середовища, Па;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона, в.о.;  $V_{\text{пор}}$  – об'єм зразка ГП, що руйнується, м<sup>3</sup>;  $\kappa_{\text{пл}}$  – коефіцієнт пластичності, в.о.;  $R$  – радіус розігрітого зразка, м;  $\omega_{\text{пор}}$  – кругова частота власних коливань кристалічних структур, с<sup>-1</sup>;  $h$  – постійна Планка, Дж·с;  $a_{\text{кр}}$  – параметр кристалічної решітки, м;  $\delta_m$  – діаметр мотивної одиниці структури, м;  $\alpha$  – коефіцієнт

лінійного теплового розширення,  $K^{-1}$ ;  $L$ ,  $Im$ ,  $C_M$ ,  $U_a$ ,  $\omega$  – індуктивність, сила струму, ємність міжвиткова, напруга, кругова частота відповідно,  $\Gamma_n$ ,  $A$ ,  $\Phi$ ,  $B$ ,  $s^{-1}$ ;  $N_{пл}$  – концентрація потоків індуктивної плазми,  $m^{-3}$ .

Вперше запропонована модель (4) відрізняється від відомих тим, що враховує:

- енергетичний вплив кристалічних структур на параметр міцності при ослабленні їх потоком індуктивної плазми;
- залежність модулю пружності I роду від параметрів технологічних, потоку плазми, кристалічних структур;
- коригуючі функції двокомпонентної системи зміни індуктивності та сили струму;
- внутрішні і зовнішні джерела енергії при руйнуванні кристалічних структур потоком індуктивної плазми.

При ослабленні кристалічних структур враховано явище анізотропії, моделюванням нелінійності процесу анізотропії у програмному модулі LabView. Визначено, що коефіцієнт анізотропії параметру кристалічних структур, рівний 7,2 %.

Відношення початкового модулю пружності I роду структури,  $\Gamma_{Па}$ , до і після руйнування,  $E_0$ ,  $E_k$ , відповідно, забезпечує врахування показника міцності при визначенні питомої енергоємності плазмо–механічного руйнування,  $A_v$ ,  $Дж/м^3$ :

$$A_v = \frac{P_c \cdot t \cdot m \cdot c}{Z \cdot \sum \varepsilon_i \cdot V_{пор} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{E_a}}} + \frac{P \cdot t}{V_{пор} \cdot \frac{E_0}{E_k}}, \quad (5)$$

де  $P_c$  – потужність механічного станка, Вт;  $t$  – час впливу потоків індуктивної плазми на кристалічну структуру, с;  $m$  – маса елементарних частинок, кг;  $c$  – швидкість світла, м/с;  $Z$  – координаційне число кристалічних решіток, в.о.;  $\varepsilon_i$  – енергія зв'язків елементів, Дж;  $V_{пор}$  – об'єм зразка ГП, що руйнується,  $m^3$ ;  $\rho$  – щільність гірської породи,  $кг/м^3$ ;  $E_a$  – модуль пружності I роду на момент руйнування,  $\Gamma_{Па}$ ;  $P$  – потужність експериментального стенду, Вт,  $E_0$ ,  $E_k$  – модуль пружності I роду до та після плазмового руйнування, відповідно,  $\Gamma_{Па}$ .

Запропонована модель визначає:

- вплив за унімодальним розподілом сили струму та індуктивності БПР на питому енергоємність руйнування кристалічних структур;
- енергетичний потенціал кристалічних структур до руйнування потоком індуктивної плазми, який виражений енергією зв'язків та типом кристалічних структур;
- вплив показників потоку плазми (концентрацію, радіус, довжину) на параметри кристалічних структур (кругову частоту власних коливань, внутрішню енергію, параметр кристалічної структури, діаметр мотивної одиниці структури), що дозволило встановити зв'язок фізичних показників із технологічними;
- коригуючі функції зміни індуктивності та сили струму;
- вплив внутрішніх і зовнішніх джерел енергії при ослабленні кристалічних структур потоком індуктивної плазми на питому енергоємність руйнування.

Для найміцнішого із зразків – гематиту, питома енергоємність плазмо–механічного руйнування СБШ–250 знизилась:

- з 0,575 ГДж/м<sup>3</sup> до 0,414 ГДж/м<sup>3</sup> при збільшенні сили струму до 10 А;
- з 0,575 ГДж/м<sup>3</sup> до 0,355 ГДж/м<sup>3</sup> при збільшенні індуктивності до 35,76 мкГн.

При збільшенні сили струму до 8 А або при збільшенні індуктивності до 11,92 мкГн, питома енергоємність плазмо–механічного руйнування кварциту та магнезиту зростає через зміцнення структур, що пояснюється їх кристалізацією. При силі струму більше 8 А, індуктивності більше 11,92 мкГн, руйнуються міцні фракції кристалічних структур.

У **ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛІ** виконана експериментальна апробація технології плазмо–механічного руйнування гірських порід. В якості зразків для проведення експериментальних досліджень прийнято гематит, кварц, кальцит, магnezит. Підготовка шліфів перелічених зразків, відбувалась із використанням системи шліфування PetroThin, Buehler. Залежність глибини відбитку від сили вдавлювання індентора неруйнуючим впливом перевірялась за допомогою мікротвердоміру Larey technologys (МН–ІІ). Зовнішній вплив потоків індуктивної плазми на досліджувані структури аналізувався за допомогою растрового електронного мікроскопу РЕМ–106И.

На рисунку 3 наведено ослаблення гематиту потоками індуктивної плазми, збільшення  $\times 1000$  крат, відповідно.

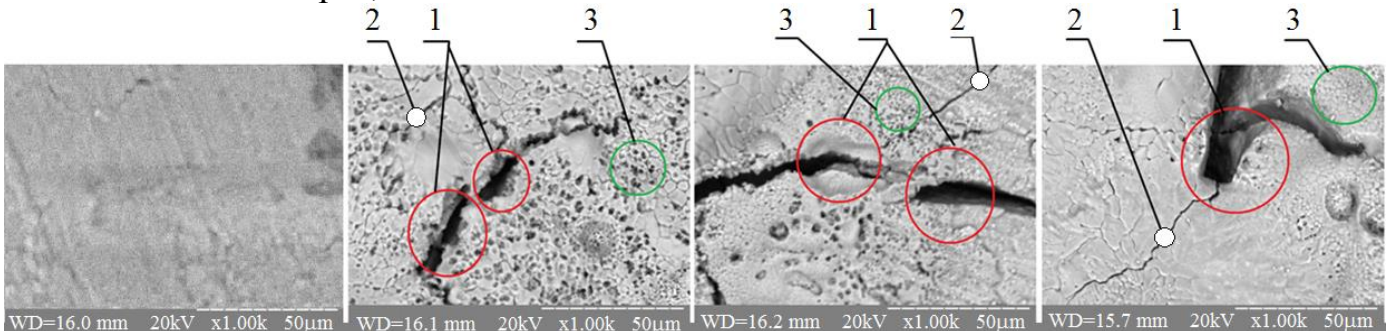


Рисунок 3 – Поверхня гематиту до та після руйнування плазмою, збільшення  $\times 1000$  крат, зліва праворуч: фрагменти 1й – до руйнування; 2й та 3й – сила струму 10 А, індуктивність 11,92 мкГн; 4й – сила струму 8 А, індуктивність 35,72 мкГн, де 1 – каверни ліній впливу субрезонансної складової, 2 – струмкові тріщини, 3 – кратери, як результат впливу температурної складової

На фрагментах растровим мікроскопом РЕМ–106И зафіксована нерівномірна зміна геометрії поверхні. На зразках зафіксована поява кратерів 3 овальної та круглої форм, діаметром від 50 мкм до 250 мкм. Це пояснюється дією температурної складової каналу індуктивної плазми. Зафіксовано каверни 1 товщиною від 25 мкм до 150 мкм від впливу субрезонансної складової потоку індуктивної плазми. Через руйнування когезійних зв'язків, частина структур випарувалась. Від кінців каверн по поверхні розходяться струмкові тріщини 2. Вони поширюють концентровану у вершинах внутрішню енергію. Таким чином, додається штучна дефектність до існуючої природної. По берегах тріщини спостерігаються кратери круглої форми 3, діаметром до 5 мкм. Вони утворилися внаслідок впливу температурної складової потоку індуктивної плазми на верхній шар гематиту. При ослабленні кристалічних структур потоком індуктивної плазми спостерігається вплив двох типів:

- температурний – передається кінетична енергія потоку індуктивної плазми і поширюється у кристалічних структурах гематиту;
- субрезонансний – вивільнюється внутрішня енергія кристалічних структур при субрезонансних коливаннях потоку індуктивної плазми.

Аналогічно, на рисунках 4 – 6 наведено поверхні кварцу, кальциту та магнезиту після руйнування їх потоками індуктивної плазми.

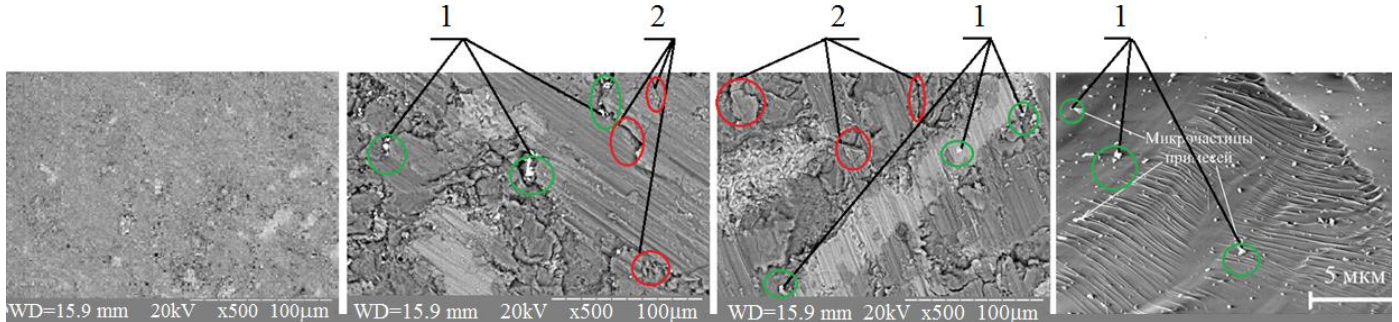


Рисунок 4 – Поверхня кварцу до та після руйнування плазмою, збільшення  $\times 500$  крат, зліва праворуч: фрагменти 1й – до руйнування; 2й – сила струму 10 А, індуктивність 11,92 мкГн; 3й – сила струму 8 А, індуктивність 35,72 мкГн, 4й – збагачений кварц потоком плазми у газі (відомі дослідження), де 1 – вихід на поверхню мікродомішок під впливом температурної складової, 2 – каверни від впливу субрезонансної складової

Підтверджено, що під впливом температурної складової потоку плазми виникає вихід на поверхню мікродомішок 1 на фрагментах 2 – 4, рисунок 4. Проведено порівняння з результатами дослідження інших авторів – фрагмент 4й, поверхня кварцу при руйнуванні його потоком плазми у газі. На другому і третьому фрагментах спостерігаються аналогічні утворення при ослабленні структур індуктивною плазмою. Це підтверджує внесення штучних дефектностей при виході зі структури домішкових фракцій. На четвертому фрагменті відсутній субрезонансний вплив. На другому і третьому фрагментах виникли каверни 2. Їх товщина знаходиться у межах 2 мкм, що до 100 разів менше, ніж на зразках гематиту. Це пояснюється меншою на 2 порядки кількістю природної дефектності.

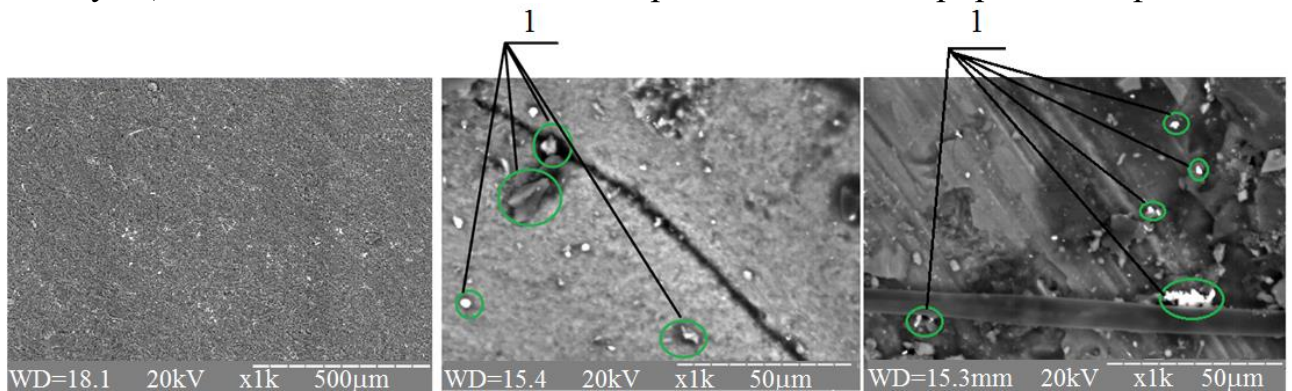


Рисунок 5 – Поверхня кальциту до та після руйнування плазмою, збільшення  $\times 1000$  крат, зліва праворуч: фрагменти 1й – до руйнування; 2й – сила струму 10 А, індуктивність 11,92 мкГн; 3й – сила струму 8 А, індуктивність 35,72 мкГн; де 1 – вихід на поверхню мікродомішок під впливом температурної складової

Під впливом температурної складової потоку плазми спостерігається вихід на поверхню мікродомішок 1. Це відбувається внаслідок руйнування слабких фракцій. При підвищенні сили струму до 8 А, шарніроподібні кристалічні структури розширюються. При цьому змінюється міра ангармонізму міжатомних коливань слабких фракцій. Параметр кристалічної решітки зростає до 0,5 % через розширення кристалічних структур, при розтягненні їх зв'язків. Кристалічна структура зміцнюється через зниження концентрації дефектних структур і збільшення концентрації міцних фракцій.

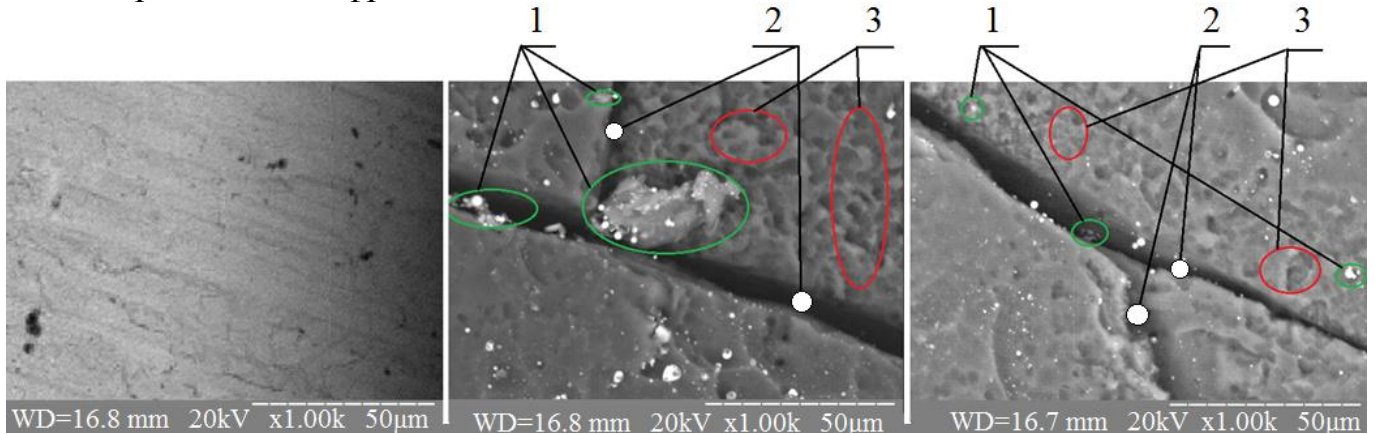


Рисунок 6 – Поверхня магнезиту до та після руйнування плазмою, збільшення  $\times 1000$  крат, зліва праворуч: фрагменти 1й – до руйнування; 2й – сила струму 10 А, індуктивність 11,92 мкГн; 3й – сила струму 8 А, індуктивність 35,72 мкГн; де 1 – вихід на поверхню мікродомішок під впливом температурної складової, 2 – магістральні тріщини від впливу субрезонансної складової потоку індуктивної плазми, 3 – кратери, як результат впливу температурної складової

Зафіксовано, що під впливом температурної складової потоку плазми виникає вихід на поверхню мікродомішок 1 на другому і третьому фрагментах, рисунок 6. Це відбувається внаслідок руйнування слабких фракцій після кристалізації магнезиту, що пояснюється внесенням штучних дефектностей при виході зі структури домішкових фракцій. На другому і третьому фрагментах виникли магістральні тріщини 2. Їх товщина не перевищує 10 мкм. Вони утворились внаслідок впливу субрезонансної складової потоку індуктивної плазми на кристалічні структури магнезиту. Зафіксоване виникнення кратерів 3 овальної форми діаметром до 10 мкм через дію температурної складової потоку плазми на поверхню.

Експериментально визначено приведений модуль пружності I роду зразків в області індентування, ГПа, до і після проведення серії дослідів відповідно до ISO 14577-1:2002 та ГОСТ Р 8.748-2011,  $E_r$ , ГПа:

$$E_r = (\sqrt{\pi}) / \left( 2 \cdot (dl/dF) \cdot \sqrt{A_p} \right), \quad (6)$$

де  $dl$  – видовження зразку, м;  $dF$  – сила, прикладена до зразку, Н;  $A_p$  – площа поперечного перетину контактної поверхні між індентором та зразком,  $m^2$ .

Площу індентора визначено непрямим методом. Для калібрування індентора використано зразок гематиту, який не був під впливом потоків індуктивної плазми.

За приведеним модулем пружності І роду визначено модуль пружності І роду зразка, відповідно до вимог ГОСТ Р 8.748–2011:

$$E = \left(1 - \nu_s^2\right) / \left( \left(1/E_r\right) - \left( \left(1 - \nu_i^2\right) / E_i \right) \right), \quad (7)$$

де  $\nu_s$  – коефіцієнт Пуассона зразка, в. о.;  $\nu_i$  – коефіцієнт Пуассона алмазного індентора, в. о.;  $E_i$  – модуль пружності І роду алмазного індентора, Па.

На рисунку 7 наведено характер зміни модулю пружності І роду при зміні сили струму та індуктивності, відповідно та їх порівняння із теоретичними значеннями.

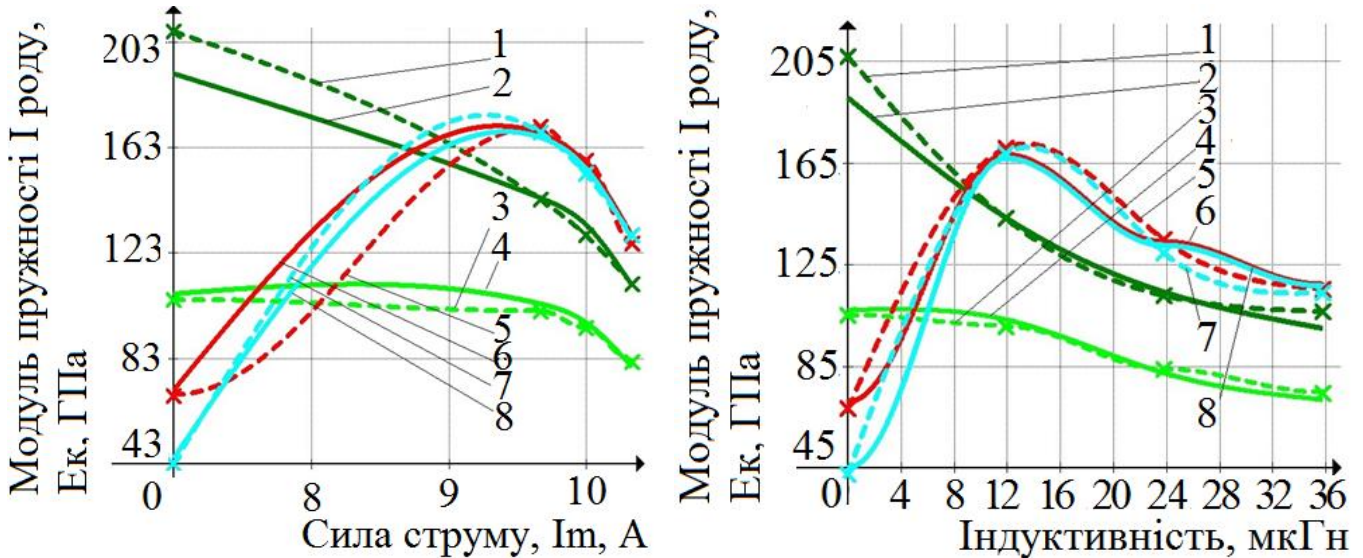


Рисунок 7 – Залежність модулю пружності І роду від сили струму (ліворуч) та індуктивності (праворуч), де 1, 2 – криві значень гематиту, 3, 4 – кварцу, 5, 6 – кальциту, 7, 8 – криві значень магnezиту теоретичних та експериментальних, відповідно

Для найміцнішого із зразків – гематиту, досягнуто двократне зниження модулю пружності І роду з 207,5 ГПа до 107,3 ГПа при збільшенні індуктивності до 35,76 мкГн та з 207,5 ГПа до 111,7 ГПа при підвищенні сили струму до 10 А. Похибка між експериментальними значеннями модулю пружності І роду та теоретично розрахованими до (3) та після (4) руйнування потоками індуктивної плазми не перевищує 7,7 %, що узгоджує експериментальні дані із аналітичними. Експериментально визначені значення модулю пружності І роду до та після руйнування потоками індуктивної плазми дозволяють проаналізувати питому роботу процесів знеміцнення мінералів за (5), А, кВт·год/м<sup>3</sup>.

Порівняння експериментальних та теоретичних значень залежності питомої енергоємності плазмо–механічного руйнування кристалічних структур потоками індуктивної плазми від зміни індуктивності та сили струму наведено на рисунку 8. Для порівняння значень питомої роботи плазмо–механічного руйнування із механічним обрано бурові станки СБШ–250 (через їх поширеність в Україні).

Зниження питомої енергоємності плазмо–механічного руйнування для гематиту та кварцу має спадний характер, рисунок 8. Питома енергоємність руйнування кальциту та магnezиту при підвищенні індуктивності до 11,92 мкГн,

збільшилась з  $0,565 \text{ ГДж/м}^3$  до  $0,720 \text{ ГДж/м}^3$  та з  $0,561 \text{ ГДж/м}^3$  до  $0,814 \text{ ГДж/м}^3$ , відповідно, рисунок 10. Міцні фракції починають руйнуватись при зростанні індуктивності з  $11,92 \text{ мкГн}$  до  $35,76 \text{ мкГн}$ . Питома енергоємність плазмо-механічного руйнування кальцитів та магнезитів знизилась на третину з  $0,720 \text{ ГДж/м}^3$  до  $0,592 \text{ ГДж/м}^3$  та з  $0,814 \text{ ГДж/м}^3$  до  $0,669 \text{ ГДж/м}^3$ , відповідно.

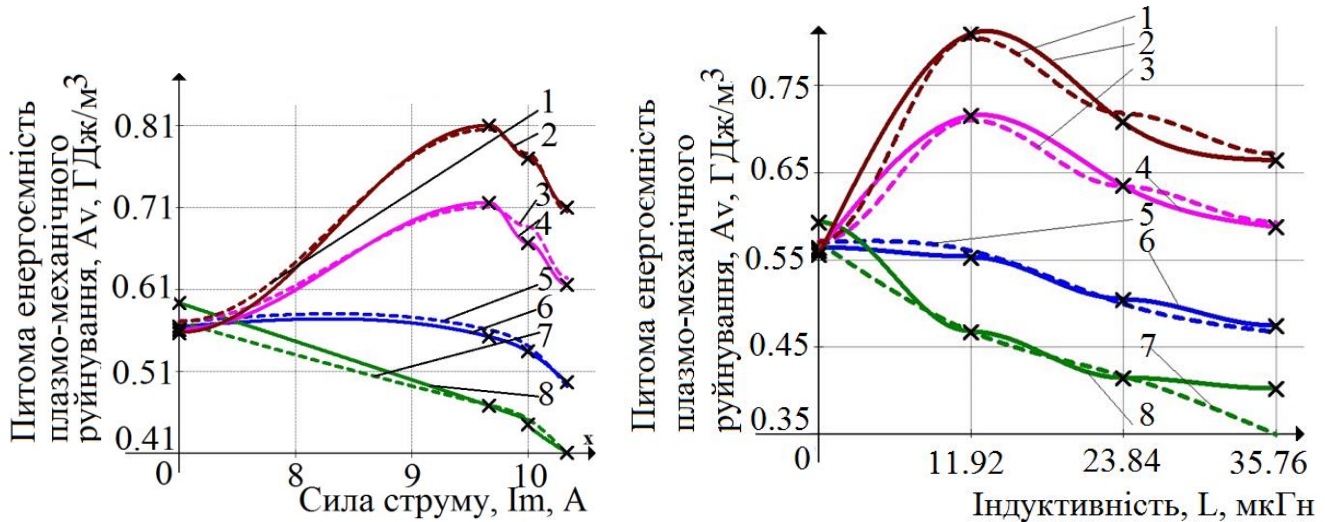


Рисунок 8 – Залежність питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування СБШ-250 від зміни сили струму (ліворуч) та індуктивності (праворуч), де 1, 2 – криві значень кальциту, 3, 4 –магнезиту, 5, 6 – гематиту, 7, 8 –кварцу теоретичних та експериментальних, відповідно

При підвищенні сили струму до  $10 \text{ А}$ , рисунок 8, відбулось зниження питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування для гематиту та кварцу, рисунок 8. Лінійно підвищується потужність електричної системи з  $2,490 \text{ кВт}$  до  $2,930 \text{ кВт}$ . Це викликає ослаблення структур. Питома енергоємність плазмо-механічного руйнування при цьому знижується з  $0,598 \text{ ГДж/м}^3$  до  $0,415 \text{ ГДж/м}^3$  та з  $0,569 \text{ ГДж/м}^3$  до  $0,501 \text{ ГДж/м}^3$ , відповідно. Це відбувається через внесення штучної дефектності до існуючої природної плазмовими субрезонансними навантаженнями.

Питома енергоємність руйнування кальциту та магнезиту при підвищенні сили струму до  $8 \text{ А}$ , збільшилась з  $0,565 \text{ ГДж/м}^3$  до  $0,720 \text{ ГДж/м}^3$  та з  $0,561 \text{ ГДж/м}^3$  до  $0,814 \text{ ГДж/м}^3$ , відповідно, рисунок 8, аналогічно як і при підвищенні індуктивності до  $11,92 \text{ мкГн}$ . При зростанні сили струму з  $8 \text{ А}$  до  $10 \text{ А}$ , питома енергоємність плазмо-механічного руйнування кальцитів та магнезитів знизилась до  $20 \%$  з  $0,720 \text{ ГДж/м}^3$  до  $0,620 \text{ ГДж/м}^3$  та з  $0,814 \text{ ГДж/м}^3$  до  $0,714 \text{ ГДж/м}^3$ , відповідно.

Визначено, що при руйнуванні структур з модулем пружності I роду від  $100 \text{ ГПа}$ , раціональним є використання плазмо-механічного руйнування із підвищенням сили струму до  $10 \text{ А}$  або підвищенням індуктивності до  $35,76 \text{ мкГн}$ . При цьому, зафіксовано залежність питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування гірських порід від модулю пружності I роду за розподілом із позитивною асиметрією при підвищенні індуктивності та із негативною асиметрією при підвищенні струму. Тому, збільшення індуктивності до  $35,76 \text{ мкГн}$  при бурінні вибухових свердловин є раціональним режимом плазмо-механічного навантаження. При руйнуванні структур з модулем пружності I роду нижче  $100 \text{ ГПа}$  не рекомендовано використовувати плазмо-механічне руйнування.

За швидкістю буріння, яка залежить від модулю пружності I роду, визначено залежність добової продуктивності буріння, що залежить від сили струму та індуктивності БПР,  $Q_{Т.ДОБ}$ , м/добу:

$$Q_{Т.ДОБ} = \frac{2,5 \cdot F_0 \cdot n_B}{0,05 \cdot (K_T \cdot (3 \cdot E \cdot \varepsilon) + \rho \cdot g) \cdot d_K^2 \cdot P_{ПИТ}} \cdot t_{ЗМІНИ}, \quad (8)$$

де  $F_0$  – осьове зусилля на долото, Н;  $n_B$  – швидкість обертання долота, м/год;  $K_T$  – коефіцієнт тріщинуватості гірської породи, в.о.;  $E$  – модуль пружності I роду, Па;  $\varepsilon$  – відносне видовження, в.о.;  $\rho$  – щільність гірської породи, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $d_K$  – діаметр свердловини, м;  $P_{ПИТ}$  – тиск на поверхню ґрунту, Па;  $t_{ЗМІНИ}$  – час робочої зміни, год.

Модель (8) відрізняється від існуючих тим, що:

- враховує використання індуктивної плазми та суміщення у часі плазмового руйнування із механічним;
- встановлює залежність продуктивності буріння від сили струму та індуктивності блоку плазмового руйнування, що має пропорційний характер.

За (8) визначено експериментальні значення добової продуктивності плазмо–механічного руйнування та порівняно із теоретичними. При підвищенні сили струму до 10 А, добова продуктивність СБШ–250 при руйнуванні гематитів зростає на 52 % з 14,32 м/добу до 21,86 м/добу. Це пов'язано із зниженням модулю пружності I роду через знеміцнення гірської породи плазмовою складовою. При підвищенні індуктивності до 35,76 мкГн, добова продуктивність СБШ–250 при руйнуванні гематитів зростає на 56 % з 14,32 м/добу до 22,39 м/добу. При руйнуванні кварцу, добова продуктивність СБШ–250 зростає аналогічно з 2,68 м/добу до 3,43 м/добу при підвищенні сили струму до 10 А, та з 2,68 м/добу до 3,74 м/добу при підвищенні індуктивності до 35,76 мкГн. При підвищенні сили струму до 10 А та індуктивності до 35,76 мкГн, добова продуктивність руйнування кальцитів та магнезитів знижується більше ніж на 30 %.

Похибка між експериментальними та теоретичними значеннями не перевищує 8 %. Тому, результати математичного моделювання є адекватними реальним значенням.

**У П'ЯТОМУ РОЗДІЛІ** наведені результати промислової апробації плазмо–механічної технології руйнування гірських порід. Вона відбулася на Пинязевицькому кар'єрі, поблизу смт. Гранітне, Житомирська обл. в період з 14.07.2015 до 28.09.2015 року.

Плазмо–механічне руйнування гірських порід реалізоване коронкою модифікованою. Вона використана для бурового станка типу Sorco Roc L8 на кар'єрі, яка з 2004 року прийнята на баланс кар'єру, рисунок 9. Гірські породи кар'єру представлені рапаківіподібними гранітами із переважаючою ортоклазною складовою. Склад гранітів визначено методом електронної мікроскопії. Для цього використано растровий електронний мікроскоп РЕМ–106И, точність якого до 10 нм забезпечується взаємодією потоку електронів з поверхнею зразка.

Підготовка шліфів зразків граніту проведена із використанням установки шліфування PetroThin, Buehler, що обладнана системою контролю зрізу із точністю до 0,01 мкм.



Рисунок 9 – Удосконалення технології плазмо–механічного руйнування гірських порід: 1 – вставки твердосплавні, 2 – дроти у високовольтній оплітці, 3 – продувний канал, 4 – коронка бурова модифікована, 5 – реєстратор потужності АКТАКОМ АСМ 3192, 6 – кабелі живлення 0,4 кВ, 7 – клєми вимірювачів напруги, 8 – дисплей виводу даних, 9 – клєми струмовимірюючих клєщів

Експериментальні значення модулю пружності I роду для граніту до і після плазмо–механічного руйнування зведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Визначення модулю пружності I роду непрямим методом

Модуль пружності I роду структури до руйнування		Модуль пружності I роду граніту після плазмового руйнування			
Експериментальне значення	Кадастрове значення	Модуль пружності I роду, ГПа	Сила струму, А	Модуль пружності I роду, ГПа	Індуктивність, мкГн
Граніт					
48,8	46,0	52,0	8	52,0	11,92
		44,8	9	46,0	23,84
		38,0	10	41,0	35,76

Різниця між експериментальним 48,8 ГПа та кадастровим 46,0 ГПа значеннями модулю пружності I роду 6 % пояснюється анізотропією та неоднорідністю гірських порід.

В результаті промислової апробації плазмо–механічної технології руйнування ГП, забезпечено виникнення субрезонансних явищ між коливаннями потоків індуктивної плазми та кристалічними структурами. При проведенні промислової апробації плазмо–механічного руйнування ГП підтверджено зниження модулю пружності I роду для гранітів з:

- 48,8 ГПа до 41,0 ГПа пропорційно підвищенню індуктивності до 35,76 мкГн;
- 48,8 ГПа до 38,0 ГПа пропорційно підвищенню сили струму до 10 А. (вимірювання за «ДСТУ 2825–94 Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять»).

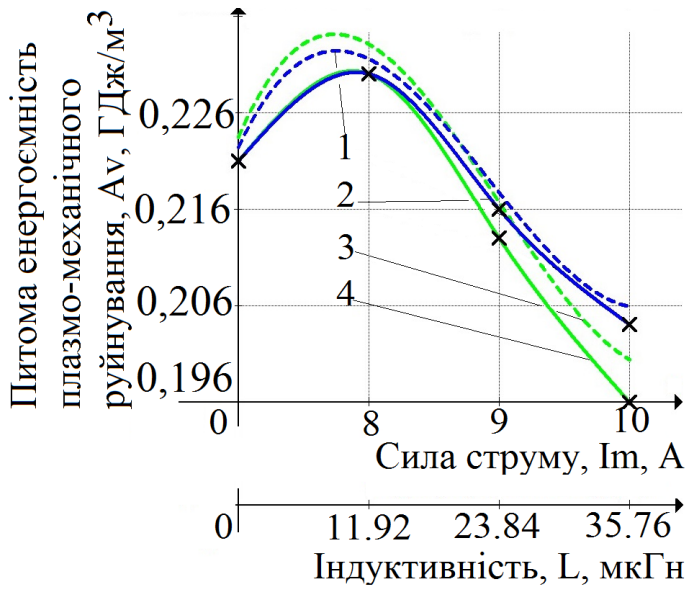


Рисунок 10 – Зниження питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування при зміні індуктивності (1, 2 – теоретична та експериментальна криві, відповідно) та сили струму (3, 4 – теоретична та експериментальна криві, відповідно)

Питома енергоємність руйнування ГП при зміні сили струму на 1,91 кВт·год/м<sup>3</sup> більша ніж при зміні індуктивності, через збільшення активної складової енергії з 2,490 кВт до 2,930 кВт, розділ 4. До таблиці 3 зведено результати промислової апробації плазмо-механічного руйнування на базі бурового станка Atlas Corco L8.

Таблиця 3 – Результати промислової апробації плазмо-механічного руйнування на базі бурового станка Atlas Corco L8

Параметр	Механічне руйнування	Плазмо-механічне руйнування	
		Індуктивність 35,76 мкГн	Сила струму 10 А
Потужність бурового станка, кВт	317	319	320
Швидкість буріння свердловини, м/хв	0,334	0,370	0,370
Радіус свердловини, мм	152	152	152
Питома енергоємність бурового станка, кВт·год/м <sup>3</sup>	61,38	54,69	56,60
Питома енергоємність бурового станка, ГДж/м <sup>3</sup>	0,220	0,196	0,204
Річна продуктивність бурового станка, м/рік	7 720	9 100	9 770
ККД бурового станка, %	81	83	82

Розрахунковий річний економічний ефект від промислової апробації відповідно до Методики визначення економічної ефективності використання в народному господарстві нової техніки, винаходів і раціоналізаторських пропозицій складає 1 577 800 грн. Очікуваний термін окупності промислової апробації плазмо-механічного руйнування – 0,572 роки (7 місяців).

На рисунку 10 наведено порівняння розрахункових та експериментальних значень зниження питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування ГП.

Знеміцнення ГП плазмовим потоком знизило питому енергоємність руйнування гранітів на 10,8 % з 0,220 ГДж/м<sup>3</sup> до 0,196 ГДж/м<sup>3</sup> (з 61,38 кВт·год/м<sup>3</sup> до 54,69 кВт·год/м<sup>3</sup>). Зниження питомої енергоємності руйнування гранітів досягнуто підвищенням індуктивності до 35,76 мкГн і незмінній потужності електричної системи плазмового ослаблення 2,490 кВт. Потужність виміряно аналізатором потужності АКТАКОМ АСМ-3192. При збільшенні сили струму до 10 А, питома енергоємність руйнування граніту аналогічно знижується пропорційно до збільшення сили струму на 7 % з 0,220 ГДж/м<sup>3</sup> до 0,204 ГДж/м<sup>3</sup> (з 61,38 кВт·год/м<sup>3</sup> до 56,60 кВт·год/м<sup>3</sup>).

## ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій вирішена актуальна нова науково-технічна задача із удосконалення технології плазмо-механічного руйнування гірських порід для зниження енергоємності руйнування гірських порід сумісними механічним та плазмовим навантаженнями, що є важливим для подальшого розвитку ресурсозберігаючих технологій відкритої розробки родовищ корисних копалин.

Найбільш важливі наукові та практичні результати, отримані в ході виконання роботи:

1. Встановлено зміну модулю пружності I роду за квадратичною залежністю від енергії молекулярних зв'язків кристалічних структур, що дозволило оцінити енергетичний потенціал гірських порід.

2. Визначено залежності питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування гірських порід від індуктивності за унімодальним розподілом із позитивною асиметрією та від сили струму за унімодальним розподілом із негативною асиметрією, що дозволило обрати раціональний режим комбінованого навантаження гірських порід при відкритій розробці родовищ корисних копалин.

3. Розроблено математичну модель питомої енергоємності плазмо-механічного руйнування гірських порід, яка відрізняється від відомих тим, що враховує потужність плазмового індуктивного навантаження.

4. Підвищено продуктивність плазмо-механічного буріння вибухових свердловин до 26 % пропорційно збільшенню сили струму та індуктивності блоку плазмового руйнування за рахунок сумісного у часі комбінованого навантаження на гірську породу.

5. Знижено питому енергоємність плазмо-механічного руйнування гранітів:

– на 10,8 % з 0,220 ГДж/м<sup>3</sup> до 0,196 ГДж/м<sup>3</sup> (з 61,38 кВт·год/м<sup>3</sup> до 54,69 кВт·год/м<sup>3</sup>) пропорційно підвищенню індуктивності до 35,76 мкГн;

– на 7,0 % з 0,220 ГДж/м<sup>3</sup> до 0,204 ГДж/м<sup>3</sup> (з 61,38 кВт·год/м<sup>3</sup> до 56,60 кВт·год/м<sup>3</sup>) пропорційно підвищенню сили струму до 10 А.

6. Використано сукупність енергії зовнішніх навантажень із внутрішньою енергією середовища, що сприяло підвищенню ККД руйнування гірських порід модифікованим ріжучим інструментом Atlas Copco L8 з 81 % до 83 % за рахунок попереднього ослаблення гірських порід плазмовими навантаженнями.

7. Розроблено методику розрахунку та вибору параметрів плазмо-механічного руйнування гірських порід, що дозволила визначити питому енергоємність комбінованого буріння вибухових свердловин із врахуванням потужності плазмового індуктивного навантаження.

8. Річний економічний ефект від впровадження плазмо-механічного руйнування гірських порід в умовах Пинязевецького кар'єру досягає 1 577 800 грн. Розрахунковий термін окупності впровадження удосконаленої технології плазмо-механічного руйнування гірських порід складає 7 місяців.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових фахових виданнях:*

1. Terentiev O. Mathematical representation of compaction core height when medium crystal structure failure [Text] / O. Terentiev, A. Kleshchov // HERALD of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute». Series of Mining: Collection of scientific works. – 2012. – №22. – P. 16–25. (включений до міжнародних баз даних: Google Scholar, Open Academic Journals Index (OAJI), CiteFactor, ResearchBib, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), OpenAIRE, Universal Impact Factor (UIF)).

*Здобувачем запропоновано модель внутрішньої енергії власних кругових коливань кристалічних структур.*

2. Terentiev O. Features and disadvantages of fracture mechanics theories [Text] / O. Terentiev, A. Kleshchov // Journal “Nauka i Studia”. Series of Technical sciences. – 2014. – №14 (124). – P. 119–124. (включений до міжнародної бази даних eLibrary).

*Здобувачем визначено спільні недоліки відомих теорій руйнування.*

3. Терентьев О. М. Формирование комбинированного разрушения горных пород взрыво–механическими нагрузками [Текст] / О. М. Терентьев, П. А. Гонтарь, А. И. Клещёв // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2014. – №6 (89). – С. 131–136. (включений до міжнародних баз даних: Ulrich’s Web Global Serials Directory, eLibrary, Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Inspec, Open Academic Journals Index (OAJI), Google Scholar, CiteFactor, Scientific Indexing Services).

*Здобувачем обрано енергоощадний спосіб руйнування гірських порід.*

4. Терентьев О. М. Модель експериментальних досліджень руйнування породи індуктивною плазмою [Текст] / О. М. Терентьев, А. Й. Клещов // Науковий журнал «ЕНЕРГЕТИКА. Технологія, економіка, екологія». – 2014. – С. 51–54. (включений до міжнародних баз даних: Open Academic Journal Index (OAJI), WorldCat, BASE, Polska Bibliografia Naukowa, Academic Journal Index, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Infobase Index, Real Time Impact Factor).

*Здобувачем визначено адекватність регресійного рівняння.*

5. Терентьев О. М. Планування експерименту руйнування кристалічних структур потоками індуктивної плазми [Текст] / О. М. Терентьев, А. Й. Клещов, П. А. Гонтарь // Журнал «Вісник Тернопільського національного технічного університету». – 2015. – № 1 (77). – С. 134–142.

*Здобувачем визначено основні чинники планування експерименту.*

6. Terentiev O. Mechanism of creating the prefracture zone of rock formations with magnetic and hydrocavitation load [Text] / O. Terentiev, A. Kleshchov, I. Streltsova // Scientific and Technical Journal «Metallurgical and Mining Industry». – 2015. – № 4 (89). – P. 353–355. (включений до міжнародних баз даних: Scopus, Index Copernicus, eLibrary, Scientific Indexing Services, Academic Resource Index “ResearchBib”, WorldCat, Eurasian Scientific Journal Index, International Innovative Journal Impact Factor, UlrichsWeb).

*Здобувачем встановлено вплив субрезонансних явищ на кристалічні структури.*

7. Терентьев О. М. Влияние анизотропии на модуль Юнга при ослаблении кристаллических структур потоками индуктивной плазмы [Текст] / О. М. Терентьев, А. Й. Клещов // Научный журнал «Научно–техническая информация». – 2015. – № 4 (66). – С. 49–52.

*Здобувачем визначено вплив анизотропії гірських порід на модуль пружності І роду.*

8. Terentiev O. Subresonant load energy regulation when electrothermal rock fracturing [Text] / O. Terentiev, A. Kleshchov // HERALD of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute». Series of Mining. – 2015. – Issue. 29. – P. 10–18. (включений до міжнародних баз даних: Google Scholar, Open Academic Journals Index (OAJI), CiteFactor, ResearchBib, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), OpenAIRE, Universal Impact Factor).

*Здобувачем встановлено залежності внутрішньої енергії потоку індуктивної плазми від сили струму та індуктивності.*

#### **Патенти на корисну модель**

9. Система руйнування індуктивною плазмою [Текст] : пат. 27685 Україна: МПК Н 01 S 4/00, Е 21 В 41/00 / Терентьев О. М., ; винахідники і власники О. М. Терентьев, А. Й. Клещов. – № 2–19–14–4235–А ; заявл. 07.10.13 ; опубл. 10.02.14, Бюл. № 3. – 4 с.

*Здобувачем розроблено систему руйнування гірських порід індуктивною плазмою.*

#### **Тези доповідей**

10. Терентьев О. М. Руйнування молекулярних зв'язків гірських порід [Текст] / О. М. Терентьев, А. Й. Клещов // Матеріали науково–технічної конференції ІЕЕ НТУУ «КПІ». Зб. наук. праць «Енергетика. Екологія. Людина». – 2012. – С. 394–398.

*Здобувачем запропоновано модель переходу від класичних теорій руйнування до показника квантової механіки.*

11. Клещов А. Й. Проекція ансамблів геометрії ядра ущільнення на атомарну структуру середовища [Текст] / А. Й. Клещов // Матеріали міжнародної наукової конференції. Зб. наук. праць «Технологический аудит и резервы производства». – 2012. – №3/1 (5). – С. 25–26.

*Здобувачем запропоновано модель модулю пружності І роду.*

12. Kleshchov A. Internal energy resources excitation with the help of sub–resonant device based on the Tesla coil [Text] / A. Kleshchov // IX International Students Conference. Book of abstracts “Innovations in Science and Technology”. – 2012. – №9. – P. 67.

*Здобувачем визначено вплив субрезонансних плазмових потоків на гірські породи.*

13. Терентьев О. М. Модель возникновения ядра уплотнения в системе «Энергетический источник – среда» [Текст] / О. М. Терентьев, А. И. Клещёв // Международная научно–практическая конференция. Сб. науч. трудов «Badania naukowe. Teoria I praktyka». – 2012. – С. 67–78.

*Здобувачем встановлено вплив власної енергії кристалічних структур на міцність гірської породи.*

14. Терентьев О. М. Формування фемтоструктур ущільнення при руйнуванні кристалічного коливального середовища [Текст] / О. М. Терентьев, А. Й. Клещов // Матеріали науково–практичної конференції. Зб. наук. праць «Технологический аудит и резервы производства». – 2012. – Т.1, №6/1 (8). – С. 7–13.

*Здобувачем запропоновано математичну модель питомої енергоємності руйнування гірських порід.*

15. Terentiev O. Exact methods of linear programming for choosing rock failure conditions [Text] / O. Terentiev, A. Kleshchov // Materials of the International Scientific–Practical Conference “Theoretical and applied science”. – 2013. – №11. – P. 52–57.

*Здобувачем визначено домінуючі умови руйнування гірських порід.*

16. Терентьев О. М. Синтез умов вибору енергоощадної технології руйнування [Текст] / О. М. Терентьев, А. Й. Клещов // Международная научно–практическая и учебно–методическая конференция. Сб. науч. работ «Сталий енергетичний розвиток: Сучасні тенденції, технології та рішення». – 2014. – С. 51.

*Здобувачем методом синтезу обрано плазмо-механічне зовнішнє навантаження для руйнування гірських порід.*

17. Терентьев О. М. Модель експериментальних досліджень керованого електротермічного впливу індуктивною плазмою на породу [Текст] / О. М. Терентьев, А. Й. Клещов // Тези конференції «Другі аспірантські читання пам'яті д.т.н., проф. А. В. Праховника». – 16–17.04.2014. – С. 19–20.

*Здобувачем визначено необхідну кількість дослідів для експериментальних досліджень руйнування гірських порід плазмовими навантаженнями.*

18. Терентьев О. М. Снижение энергоёмкости разрушения ГП субрезонансными нагрузками [Текст] / О. М. Терентьев, А. И. Клещёв // Материалы VII международной научно–технической конференции ИЭЭ НТУУ «КПИ». Сб. науч. трудов «Энергетика. Экология. Человек.». – 2015. – С. 29–34.

*Здобувачем визначено залежність внутрішньої енергії кристалічних структур від енергетичних параметрів зовнішнього навантаження при руйнуванні гірських порід.*

19. Терентьев О. М. Обгрунтування параметрів плазмо–механічного руйнування гранітів [Текст] / О. М. Терентьев, А. Й. Клещов // Матеріали VIII міжнародної науково–технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина», Зб. наук. праць «Перспективи розвитку гірничої справи і підземного будівництва». – Випуск № 7. – 1–3.06.2016. – С. 6–11.

*Здобувачем обгрунтовано параметри плазмо-механічного руйнування рапаківіподібних гранітів.*

## АНОТАЦІЯ

**Клещов А. Й. Удосконалення технології плазмо–механічного руйнування гірських порід. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.03 – відкрита розробка родовищ корисних копалин. –

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2017 р.

Дисертація направлена на удосконалення технології плазмо–механічного руйнування гірських порід внесенням штучної дефектності до існуючої природної.

В результаті роботи встановлено зміну модулю пружності I роду за квадратичною залежністю від енергії молекулярних зв'язків кристалічних структур, що дозволило оцінити енергетичний потенціал гірських порід. Визначено залежності питомої енергоемності плазмо-механічного руйнування гірських порід від індуктивності за унімодальним розподілом із позитивною асиметрією та від сили струму комбінованого навантаження за унімодальним розподілом із негативною асиметрією, що дозволило обрати раціональний режим комбінованого навантаження гірських порід.

Досягнуто зниження питомої енергоемності руйнування гранітів на Пинязевицькому кар'єрі модернізованим буровим станком Sorco ROC L8 на 11 % з 61,38 кВт·год/м<sup>3</sup> до 54,69 кВт·год/м<sup>3</sup>. Зафіксовано фізичний ефект, виражений у попередньому ослабленні алевролітів та пісковиків на ДП «Волиньвугілля» ВП «Шахта Бужанська». Модуль пружності I роду алевролітів при використанні блоку плазмового руйнування знизився з 30,5 ГПа до 11,7 ГПа, пісковиків – з 15,0 ГПа до 4,5 ГПа. Річний економічний ефект від впровадження плазмо–механічного руйнування гірських порід в умовах Пинязевицького кар'єру досягає 1 577 800 грн. Розрахунковий термін окупності впровадження удосконаленої технології плазмо–механічного руйнування гірських порід складає 7 місяців.

**Ключові слова:** технологія плазмо–механічного руйнування, руйнування гірських порід, питома енергоемність, кристалічна структура.

## АННОТАЦІЯ

**Клещёв А. И. Усовершенствование технологии плазменно-механического разрушения горных пород. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.03 - открытая разработка месторождений полезных ископаемых. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2017

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой решена актуальная новая научно-техническая задача по усовершенствованию технологии плазменно-механического разрушения горных пород для снижения энергоемкости разрушения горных пород совместимыми механическим и плазменным нагрузками, что важно для дальнейшего развития ресурсосберегающих технологий открытой разработки месторождений полезных ископаемых.

Поставлены задачи:

1. Теоретическое обобщение и новое решение актуальной научно-технической задачи определения характера зависимости прочностных параметров горных пород от энергии молекулярных связей их кристаллических структур.

2. Установление зависимости удельной энергоемкости плазменно-механического разрушения горных пород от изменения модуля упругости I рода.

3. Определение изменения производительности бурения взрывных скважин при регулировании режимов плазменно-механической нагрузки.

4. Разработка методики расчета и выбора параметров плазменно-механического разрушения горных пород.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые:

- установлено изменение модуля упругости I рода по квадратичной зависимости от энергии молекулярных связей кристаллических структур, что позволило оценить энергетический потенциал горных пород;
- определены зависимости удельной энергоемкости плазменно-механического разрушения горных пород по унимодальному распределению с положительной асимметрией от индуктивности и с отрицательной асимметрией от силы тока, что позволило выбрать оптимальный режим комбинированной нагрузки горных пород;
- повышена производительность плазменно-механического бурения взрывных скважин до 26 % пропорционально увеличению силы тока и индуктивности блока плазменного разрушения за счет совместной во времени комбинированной нагрузки на горную породу;
- разработана математическая модель удельной энергоемкости плазменно-механического разрушения, которая отличается от известных тем, что учитывает мощность плазменной индуктивной нагрузки.

В результате апробации:

Во время апробации результатов диссертационного исследования было достигнуто снижение удельной энергоемкости разрушения гранитов на Пинязевицком карьере модернизированным буровым станком Corco ROC L8 на 11 % с 61,38 кВт·ч/м<sup>3</sup> до 54,69 кВт·ч/м<sup>3</sup>. Зафиксировано физический эффект, выраженный в предыдущем ослаблении алевролитов и песчаников на ГП «Волыньуголь» УШ «Шахта Бужанская». Модуль упругости I рода алевролитов при использовании блока плазменного разрушения снизился с 30,5 ГПа до 11,7 ГПа, песчаников - с 15,0 ГПа до 4,5 ГПа. Результаты исследований внедрены в учебный процесс Государственным высшим учебным заведением «Киевский электромеханический колледж». Разработана методика расчета и выбора параметров плазменно-механического разрушения горных пород, которая позволила определить удельную энергоемкость бурения взрывных скважин с учетом мощности плазменной индуктивной нагрузки.

Снижена удельная энергоемкость плазменно-механического разрушения гранитов:

- на 10,8 % с 0,220 ГДж/м<sup>3</sup> до 0,196 ГДж/м<sup>3</sup> (с 61,38 кВт·ч/м<sup>3</sup> до 54,69 кВт·ч/м<sup>3</sup>) пропорционально повышению индуктивности до 35,76 мкГн;
- на 7,0 % с 0,220 ГДж/м<sup>3</sup> до 0,204 ГДж/м<sup>3</sup> (с 61,38 кВт·ч/м<sup>3</sup> до 56,60 кВт·ч/м<sup>3</sup>) пропорционально повышению силы тока до 10 А.

Использованы совокупность энергии внешних нагрузок с внутренней энергией среды, способствующие повышению КПД разрушения горных пород модифицированным режущим инструментом Atlas Corco L8 с 81 % до 83 % за счет предварительного ослабления горных пород плазменными нагрузками.

Разработана методика расчета и выбора параметров плазменно-механического разрушения горных пород.

Годовой экономический эффект от внедрения плазменно-механического разрушения горных пород в условиях Пинязевицком карьере достигает 1 577 800 грн. Расчетный срок окупаемости внедрения усовершенствованной технологии плазменно-механического разрушения горных пород составляет 7 месяцев.

**Ключевые слова:** технология плазменно-механического разрушения, разрушения горных пород, удельная энергоёмкость, кристаллическая структура.

#### ABSTRACT

**A. Kleshchov. Improving technology of plasma-mechanical rock fracture. – Manuscript.**

Thesis for a candidate degree in technical sciences (comparable to the Academic Degree of Doctor of Philosophy), specialty 05.15.03 – opencast mining operation. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

The thesis is aimed at improving technology of plasma-mechanical rock fracture by adding artificial flaws to the existing natural ones. As a result, it was determined that I type elastic modulus changes in accordance with quadratic dependence on energy of molecular bonds of crystalline structures. That allowed to assess rock energy potential. Furthermore, there were determined dependencies of plasma-mechanical rock fracture energy density on inductance in accordance with unimodal distribution with positive skewness, as well as on current intensity of combined load in accordance with unimodal distribution with negative skewness. That allowed to select an efficient mode of rock combined loading. There was achieved a decrease of energy density as to fracturing granites at “Pyniazevytskyi Quarry” using modernized drilling machine Copco ROC L8 – by 11%, from 61.38 kWh/m<sup>3</sup> to 54.69 kWh/m<sup>3</sup>. There was also recorded a physical effect expressed by preliminary weakening of aleurolits and sandstones at DP “Volynvuhillia” of VP “Shakhta Buzhanska”. Using plasma fracturing unit, I type elastic modulus of aleurolits decreased from 30.5 GPa to 11.7 GPa, of sandstones – from 15.0 GPa to 4.5 GPa. Annual economic effect coming from introducing plasma-mechanical rock fracture within “Pyniazevytskyi Quarry” may reach UAH 1,577,800. Calculated period of repayment as to introducing improved technology of plasma-mechanical rock fracture is 7 months.

**Keywords:** technology of plasma-mechanical rock fracture, rock fracture, energy density, crystalline structure.



**Клещов Антон Йосипович**

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАЗМО-МЕХАНІЧНОГО  
РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

Спеціальність 05.15.03 – відкрита розробка родовищ корисних копалин

(Автореферат)