

Національна академія наук України
Інститут геотехнічної механіки імені М.С. Полякова

ПОТАПЧУК Ірина Юріївна

УДК [622.236.32:622.236.34](043.3)

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПЛАЗМОВОГО РОЗШИРЕННЯ
НАСКРІЗНИХ НИЗХІДНИХ СВЕРДЛОВИН

05.15.09 – «Геотехнічна і гірнична механіка»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті геотехнічної механіки імені М.С. Полякова Національної академії наук України (м. Дніпро)

Науковий керівник: член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, професор
Волошин Олексій Іванович
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова
Національної академії наук України,
заступник директора інституту з наукової роботи

доктор технічних наук, професор
Шевченко Володимир Георгійович
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова
Національної академії наук України,
учений секретар інституту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Дреус Андрій Юлійович
Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу

доктор технічних наук, професор
Зайченко Стефан Володимирович
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри електромеханічного обладнання
енергоємних виробництв

Захист відбудеться «14» травня 2021 р. о 13⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.188.01 при Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України за адресою: вул. Сімферопольська, 2а, м. Дніпро, 49005

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України за адресою: вул. Сімферопольська, 2а, м. Дніпро, 49005.

Автореферат розісланий «13» квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор



М.С. Четверик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Однією з важливих проблем, що стоять перед вітчизняною промисловістю, є зниження енергоємності валового внутрішнього продукту, яка в декілька разів перевищує показники в економічно розвинутих країнах. В світі значна частина енергетичних витрат припадає на технології, пов'язані з подрібненням матеріалів, в тому числі з руйнуванням гірських порід, у яких процеси термічного та механічного впливу на породу відіграють значну роль. Незважаючи на досить високу технологічну привабливість, впровадження технологій термічного руйнування гірських порід із застосуванням термоінструмента стримується недостатньою теоретичною базою в області теплообміну та газодинаміки високотемпературних теплоносіїв, зокрема, плазми, при їх взаємодії з матеріалом гірського масиву.

Аналіз існуючих методів аналітичного визначення параметрів процесу термічного руйнування гірських порід при розширенні свердловин показав, що вони обмежуються окремим розв'язанням лінійних одновимірних рівнянь кількості руху, теплопровідності та визначення термонапруженого стану. Така постановка задачі є наближеною внаслідок нехтування сумісності термогазодинамічної задачі для вискотемпературного теплоносія та теплової задачі і задачі термопружності для гірської породи, яка нагрівається цим теплоносієм.

Тому, створення вдосконаленої математичної моделі термічного руйнування гірських порід при розширенні свердловин із застосуванням плазмового термоінструмента з обґрунтованими ефективними експлуатаційними характеристиками, які отримані на основі фізичного моделювання плазмодинаміки теплоносія в процесі термічного руйнування, встановлення закономірностей та визначення параметрів технології термічного руйнування гірських порід є **актуальним науковим завданням, що має суттєве значення для видобувної галузі.**

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до державної бюджетної теми ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України III-74-19 «Розвиток наукових основ процесів енергоперетворення та вібраційної обробки природних і техногенних матеріалів та вуглецевмісної сировини, накопичення та отримання енергії з низькопотенційних і відновлюваних джерел» (№ ДР 0119U000453), в якій автор є виконавцем.

Ідея роботи полягає у використанні встановлених залежностей газодинамічних, теплообмінних процесів та термонапруженого стану гірської породи від характеристик плазмового термоінструменту для обґрунтування параметрів процесу та зниження енергоємності розширення наскрізних низхідних свердловин.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є встановлення закономірностей і обґрунтування параметрів процесу плазмового розширення наскрізних низхідних свердловин для зменшення енергоємності термічного руйнування гірського масиву.

Для досягнення цієї мети вирішувались наступні **задачі:**

- визначити основні фактори впливу енергії плазми на процес термічного руйнування гірських порід;

- розробити математичну модель термічного руйнування гірських порід при розширенні свердловин;

- виконати експериментальне дослідження процесу термічного руйнування гірських порід;

- розробити та впровадити методичні рекомендації по вибору і обґрунтуванню параметрів процесу плазмового розширення наскрізних низхідних свердловин.

Об'єкт дослідження – процес взаємодії плазмового теплоносія з поверхнею наскрізної низхідної свердловини в гірському масиві.

Предмет дослідження – закономірності та параметри процесу термічного руйнування гірських порід з урахуванням теплових і газодинамічних характеристик плазмового теплоносія.

Методи дослідження: аналіз і узагальнення результатів теоретичних та експериментальних досліджень; теоретичні методи газодинаміки, теплообміну та теорії міцності; математичне моделювання геомеханічних, газодинамічних та теплових процесів з використанням законів фізики горних порід і механіки суцільного середовища; методи чисельного розв'язку нелінійних алгебраїчних та диференціальних рівнянь, програмні моделі їх реалізації; методи розробки алгоритмів та комп'ютерного програмування для чисельного розв'язку систем рівнянь; лабораторні дослідження гірських порід; економічний аналіз результатів.

Наукові положення, що виносяться на захист:

1. При розширенні свердловини плазмовим термоінструментом розташування максимального значення температури на її поверхні, якому відповідає координата початку руйнування гірської породи, віддаляється від зрізу сопла плазмотрона зі збільшенням часу нагрівання; залежність максимального значення температури від часу описується степеневою функцією з показником 0,022, а коефіцієнт пропорційності залежить від потужності плазмотрону, який визначається за квадратичним поліномом.

2. Питомі витрати енергії на розширення свердловини квадратично залежать від витрати плазмоутворюючого газу і сягають мінімуму при температурах 3300...3400 °C в інтервалі 120...180 г/с і розширенні свердловини з початкового діаметра 105 мм до кінцевого 200...500 мм.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше встановлено закономірність для градієнту температур на боковій поверхні свердловини від теплогазодинамічних параметрів плазмоутворюючого газу та геометричних параметрів свердловини і теплофізичних властивостей гірського масиву.

2. Вперше розроблено математичну модель термічного руйнування гірських порід з використанням плазмового термоінструменту, що враховує взаємозв'язок між газодинамічними параметрами високотемпературного теплоносія і термонапруженим станом гірського масиву.

3. Вперше науково обґрунтована залежність положення максимуму температури на поверхні свердловини при її температурному розширенні, якому відповідає координата початку термічного руйнування гірської породи.

4. Вперше встановлено раціональне значення тривалості термічної обробки внутрішньої поверхні свердловини, що відповідає мінімальній енергоємності

процесу термічного руйнування та визначається температурою та теплофізичними властивостями плазмоутворюючого газу.

5. Вперше встановлено зв'язок мінімуму питомих витрат енергії на розширення свердловин з початковою температурою та витратою плазмоутворюючого газу, а також кінцевим діаметром свердловини.

Наукове значення роботи полягає у встановленні закономірностей зміни енергоємності процесу термічного розширення свердловин плазмоутворюючим газом, обґрунтуванні раціональних технологічних параметрів плазмотрона, розроблених методах визначення продуктивності руйнування гірського масиву з використанням плазмового термоінструменту.

Практичне значення отриманих результатів:

Розроблено „Методичні рекомендації по вибору і обґрунтуванню параметрів процесу плазмового розширення наскрізних низхідних свердловин”, які містять:

- розрахунок продуктивності та енергоємності процесу термічного руйнування в залежності від характеристик плазмового термоінструменту;
- розрахунок режиму роботи плазмового термоінструменту.

Реалізація результатів досліджень.

Результати дисертаційної роботи у вигляді методичних рекомендацій впроваджено у Східноукраїнському національному університеті ім. В. Даля МОН України на кафедрі Гірництва (акт передачі методичних рекомендацій від 09.02.2021 р.), Криворізькому національному університеті МОН України на кафедрі Підземної розробки родовищ корисних копалин (акт передачі методичних рекомендацій від 11.02.2021 р.), Інституті фізики гірничих процесів НАН України (довідка про використання результатів дисертаційної роботи № 03.2/36 від 18.02.2021 р.).

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи підтверджується: коректністю постановки завдань; використанням фундаментальних положень газодинаміки, теплообміну та теорії міцності, а також апробованих методів розв'язання задач для визначення швидкості та температури плазмового теплоносія і параметрів термонапруженого стану в гірському масиві у процесі їх руйнування; точністю апроксимації отриманих залежностей; достатнім обсягом експериментальних досліджень із використанням адекватних методик і засобів вимірювання; задовільним збігом результатів теоретичних та експериментальних досліджень процесу термічного руйнування з похибкою, що не перевищує 26 %.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися на XV Всеукраїнській науково-технічній конференції «Потураївські читання» (м. Дніпро, 20.01.2017 р.), XVI, XVII, XVIII Міжнародній науково-технічній конференції «Потураївські читання» (м. Дніпро, 18-19.01.2018 р., 25.01.2019 р., 24.01.2020 р.), Essays Of Mining Science And Practice (м. Дніпро, 25-27.06.2019 р., 22-24.04.2020 р.), XII міжнародна науково-практична конференція «Школа підземної розробки» (м. Бердянськ, 4-8.09.2018 р.)

Особистий внесок автора. Автором самостійно визначені ідея роботи, мета і задачі досліджень; сформульовані наукові положення; розроблені методики експериментальних досліджень; встановлені закономірності швидкості підведення

теплоти до бокової поверхні свердловини під впливом енергії плазми; виконані розрахунки енергоємності процесу термічного руйнування; сформульовані висновки по роботі. Автор безпосередньо приймав участь в моделюванні процесів термічного руйнування гірських порід, при визначенні газодинамічних параметрів високотемпературного теплоносія і параметрів термонапруженого стану гірського масиву, в обробці та узагальненні результатів досліджень, в розробці методик і технічних рішень. Текст дисертації автором викладений самостійно.

Публікації. Основні результати роботи опубліковані у 8 наукових працях, з яких 6 - в фахових виданнях, (з них 4 - входять в міжнародні наукометричні бази), 2 - в тезах доповідей на конференціях, патентів України - 1.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списків джерел до кожного розділу та 9 додатків. Загальний обсяг дисертації – 198 сторінок машинного тексту, основний текст викладено на 124 сторінках. Текстова частина ілюстрована 55 рисунками і містить 9 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі на основі аналізу літературних джерел виконано порівняльний аналіз застосування різних термоінструментів для руйнування гірських порід, виявлено їхні переваги та недоліки.

Авторами визначних робіт в області термічного руйнування є науковці з ІГТМ НАН України, НТУ «Дніпровська Політехніка», НТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МГГУ, Стенфордського університету, університетів м. Цюрих та Оклахома, Індійської національної академії наук та ін.

Серед відомих пристроїв термічного руйнування гірських порід вигідно виділяються термоінструменти з дуговим електричним розрядом, а саме плазмотрони. В порівнянні з іншими способами термічного руйнування гірських порід руйнування породи за допомогою струмини низькотемпературної плазми відрізняється високими значеннями коефіцієнта тепловіддачі та питомого теплового потоку, спрощеною системою автоматизації та дистанційного управління, компактністю термоінструмента.

Аналіз літературних джерел засвідчує, що у відомих пристроях з дуговим електричним розрядом для руйнування гірських порід діапазони експлуатаційних характеристик термоінструмента, ефективних режимів нагрівання, механічного навантаження та крихкого руйнування порід визначались, здебільшого, експериментальним шляхом. За такого підходу до розв'язання задачі термічного розширення свердловин відсутнє теоретичне обґрунтування плазмодинамічних характеристик струмини при її взаємодії з поверхнею гірської породи, впливу швидкості пересування, плазмодинамічних і геометричних характеристик струмини та свердловини на параметри крихкого термічного руйнування гірських порід; механічних та теплофізичних властивостей гірських порід в процесах їх нагрівання, значень локальних та осереднених коефіцієнтів тепловіддачі від теплоносія, тобто струмини плазми до поверхні свердловини.

Тому обґрунтування параметрів процесу розширення наскрізних низхідних свердловин із застосуванням плазмового термоінструмента з визначенням його ефективних експлуатаційних характеристик на основі математичної моделі є актуальним та має важливе значення для вітчизняної гірської промисловості, оскільки спрямоване на зниження енергоємності та підвищення продуктивності процесу руйнування гірського масиву.

На підставі аналізу наукових літературних джерел сформульовано мету роботи, завдання для її досягнення, та методи досліджень.

У другому розділі наведено результати теоретичних досліджень процесу плазмового розширення наскрізних низхідних свердловин з метою розробки математичної моделі термічного руйнування гірських порід при розширенні свердловин. Для вирішення поставленої задачі розглянуто установку плазмового розширення свердловин (рис. 1), яка має в своєму складі робочий орган плазмотрону 1, гнучкий підвідний пристрій 2, довжина якого залежить від глибини свердловини і який складається на барабан 3, самохідного подавального пристрою 4, який забезпечує автоматичне укладання кабелю-шланга та подавання плазмотрона в свердловину 8, а також переміщення всієї установки. Для живлення плазмотрона передбачаються блок живлення 5, а також комутуюча апаратура та апарат контролю і керування 6,7.

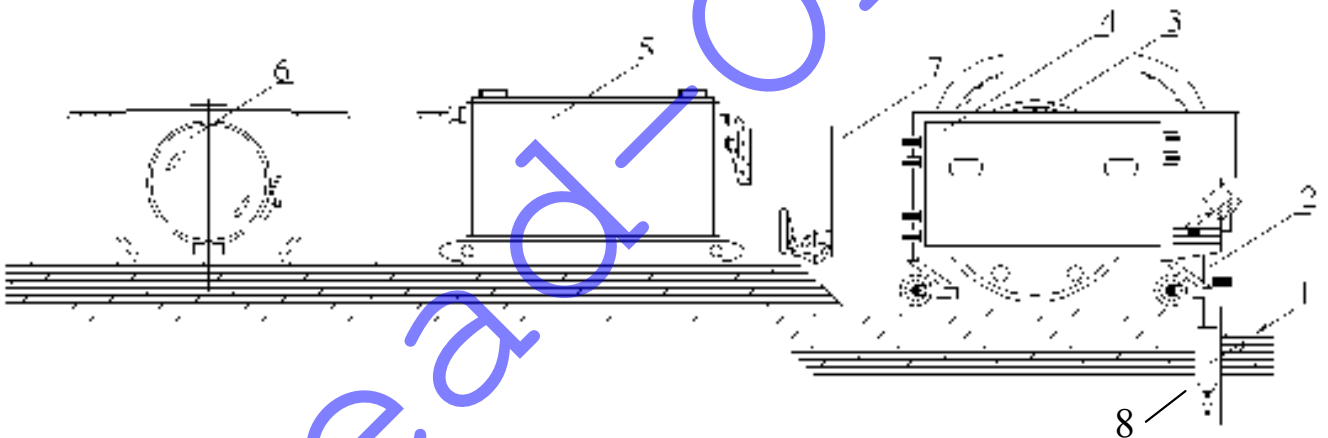


Рисунок 1 – Установка плазмового розширення свердловин

В якості робочого органу установки розширення свердловин використовується плазмотрон, де електрична дуга нагріває потік газу до температури $(3...10) \cdot 10^3$ К. Перед процесом розширення свердловин попередньо використовується буріння наскрізної низхідної свердловини діаметром 105 мм та її розкриття на нижчележачому горизонті. Розширювання починається з опускання плазмотрону до нижнього горизонту, закривання та герметизації верхньої частини свердловини та запуску плазмотрону. На виході з плазмотрону утворюється високотемпературний газовий струмінь, який нагріває поверхню свердловини за рахунок конвективної тепловіддачі та випромінювання. Руйнування породи свердловини обумовлюється нагріванням, що утворює термонапруження, які перевищують границю міцності породи. Видалення продуктів руйнування зі свердловини здійснюється

гравітаційним способом на горизонт, що розташовується нижче. Під час руху потоку газу порода, що оточує свердловину, нагрівається в осьовому та радіальному напрямку, а газ відповідно охолоджується. В процесі розширення свердловини плазмотрон поступово піднімається.

При створенні математичної моделі мали місце припущення: під час руйнування поперечний переріз свердловини має форму кола; продукти руйнування не впливають на рух газу в свердловині; рух і охолодження газу в свердловині, нагрівання породи навколо свердловини нестационарне; на відстані від плазмотрону, де відбувається взаємодія газового потоку зі стінкою свердловини рух газу вісесиметричний і обертальна швидкість дорівнює нулю; потік в трубі є нестискаємий.

Математична модель плазмового розширення свердловин складається з диференціальних рівнянь збереження маси, кількості руху і енергії та рівнянь залежності термічного руйнування гірської породи.

Система рівнянь, що описують процес плазмового розширення наскрізних низхідних свердловин має вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} f + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \cdot f \cdot w_z) &= 0; & \frac{\partial w}{\partial \tau} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= F - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\xi}{d_c} \cdot \frac{w^2}{2}; \\ \rho \frac{\partial i}{\partial \tau} + \rho w \frac{\partial i}{\partial z} &= \alpha (T_w - T_s) \cdot \frac{U}{f}; \\ \rho_{мас} \frac{\partial c_{р\,мас} T_{мас}}{\partial \tau} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{мас} r \frac{\partial T_{мас}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{мас} \frac{\partial T_{мас}}{\partial z} \right); & T_p &= \frac{2\sigma_c (1 - \mu)}{\beta E}, \end{aligned}$$

де ρ – густина газу, що рухається в свердловині, кг/м^3 ; τ – час, с; f – площа поперечного перетину свердловини, м^2 ; z, r – координати, м; w – осьова швидкість газу, що рухається в свердловині, м/с; F – питома масова сила, Н/кг; P – тиск газу, що рухається в свердловині, Па; d_c – діаметр свердловини, м; ξ – коефіцієнт опору; U – периметр свердловини, м; i – ентальпія газу, що рухається в свердловині, Дж/кг; T_w – середня температура газу, що рухається в свердловині, К; T_s – температура на поверхні свердловини в перетині, К; $\rho_{мас}$ – густина гірського масиву, кг/м^3 ; $T_{мас}$ – температура гірського масиву, К; $\lambda_{мас}$ – теплопровідність гірського масиву, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $c_{р\,мас}$ – теплоємність гірського масиву, $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; σ_c – межа міцності масиву на одновісне стиснення, Па; T_p – температура поверхні масиву в момент руйнування, $^{\circ}\text{C}$; β – коефіцієнт лінійного температурного розширення, $1/^{\circ}\text{C}$; E – модуль Юнга, Па; μ – коефіцієнт Пуасона.

Залежності від температури фізичних властивостей для плазмоутворюючого газу та гірських порід визначали за апроксимаційними формулами відомих даних. Результатом чисельного розв'язку системи рівнянь математичної моделі було отримано поле швидкості, температури та густини газу і температур в гірському масиві.

На рис. 2 наведено відстань від сопла плазмотрону, де досягається максимум температури на поверхні свердловини діаметром 105 мм при температурі плазмоутворюючого газу 2500...3400 °С.

З графіків випливає, що розташування максимуму залежить від початкової температури плазмоутворюючого газу (потужності плазмотрону) і може бути визначено степеневу залежністю від часу з показником степені 0,022:

$$l_{\max} = A \cdot \tau^{0,022}.$$

Коефіцієнт пропорційності A залежить від потужності плазмотрону N (кВт) і може бути визначено залежністю:

$$A = 1,317 \cdot 10^{-06} N^2 - 4,194 \cdot 10^{-04} N + 0,2307.$$

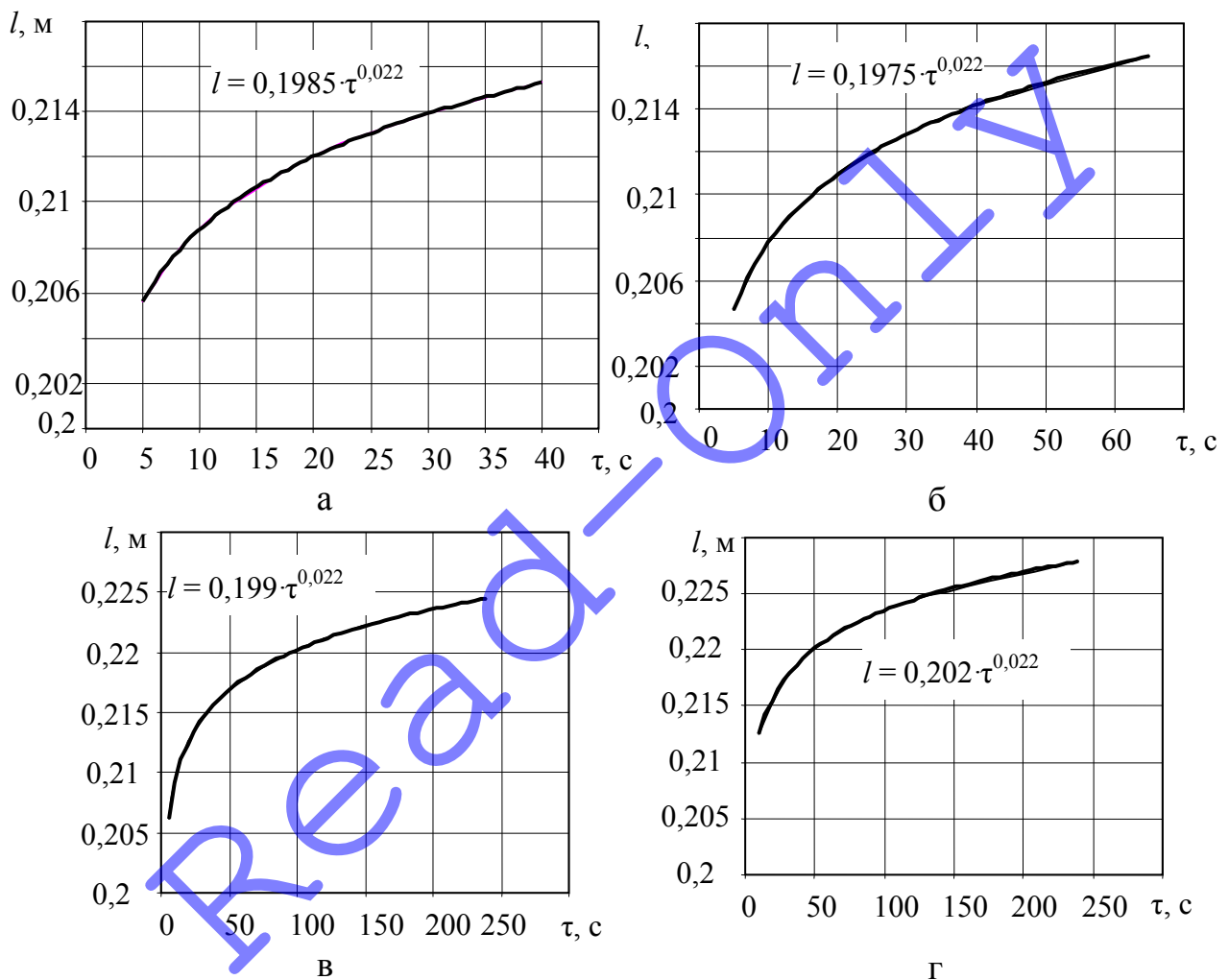


Рисунок 2 – відстань від сопла до координати максимальної температури при початковій температурі плазмоутворюючого газу t_{20} :

а – $t_{20} = 3400$ °С; б – $t_{20} = 3200$ °С; в – $t_{20} = 2800$ °С; г – $t_{20} = 2500$ °С.

За результатами математичного моделювання було визначено значення максимального градієнту температури в гірському масиві при потужності плазмотрону від 100 до 260 кВт (рис. 3).

На рисунку 4 наведено розраховані залежності часу розширення свердловини початкового діаметру $D_0 = 105$ мм в магнетитовому кварциті (температура руйнування $t_p = 250$ °С) в залежності від початкової температури повітря, якій

відповідає температура плазми на виході з плазмотрону при кінцевому діаметрі свердловини D_k від 200 мм до 500 мм.

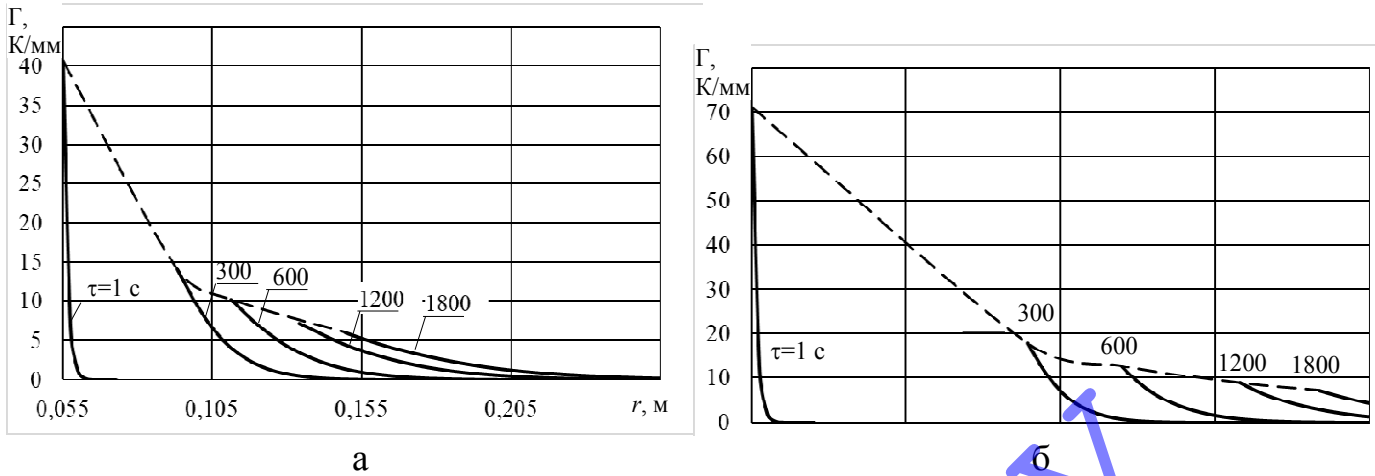


Рисунок 3 – Максимальний градієнт температури в гірському масиві при потужності плазмотрону а – 100 кВт, б – 260 кВт

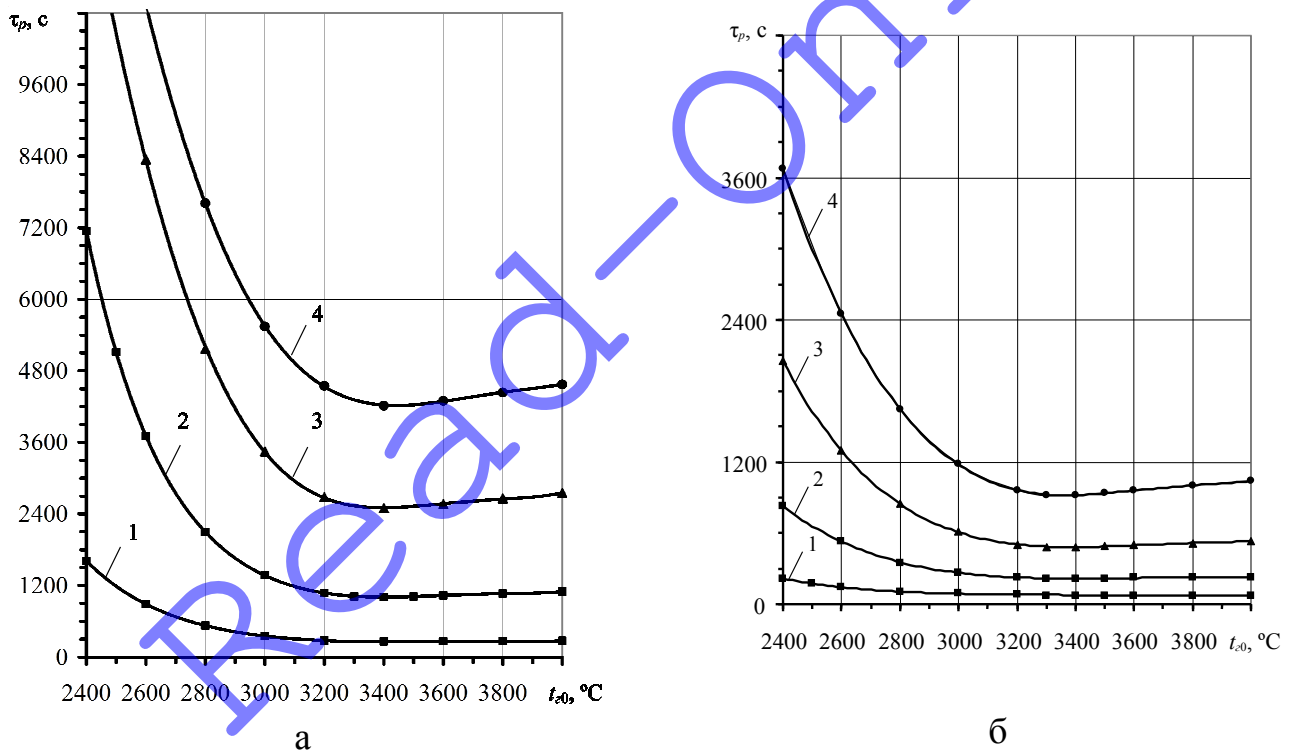


Рисунок 4 – Час розширення свердловини в залежності від початкової температури газу при витраті плазмоутворюючого газу G_2 та кінцевому діаметрі D_k :

1 – 200 мм; 2 – 300 мм; 3 – 400 мм; 4 – 500 мм;

а – $G_2 = 20$ г/с; б – $G_2 = 100$ г/с.

Із графіків випливає, що час розширення свердловин швидко зменшується при збільшенні початкової температури повітря і досягає мінімуму при $t_{20} \approx 3300 \dots 3400$ °С.

На рисунку 5 представлено розподіл температур у гірському масиві (магнетитовому кварциті) при нагріванні в процесі плазмового розширення свердловини в момент часу, коли свердловину розширено до діаметру $D_k = 300$ мм.

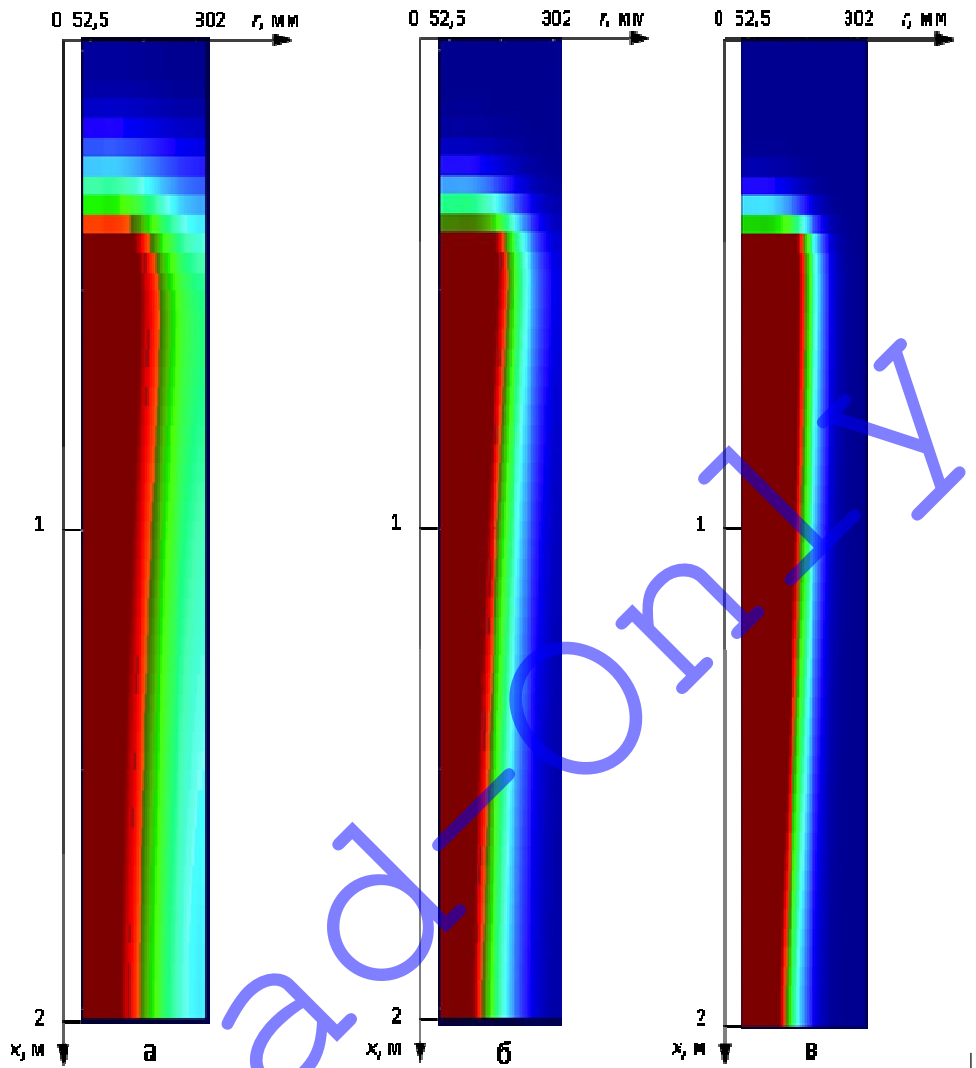


Рисунок 5 – Ізотерми в гірському масиві при плазмовому розширенні свердловини при початковій температурі t_{z0} :
а – 2400 °С; б – 2800 °С; в – 3400 °С.

З рисунку видно, що зі збільшенням початкової температури газу значення градієнтів температури в гірському масиві при плазмовому розширенні свердловини зростає. Зменшення температури t_{z0} призводить до суттєвого збільшення часу розширення і, як наслідок, суттєвого нагрівання гірського масиву поза свердловиною, що збільшує витрати енергії на розширення.

Встановлено, що час розширення свердловини до діаметру D_k при початковій температурі $t_{z0} = 3400$ °С газового потоку обернено пропорційний масовій витраті газу G_z (г/с) і визначається залежністю (див. рисунок б):

$$\tau = a/G_z,$$

де a – коефіцієнт, який визначається квадратичним поліномом в залежності від D_k (мм),

$$a = 0,55D_k^2 - 116D_k + 7600.$$

На рисунку 7 наведено залежність питомих витрат енергії на розширення свердловин до кінцевого діаметра $D_k = 200; 300; 400$ і 500 мм в залежності від витрати газу при його температурі 3400 °С з якої видно, що для кожного кінцевого діаметра свердловини існує витрата часу, при якій витрата енергії на розширення мінімальна. Цей мінімум слабовиразний і суттєво залежить від діаметра D_k . Так, для свердловини з $D_k = 300$ мм $G_{zmin} = 140$ г/с, а при $D_k = 500$ мм $G_{zmin} = 180$ г/с.

Для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі термічного руйнування гірських порід при розширенні свердловин виконано експериментальне дослідження взаємодії струмини плазми з фланцевим патрубком та жерстяної труби, внутрішня бокова поверхня яких імітувала поверхню гірської породи в свердловині. Експериментальні дослідження виконано в два етапи. На першому етапі досліджувалась зміна температури зовнішньої бічної поверхні фланцевого патрубка в залежності від часу його нагрівання. В експериментальному дослідженні струмина плазми через сопло витікає безпосередньо у фланцевий патрубок, вироблений з міді (рис. 8). Тривалість роботи плазмотрона дорівнювала 37 с. Початкова температура фланцевого патрубка 30 °С. Наприкінці процесу нагрівання температура зовнішньої поверхні фланцевого патрубка сягала 346 °С. Після вимкнення плазмотрона через фланцевий патрубок здійснювалась продувка фланцевого патрубка повітрям. Для вимірювання температури на зовнішній поверхні фланцевого патрубка застосовувалась хромель-алюмелева термопара з термоелектродами діаметром $1,2$ мм.

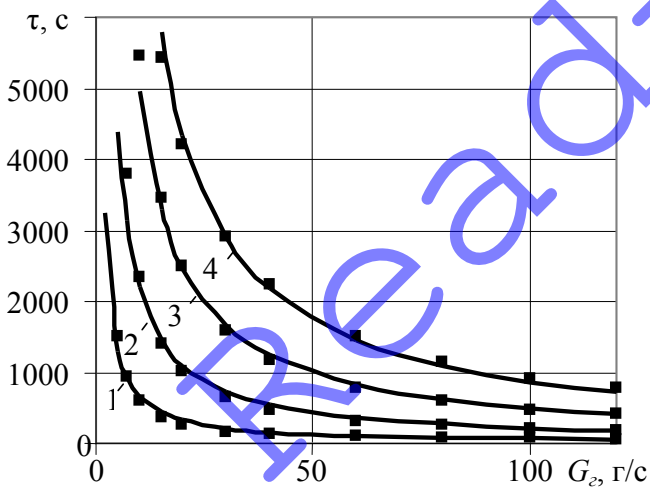


Рисунок 6 – Час розширення свердловини до діаметру D_k в залежності від витрати плазмоутворюючого газу.

- 1 – $D_k = 200$ мм; 2 – $D_k = 300$ мм;
3 – $D_k = 400$ мм; 4 – $D_k = 500$ мм

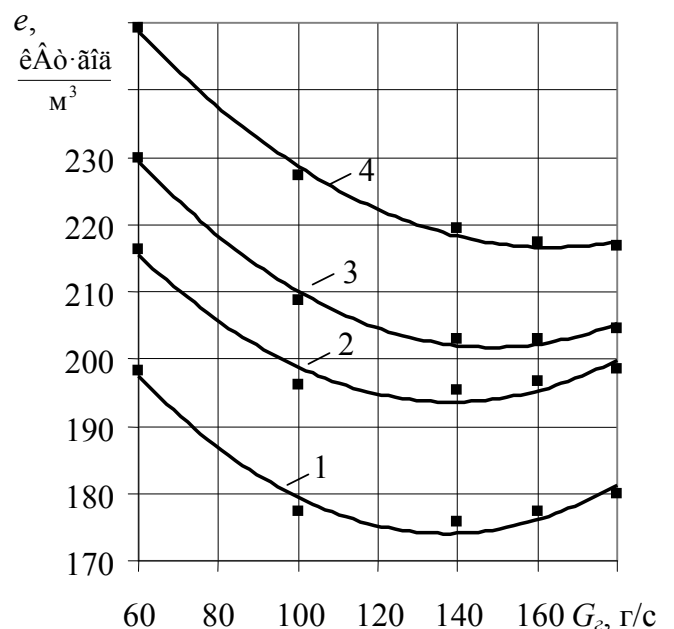


Рисунок 7 – Енергоємність розширення свердловин (позначення як на рис. 6)

Сутність експерименту полягала у вимірюванні температури зовнішньої бічної поверхні фланцевого патрубка при течії плазмової струмини всередині патрубка.

Геометричні параметри фланцевого патрубку та сопла плазмотрона прийняті у відповідності до геометричної подоби технологічним і конструктивним параметрам плазмотрона та діаметра свердловин перед початком процесу термічного розширення. Значення параметрів експериментального дослідження взаємодії струмینی плазми з фланцевим патрубком наведено в таблиці 1.

Таблиця 1– Значення параметрів експериментального дослідження

Характеристика	Величина
Теплова потужність плазми Q , кВт	45
Витрата повітря $G_{пов}$, кг/с	0,006
Внутрішній діаметр фланцевого патрубка $d_{вн}$, м	0,044
Товщина стінки фланцевого патрубка δ , м	0,003
Довжина фланцевого патрубка $l_{мп}$, м	0,098
Довжина сопла плазмотрона l_c , м	0,09

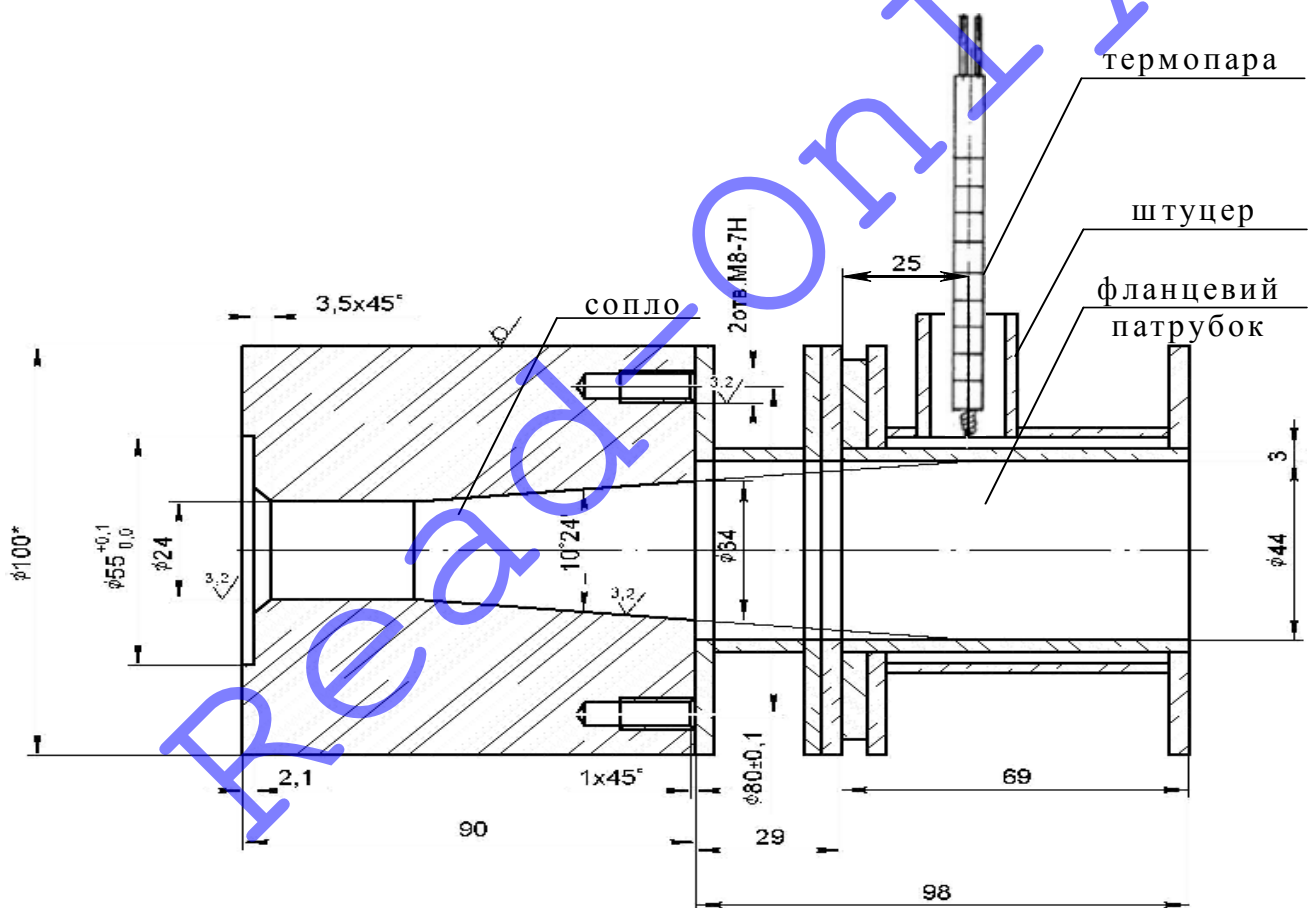


Рисунок 8 – Дослідження динаміки нагрівання бічної поверхні

Експериментальні дослідження дозволили визначити динаміку нагрівання та коефіцієнта тепловіддачі. Порівняння результатів експериментальних досліджень з розрахунком представлено на рисунку 9. Похибка розрахунків не перевищує 8 %.

На другому етапі досліджувався розподіл температури зовнішньої бічної поверхні жерстяної труби по її довжині в залежності від часу нагрівання труби. (рис.

10). Тривалість роботи плазмотрона дорівнювала 35 с. Початкова температура

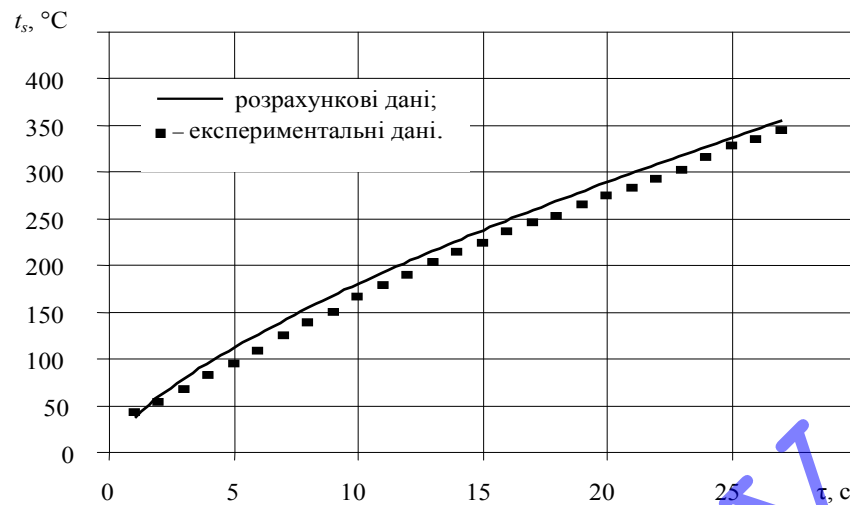


Рисунок 9 – Залежність температури зовнішньої бічної поверхні фланцевого патрубка від часу його нагрівання

жерстяної труби дорівнювала $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наприкінці процесу нагрівання температура зовнішньої поверхні жерстяної труби сягала $823\text{ }^{\circ}\text{C}$. Після вимкнення плазмотрона через жерстяну трубу здійснювалась продувка повітря. Для вимірювання температури на зовнішній поверхні жерстяної труби застосовувались чотири хромель-алюмелеві термопари. Сутність експерименту полягала у вимірюванні температури зовнішньої бічної поверхні фланцевого патрубка при течії плазмової струмینی всередині патрубка.

Результати експериментального дослідження та їх порівняння з розрахунком представлено на рисунку 11. Похибка розрахунків не перевищує 18 %.

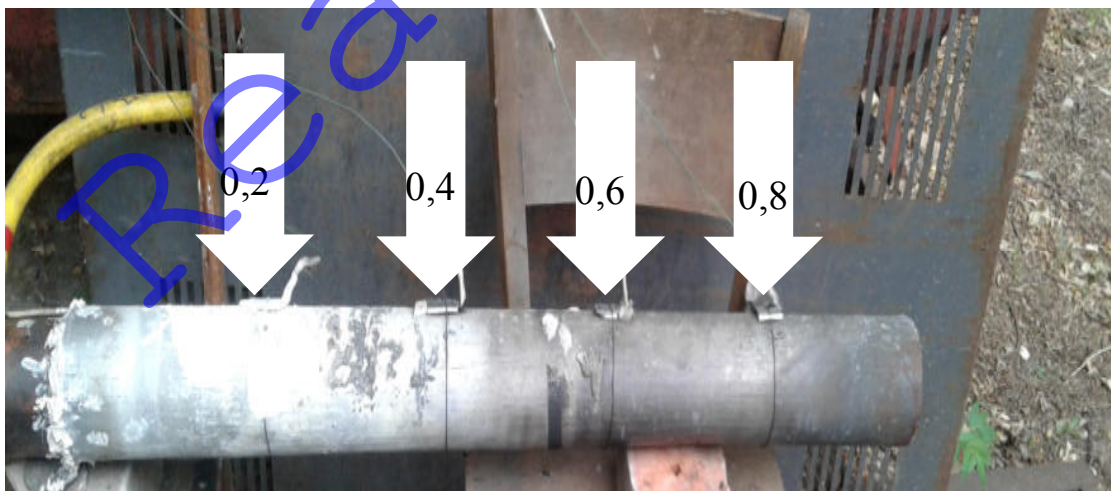


Рисунок 10 – Схема розташування термопар на зовнішній поверхні жерстяної труби

У **третьому розділі** виконано фізичне натурне моделювання теплотехнічних аспектів процесу взаємодії потоку плазми з поверхнею свердловини, яке полягало у експериментальному дослідженні термічного розширення свердловини осьовим та

кутовим плазмотроном з метою визначення енергоємності процесу лущення гірської породи.

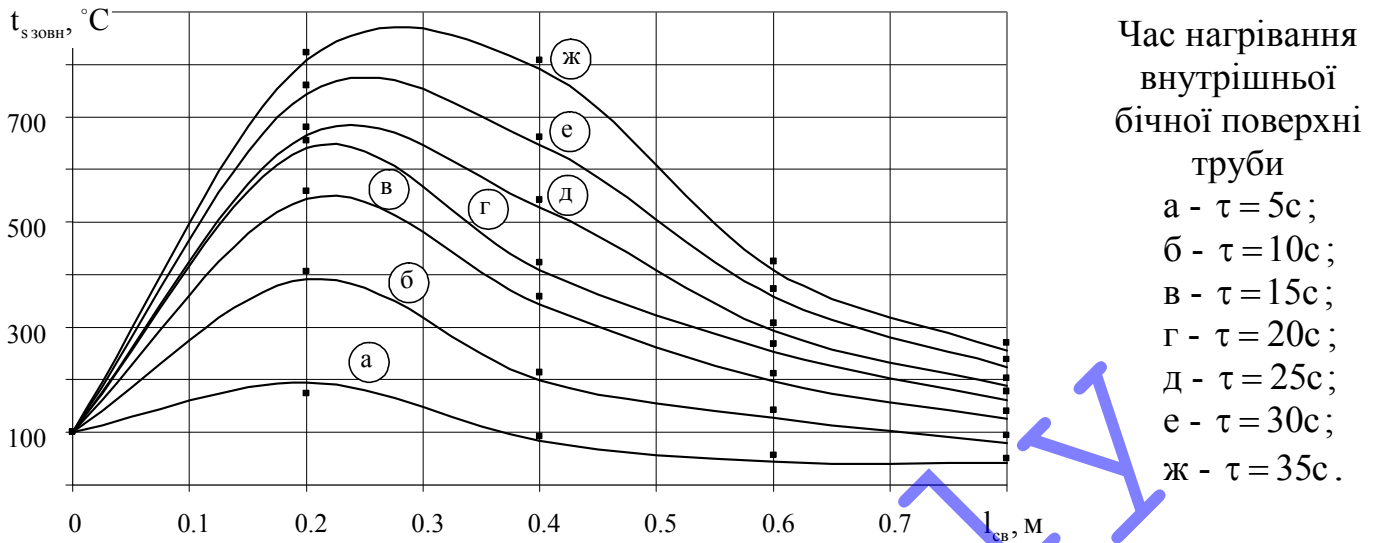


Рисунок 11 – Розподіл температури потоку за довжиною жерстяної труби
— розрахунок; ■ - експеримент

Експериментальний макет та процес термічного розширення свердловини в гранітному блоці осьовою плазмовою струминою наведений на рисунках 12, 13.

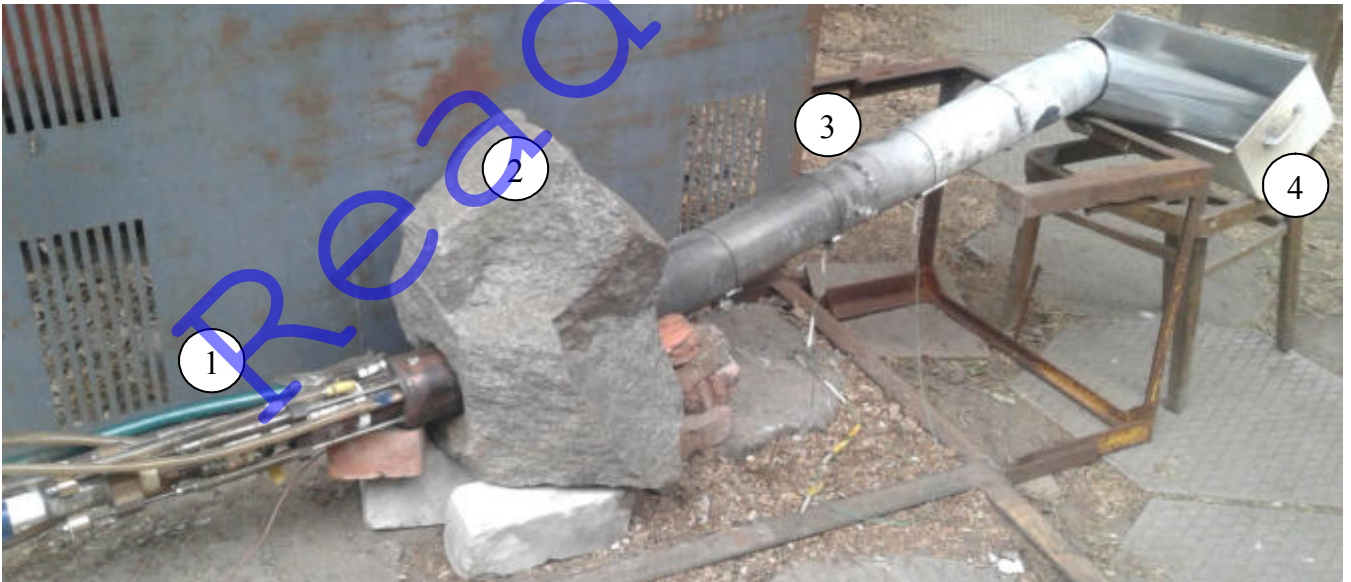


Рисунок 12 – Експериментальний макет для дослідження процесу термічного розширення свердловини в гранітному блоці осьовою плазмовою струминою: 1 – плазмотрон; 2 – гранітний блок; 3 – труба для транспортування скелених частинок гірської породи; 4 – короб для накопичення скелених частинок гірської породи

Початкова температура гранітного блоку знаходилась в межах 18...20 °С. Діаметр свердловини перед початком процесу термічного розширення дорівнював 105 мм, глибина свердловини 300 мм. Теплова потужність плазми $Q \approx 55$ кВт.



Рисунок 13 – Процес термічного розширення гірської породи за допомогою плазмової струмینی осьового плазмотрона

Сутність експерименту полягала у визначенні маси сколених з поверхні свердловини частинок гірської породи за час проведення експерименту з метою розрахунку енергоємності процесу лущення гірської породи. В експериментальному дослідженні вертикальні осі плазмотрона 1 та вхідного отвору свердловини в гранітному блоці 2 суміщались. Після лущення матеріалу гірської породи сколені частинки, тобто відколки, потрапляли до

труби 3, якою потоком газу транспортувались до короба 4. Геометричні параметри свердловини та сопла плазмотрона прийняті у відповідності до геометричної подоби технологічним і конструктивним параметрам плазмотрона та діаметра свердловин перед початком процесу термічного розширення.

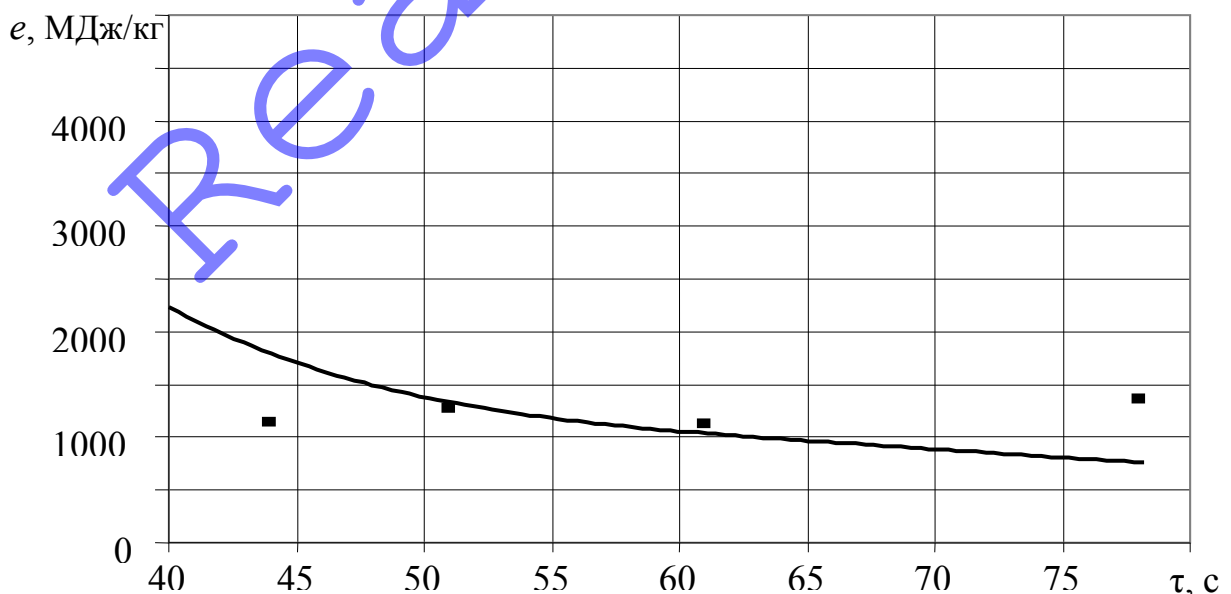


Рисунок 14 – Залежність енергоємності процесу термічного розширення свердловини осьовим плазмотроном від тривалості термічної обробки внутрішньої поверхні свердловини

Визначено залежність енергоємності процесу термічного розширення свердловини осьовим плазмотроном від тривалості термічної обробки внутрішньої поверхні свердловини (рис. 14), яка підтверджує результати розрахунків за рівняннями математичної моделі. Під час проведення досліджень було встановлено, що при малому часі взаємодії високотемпературного плазмового носія з поверхнею гірського масиву велика енергоємність процесу термічного розширення свердловини обумовлена низькою продуктивністю руйнування гірської породи. Зі збільшенням часу енергоємність зменшується в наслідок швидкого нагрівання гірської породи та великого градієнту температур. Як показало безпосереднє спостереження, при подальшому нагріванні відбувається плавлення гірської породи, що призводить до збільшення енергоємності процесу.

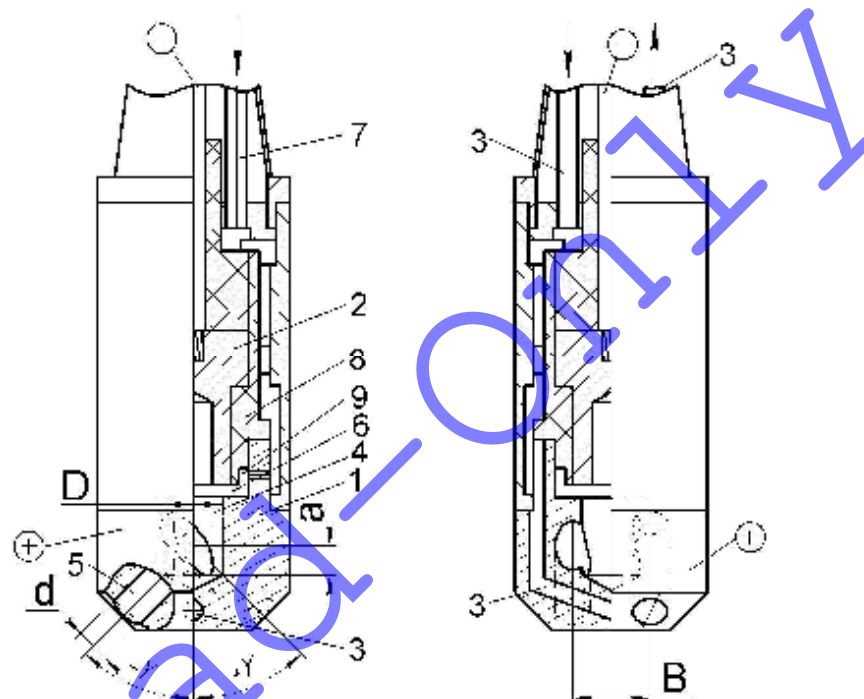


Рисунок 15 - Конструкція кутового плазмотрона

- 1 – анодний вузол; 2 – катодний вузол; 3 – канали охолодження плазмотрона;
 4 – плазмоутворюючий канал; 5 – канали формування плазмових струменів;
 6 – кільцевий канал; 7 – система каналів; 8 – ізолятор; 9 – кільцевий канал

В експериментальному дослідженні процесу термічного розширення свердловини в гранітному блоці кутовим плазмотроном (рис. 15) вертикальні осі плазмотрона 1 та вхідного отвору свердловини в гранітному блоці 2 суміщались (рис. 16). Після луцнення матеріалу гірської породи сколені частинки потрапляли до труби 3, якою потоком газу транспортувались до короба 4.

Отримано залежність енергоємності процесу термічного розширення свердловини кутовим плазмотроном від тривалості термічної обробки внутрішньої поверхні свердловини (рис. 17), яка підтверджує результати розрахунків за рівняннями математичної моделі.

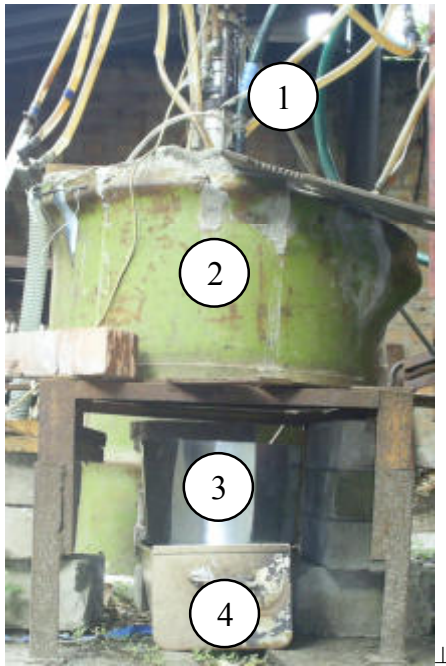


Рисунок 16 – Експериментальна установка для дослідження процесу термічного розширення свердловини в гранітному блоці кутовою плазмовою струминою

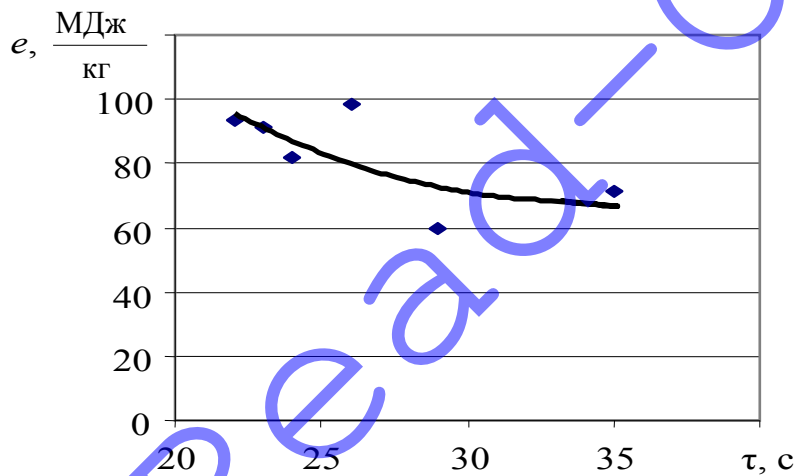


Рисунок 17 – Залежність енергоємності процесу термічного розширення свердловини кутовим плазмотроном від тривалості термічної обробки внутрішньої поверхні свердловини

Було встановлено, що на початку нагрівання значення енергоємності найбільші і майже не змінюються. При подальшому нагріванні енергоємність зменшується в наслідок швидкого нагрівання гірської породи та великого градієнту температур. З збільшенням часу відбувається плавлення гірської породи, що призводить до збільшення енергоємності процесу.

Таким чином, результати експериментальних досліджень процесу термічного розширення свердловини осьовим та кутовим плазмотроном підтвердили адекватність розробленої математичної моделі.

Дослідження показали, що при однакових значеннях теплової потужності плазми застосування кутового плазмотрона дозволяє зменшити час луцення гірської породи, що, в свою чергу, призводить до підвищення продуктивності процесу руйнування породи та суттєве зменшення енергоємності.

У четвертому розділі розроблено та апробовано методичні рекомендації по вибору і обґрунтуванню параметрів процесу плазмового розширення наскрізних низхідних свердловин. Наведено основні положення для розрахунків продуктивності та енергоємності процесу термічного руйнування в залежності від характеристик плазмового термоінструменту.

Розраховано режим роботи плазмового термоінструменту за технологією прямим газовим потоком зі зворотнім циклічним рухом розширювача, що залежить

від фізичних властивостей гірського масиву і діаметру свердловини. Для розширення низхідних наскрізних свердловин в магнетитовому кварциті від початкового діаметру 105 мм до 300 мм визначені раціональні початкова температура та витрата плазмоутворюючого газу і час термічного впливу на гірський масив. Впровадження розроблених методичних рекомендацій по вибору і обґрунтуванню параметрів процесу плазмового розширення наскрізних низхідних свердловин в умовах гірського масиву з магнетитового кварциту дозволить отримати економічний ефект в розмірі 1617 грн/м свердловини. Такий економічний ефект був отриманий за рахунок зниження енергоємності процесу, а також зменшення експлуатаційних витрат при розширенні наскрізних низхідних свердловин.

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій вирішена актуальна наукова задача, що полягає в обґрунтуванні параметрів процесу плазмового розширення наскрізних низхідних свердловин на основі встановлених закономірностей зміни енергоємності, теплогазодинамічних параметрів плазмоутворюючого газу та геометричних параметрів свердловини і теплофізичних параметрів гірського масиву, що дозволило розробити методичні рекомендації, впровадження яких дає можливість отримати очікуваний економічний ефект в розмірі 1617 грн на один метр свердловини, що має суттєве значення для видобутку корисних копалин.

Основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Аналіз відомих джерел засвідчує, що існуючі методики розрахунку параметрів процесу термічного розширення наскрізних низхідних свердловин обмежується розв'язанням за спрощеними математичними моделями або побудовані на результатах частинних емпіричних даних, які придатні тільки для умов проведення експериментів. Внаслідок цього недостатньо обґрунтовані параметри процесу плазмового розширення наскрізних низхідних свердловин, а саме початкова температура, витрата плазмоутворюючого газу, час термічної обробки та енергоємність.

2. Подальшого розвитку набули дослідження термічного руйнування гірського масиву, вперше встановлено закономірності термонапруженого стану в гірському масиві, обумовленого теплообміном та газодинамічним впливом плазмового носія в свердловині під час її термічного розширення.

3. Вперше встановлено вплив теплогазодинамічних параметрів плазмоутворюючого газу, теплофізичних параметрів гірського масиву та геометричних параметрів свердловини на кількісні та енергетичні показники процесу плазмового розширення наскрізних низхідних свердловин. Встановлено, що при використанні плазмового термоінструменту градієнт температури в масиві, що її оточує, прямопропорційні відносному перепаду температур між стінкою та повітрям, витраті плазмоутворюючого газу. При збільшенні потужності плазмотрону з 100 до 260 кВт, в діапазоні розширення діаметру свердловини з 105

до 300 мм максимальний градієнт температури досягається в зоні контакту поверхні свердловини з плазмоутворюючим газом і змінюється з 71,22 до 5,98 К/мм.

4. Вперше розроблено математичну модель для проведення розрахунку газодинамічних та теплообмінних процесів при впливі високотемпературного плазмового теплоносія на гірський масив, яка відрізняється тим, що шляхом встановлення відповідних граничних умов враховує взаємовплив процесів в потоці, який рухається в каналі з теплообмінними процесам в оточуючому твердому матеріалі.

5. Вперше науково обґрунтована залежність положення максимуму температури на поверхні свердловини при її температурному розширенні, якому відповідає координата початку термічного руйнування гірської породи. Залежність описується степеневою функцією з показником 0,022, а коефіцієнт пропорційності залежить від потужності плазмотрону, який визначається за квадратичним поліномом.

6. Вперше визначено, що час розширення свердловини прямопропорційний кінцевому діаметру, досягає мінімуму при температурі плазмоутворюючого газу 3300...3400 °С і при цій температурі обернено пропорційний масовій витраті газу з коефіцієнтом, який визначається квадратичним поліномом.

7. Вперше встановлено зв'язок мінімуму питомих витрат енергії на розширення свердловин з початковою температурою та витратою плазмоутворюючого газу, а також кінцевим діаметром свердловини. Мінімум питомих витрат енергії досягається при початковій температурі плазмоутворюючого газу 3300...3400 °С в інтервалі витрати 120...180 г/с для кінцевого діаметра розширеної свердловини 200...500 мм.

8. Достовірність отриманих результатів забезпечується достатнім обсягом експериментальних досліджень, виконаних апробованими методами із застосуванням стандартних засобів вимірювань, відносна похибка результатів не перевищує 26 %.

9. Розроблено методичні рекомендації по вибору і обґрунтуванню параметрів процесу плазмового розширення наскрізних низхідних свердловин, які в умовах гірського масиву з магнетитового кварциту дозволяють отримати економічний ефект в розмірі 1617 грн/м свердловини.

10. Результати досліджень процесів плазмового розширення наскрізних низхідних свердловин, методичні рекомендації по вибору і обґрунтуванню параметрів процесу плазмового розширення наскрізних низхідних свердловин передані для використання у Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля МОН України, Криворізький національний університет МОН України та Інститут фізики гірничих процесів НАН України.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В НАСТУПНИХ РОБОТАХ:

Публікації в наукових фахових виданнях:

1. Voloshyn O.I., Potapchuk I.Yu., Zhevzyk O.V. Influence of the heat-transfer stream pressure at the surface of the rock in a process of the thermal reaming of the borehole. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2018. №2. P. 53-59. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-2/6>
2. Study of the plasma flow interaction with the borehole surface in the process of its thermal reaming / O. Voloshyn, I Potapchuk, O. Zhevzyk, V. Yemelianenko et al. *Mining of Mineral Deposits*, 2018. Vol. 12, Issue 3, P. 28-35. <https://doi.org/10.15407/mining12.03.028>
3. Experimental study of the thermal reaming of the borehole by axial plasmatron / O. Voloshyn, I Potapchuk, O. Zhevzyk, V. Yemelianenko et al. *Mining of Mineral Deposits*, 2019. Vol. 13, Issue 1, P. 103-110. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.103>.
4. Mathematical modeling of the gas dynamic parameters of the impinging heat-transfer medium jet in a process of the thermal reaming of the borehole / A.F. Bulat, O.I. Voloshyn, I.Yu. Potapchuk, V.I. Yemelianenko et al. *Science and innovations*, 2019. №3. P. 17-23. <https://doi.org/10.15407/scin15.03.017>
5. Волошин О.І., Потапчук І.Ю., Жевжик О.В. Перспективи використання термоінструмента з дуговим електричним розрядом в процесі руйнування гірських порід. *Геотехнічна механіка: Межвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України*. Дніпро, 2016. № 131. С. 33-43.
6. Mathematical modeling of the gasdynamic characteristics of the heat-transfer medium jet in a process of the thermal reaming of the borehole / O.I. Voloshyn, I.Yu. Potapchuk, O.V. Zhevzyk, V.I. Yemelianenko et al. *Геотехнічна механіка: Межвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України*. Дніпро, 2017. № 137. С. 32-39.

Тези доповідей і матеріали конференцій:

7. Voloshyn O., Potapchuk I., Zhevzyk O., Yemelianenko V. Results of the experimental research of the heat transfer jet pressure to the rock surface during thermal reaming of the borehole. *E3S Web of Conferences*. 2018, Vol. 60, 00024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000024>.
8. Experimental study for the process of the borehole thermal reaming by means of the angular plasmatron / O. Voloshyn, I. Potapchuk, V. Yemelianenko, M. Zhovtonoha et al. *E3S Web of Conferences*, 2019. Vol. 109, 00113. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900113>.

Наукові відкриття і патенти:

9. Плазмотрон для розширення свердловин: пат. 130427 Україна. № 2018 05931; заявл. 29.05.2018; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23. 4 с.

Особистий внесок здобувача у роботах, написаних в співавторстві: [5] – аналіз літературних джерел, порівняльний аналіз застосування різних термоінструментів для руйнування гірських порід; [4, 6] – розробка математичної моделі розрахунку

газодинамічних характеристик теплоносія при його русі вздовж поверхні свердловини в процесі її термічного розширення; [1, 2, 3, 7, 8] – проведення експериментальних робіт, аналіз та обробка результатів досліджень, формулювання висновків; [9] – проведення патентних досліджень, формулювання відзнак і формули винаходу, обґрунтування новизни винаходу.

АНОТАЦІЯ

Потапчук І.Ю. Обґрунтування параметрів процесу плазмового розширення наскрізних низхідних свердловин. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.09 – «Геотехнічна і гірнична механіка». - Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова Національної академії наук України, м. Дніпро, 2021.

В роботі визначено основні фактори впливу енергії плазми на процес термічного руйнування гірських порід, розроблено математичну модель та виконано експериментальне дослідження процесу термічного руйнування гірських порід, розроблено та впроваджені методичні рекомендації по вибору і обґрунтуванню параметрів процесу плазмового розширення наскрізних низхідних свердловин.

Встановлено вплив теплогазодинамічних параметрів плазмоутворюючого газу, теплофізичних параметрів гірського масиву та геометричних параметрів свердловини на кількісні та енергетичні показники процесу плазмового розширення наскрізних низхідних свердловин. Визначено, що при використанні плазмового термоінструменту градієнт температури в масиві досягає максимуму в зоні контакту поверхні свердловини з плазмоутворюючим газом і при збільшенні потужності плазмотрону з 100 до 260 кВт, в діапазоні розширення діаметру свердловини з 105 до 300 мм максимальний градієнт температури досягається в зоні контакту поверхні свердловини з плазмоутворюючим газом і змінюється з 71,22 до 5,98 К/мм.

Визначено, що при розширенні свердловини плазмовим термоінструментом розташування максимального значення температури на її поверхні, якому відповідає координата початку руйнування гірської породи, віддаляється від зрізу сопла плазмотрона зі збільшенням часу нагрівання і описується степеневою залежністю від часу нагрівання з показником 0,022 і коефіцієнтом пропорційності, що квадратично залежить від потужності плазмотрону.

На основі проведених досліджень встановлено, що питомі витрати енергії на розширення свердловини квадратично залежать від витрати плазмоутворюючого газу і сягають мінімуму при температурах 3300...3400 °С в інтервалі 120...180 г/с і розширенні свердловини з початкового діаметра 105 мм до кінцевого 200...500 мм.

Результати дисертаційної роботи у вигляді методичних рекомендацій впроваджено у Східноукраїнському національному університеті ім. В. Даля МОН України на кафедрі гірництва, Криворізькому національному університеті МОН України на кафедрі підземної розробки родовищ корисних копалин та Інституті фізики гірничих процесів НАН України. Очікуваний економічний ефект складає 1617 грн на один метр свердловини.

Ключові слова: гірські породи, свердловина, плазмоутворюючий газ, плазмотрон, термічне руйнування.

АННОТАЦИЯ

Потапчук И.Ю. Обоснование параметров процесса плазменного расширения сквозных нисходящих скважин. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.09 – «Геотехническая и горная механика». – Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины, г. Днепр, 2021.

В работе определены основные факторы влияния энергии плазмы на процесс термического разрушения горных пород, разработана математическая модель и выполнено экспериментальное исследование процесса термического разрушения горных пород, разработаны и внедрены методические рекомендации по выбору и обоснованию параметров процесса плазменного расширения сквозных нисходящих скважин.

Установлено влияние теплогазодинамических параметров плазмообразующего газа, теплофизических параметров горного массива и геометрических параметров скважины на количественные и энергетические показатели процесса плазменного расширения сквозных нисходящих скважин. Определено, что при использовании плазменного термоинструмента градиент температуры в массиве достигает максимума в зоне контакта поверхности скважины с плазмообразующим газом и при увеличении мощности плазмотрона с 100 до 260 кВт, в диапазоне расширения диаметра скважины с 105 до 300 мм максимальный градиент температуры достигается в зоне контакта поверхности скважины с плазмообразующим газом и меняется с 71,22 до 5,98 К/мм.

Определено, что при расширении скважины плазменным термоинструментом расположения максимального значения температуры на её поверхности, которому соответствует координата начала разрушения горной породы, удаляется от среза сопла плазмотрона с увеличением времени нагрева и описывается степенной зависимостью от времени нагрева с показателем 0,022 и коэффициентом пропорциональности, который квадратично зависит от мощности плазмотрона.

На основе проведенных исследований установлено, что удельные затраты энергии на расширение скважины квадратично зависят от расхода плазмообразующего газа и достигают минимума при температурах 3300...3400 °С в интервале 120...180 г/с и расширении скважины от первоначального диаметра 105 мм до конечного 200 ... 500 мм.

Результаты диссертационной работы в виде методических рекомендаций внедрены в Восточнoукраинском национальном университете им. В. Даля МОН Украины на кафедре горного дела, Криворожском национальном университете МОН Украины на кафедре подземной разработки месторождений полезных ископаемых и Институте физики горных процессов НАН Украины. Ожидаемый экономический эффект составляет 1617 грн на один метр скважины.

Ключевые слова: горные породы, скважина, плазмообразующего газ, плазмотрон, термическое разрушение.

ABSTRACT

Potapchuk I.Yu. Substantiation of parameters of the process of plasma expansion of downhole wells. – The manuscript.

The thesis for scientific degree of technical sciences candidate on specialty 05.15.09 – "Geotechnical and Mining Mechanics". - N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics NAS of Ukraine, Dnipro, 2021.

In the work were defined the main factors of plasma energy influence on the process of thermal destruction of rocks, a mathematical model and an experimental study of the process of thermal destruction of rocks were developed, methodical recommendations on selection and substantiation of parameters of plasma expansion process through wells were developed and implemented.

The influence of thermo-gas-dynamic parameters of plasma-forming gas, thermophysical parameters of the massif and geometrical parameters of the well on the quantitative and energy indicators of the process of plasma expansion of through downhole wells was defined. It was determined that when using a plasma thermal tool the temperature gradient in the array reaches a maximum in the area of contact of the well surface with plasma-forming gas and when the plasmatron power increases from 100 to 260 kW, in the range of well diameter expansion from 105 to 300 mm the maximum temperature gradient achieved in the area of contact of the well surface with the plasma-forming gas and changes from 71.22 to 5.98 K / mm

It was determined that when expanding a well with a plasma thermal tool, the location of the maximum value of temperature on its surface, which corresponds to the coordinate of the beginning of rock destruction, moves away from the plasmatron section of nozzle with increasing heating time and is described by the degree dependence on heating time with indicator 0,022 and with coefficient of proportionality, which is quadratically dependent from the power of the plasmatron.

Based on the conducted researches, it was established that the specific energy consumptions for well expansion are quadratically depended on plasma-forming gas consumption and reach a minimum at temperatures of 3300 ... 3400 °C in the range of 120 ... 180 g / s and increases of well from the initial diameter of 105 mm to the final 200 ... 500 mm.

The results of the dissertation work in the form of methodical recommendations were implemented in the V. Dahl East Ukrainian National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine at the department of mining, Kryvyi Rih National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine at the department of underground mining and the Institute of Mining Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine. The expected economic effect is 1617 UAH per one meter of well.

Keywords: rocks, well, plasma-forming gas, plasmatron, thermal destruction.

Потапчук Ірина Юріївна

Обґрунтування параметрів процесу плазмового розширення
наскрізних низхідних свердловин

(автореферат)

Підписано до друку 12.04.2021. Формат 60×90/16

Гарнітура Times. Друк різнографічний.

Папір офсетний. 1,08 умов. друк. арк.

Тираж 100 прим. Зам. № _____

Друк ТОВ «Барвікс»

Свідоцтво про внесення до державного реєстру

№24 від 25.07.2000 р.

49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 17