

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

ДРЕУС Андрій Юлійович



УДК 622.236+622.243

**ТЕПЛОФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЗНЕМІЦНЕННЯ ГІРСЬКИХ
ПОРІД ПРИ АЛМАЗНОМУ БУРІННІ СВЕРДЛОВИН
З ІМПУЛЬСНИМ ПРОМИВАННЯМ**

**Спеціальність: 05.15.09 – «Геотехнічна і гірнича механіка»
05.15.10 – «Буріння свердловин»**

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі техніки розвідки родовищ корисних копалин Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Кожевников Анатолій Олександрович,
професор кафедри техніки розвідки родовищ корисних копалин Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Зуєвська Наталя Валеріївна,
професор кафедри геоінженерії
Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Круковська Вікторія Вікторівна,
старший науковий співробітник відділу управління динамічними проявами гірського тиску Інституту геотехнічної механіки імені М.С. Полякова Національної академії наук України (м. Дніпро)

доктор технічних наук, доцент
Кунцяк Ярослав Васильович,
генеральний директор,
ПрАТ "Науково-дослідне і конструкторське бюро бурового інструменту" (м. Київ)

Захист відбудеться «__» липня 2018 р. об 11⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.04 у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою 49005, м. Дніпро, пр. Дмитра Яворницького, 19.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Автореферат розісланий «__» травня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.В. Солодянкін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Буріння свердловин широко використовується при пошуках і розвідці родовищ корисних копалин, а також для видобутку нафти, газу, води, проведення різноманітних інженерних робіт і, таким чином, відіграє важливу роль в економіці будь-якої держави, у тому числі й України. Для буріння міцних гірських порід застосовують обертове буріння з використанням алмазних бурових коронок.

На сьогодні традиційні технології алмазного буріння з постійними у часі режимними параметрами досягли певної межі продуктивності. Разом з тим значним резервом підвищення ефективності руйнування гірської породи при алмазному бурінні, який не реалізується повною мірою, є тепла енергія, що генерується на вибої. Цей фактор використано в новій інноваційній технології буріння з імпульсною подачею промивальної рідини. Випробування такої технології з переривчастим режимом подачі промивальної рідини продемонструвало істотне покращання ефективності руйнування гірської породи порівняно з традиційним способом обертового механічного буріння, зокрема одержано збільшення механічної швидкості буріння в 1,2–2,2 рази.

Проте для широкого впровадження в практику алмазного буріння імпульсного промивання необхідно, з одного боку, розкрити та вивчити взаємодію механічних та теплофізичних процесів на вибої свердловини для визначення раціональних параметрів переривчастого промивання при бурінні стандартними коронками, що забезпечують інтенсифікацію процесу руйнування гірської породи. З іншого боку, необхідно вирішити проблему забезпечення такого температурного режиму на вибої, за якого зберігається термостійкість алмазної коронки при переривчастому способі промивання.

Таким чином, інтенсифікація руйнування гірської породи при алмазному бурінні свердловин за рахунок обґрунтування раціональних параметрів термомеханічних, теплофізичних і технологічних процесів при переривчастому промиванні на підставі подальшого розвитку механізмів руйнування гірської породи і теорії теплофізичних процесів на вибої свердловини при бурінні алмазними коронками, є актуальною науково-технічною проблемою, вирішення якої дозволить підвищити ефективність та надійність алмазного буріння свердловин, що має важливе практичне значення для гірничодобувної галузі.

Зв'язок з науковими темами, планами, програмами.

Роботу виконано відповідно до прийнятою Кабінетом Міністрів України «Загальнодержавною програмою розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року», в рамках держбюджетних НДР «Розробка технології алмазного буріння з імпульсним промиванням» (№ ДР 0101U001793), «Аналітично-експериментальні дослідження стійкості гірничих виробок» (№ДР 0116U005246), господарської теми «Оптимізація параметрів алмазного буріння з імпульсним промиванням та розробка

раціональних компоновок бурильних колон» (№ ДР 0106U004135), що виконувалися у Державному ВНЗ «Національний гірничий університет», де автор був одним з виконавців, а також проекту «Обґрунтування ефективних теплоенергетичних параметрів новітніх технологій буріння», що виконувався за грантом Дніпропетровської обласної та міської рад (2016 р.), за участю автора як наукового керівника.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є розвиток теорії теплофізичних методів руйнування гірської породи при алмазному бурінні геологорозвідувальних свердловин та обґрунтування параметрів термомеханічних і теплофізичних процесів при переривчастому промиванні, що забезпечують інтенсифікацію процесу руйнування.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі сформульовані і виконані наступні **задачі досліджень**.

1. Аналіз впливу температурного фактора на процеси руйнування гірської породи при алмазному бурінні та визначення можливостей інтенсифікації процесу руйнування за рахунок теплоти, що генерується на вибої.

2. Аналіз теплового балансу на вибої свердловини при алмазному бурінні і обґрунтування можливості використання переривчастого промивання для підвищення механічної швидкості буріння.

3. Проведення стендових експериментальних досліджень впливу витрати промивальної рідини на контактну температуру при бурінні.

4. Розкриття сутності теплового впливу на термомеханічний стан поверхневого шару гірської породи при переривчастій подачі промивальної рідини та обґрунтування фізичних механізмів інтенсифікації руйнування гірської породи при бурінні з переривчастим промиванням.

5. Розробка методики дослідження параметрів знеміцнення гірської породи при алмазному бурінні з переривчастим промиванням.

6. Дослідження процесів конвективного теплообміну на вибої свердловини та розробка методики прогнозування контактної температури і температурного режиму бурових коронок при переривчастому промиванні.

7. Проведення параметричних досліджень з визначення впливу вибійної потужності, витрати промивальної рідини, часових параметрів переривчастого промивання на температурні режими гірської породи і алмазної бурової коронки.

8. Розроблення рекомендацій з визначення ефективних теплоенергетичних показників процесу буріння з переривчастим промиванням, що забезпечують ефективне руйнування гірської породи при бурінні.

9. Розроблення рекомендацій з удосконалення конструкцій бурових коронок для підвищення ефективності руйнування гірської породи.

Об'єкт дослідження – процеси теплового знеміцнення гірської породи на вибої свердловини при бурінні алмазними коронками з переривчастою подачею промивальної рідини.

Предмет дослідження – параметри процесів знеміцнення гірської породи і процесів теплообміну промивальної рідини з гірською породою та породоруйнуючим інструментом при переривчастому режимі промивання.

Ідея роботи – керування параметрами теплофізичних процесів на вибої свердловини шляхом комбінації тривалості фаз подачі та паузи при переривчастому режимі промивання для забезпечення інтенсифікації процесу руйнування гірської породи при збереженні температури практичної термостійкості інструмента.

Методи дослідження.

Для розв'язання поставлених завдань у роботі використано комплексний підхід, який включає аналіз та узагальнення науково-технічних досягнень та літературних джерел, поєднує теоретичні і експериментальні дослідження.

Теоретичні дослідження базуються на аналітичних і чисельних методах теорії теплообміну, механіки рідини та газу, теорії термопружності, теорії руйнування гірських порід, методах комп'ютерного моделювання і обчислювальному експерименті, експериментальні дослідження включають лабораторні стендові дослідження з визначення контактної температури та параметрів конвективного теплообміну при бурінні.

Основні наукові положення, що захищаються в дисертації.

1. Механізм процесу руйнування гірської породи при алмазному бурінні з переривчастим промиванням має подвійний характер: по-перше, внаслідок впливу сектора алмазної коронки збільшується в 1,45...3,7 разів кількість теплової енергії, що спрямовується до гірської породи, та зростає контактна температура до 2 разів; по-друге, під час проходження промивального вікна над елементарною ділянкою вибою збільшується термоциклічний вплив промивальної рідини на гірську породу, що сприяє інтенсифікації термомеханічного знеміцнення гірської породи на вибої свердловини.

2. Підвищення контактної температури при імпульсному промиванні вибою дозволяє у привибійному шарі гірської породи збільшити термічні напруження розтягування в 2 рази, що для низки гірських порід забезпечує ефективне розкриття мікротріщин та збільшує ефект термоциклічного знеміцнення гірської породи до 66%.

3. Використання переривчастого промивання при алмазному бурінні свердловин порівняно з режимом постійного промивання дозволяє знизити енергоємність процесу руйнування гірської породи до 55%, що забезпечує підвищення механічної швидкості буріння.

4. Контактна температура при бурінні з переривчастим промиванням для заданої пари «гірська порода – алмазна коронка» визначається режимними параметрами буріння та параметрами переривчастого промивання, і лінійно залежить від енергетичних витрат на вибої, та нелінійно залежить від витрат промивальної рідини, тривалості фаз подачі і паузи промивальної рідини, коефіцієнта переривчастості.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Набули подальшого розвитку механізми руйнування гірських порід при алмазному бурінні, що дозволяє враховувати як постійний термомеханічний вплив на гірську породу гарячого сектора матриці коронки і термоциклічний вплив на поверхню вибою охолоджуючої промивальної рідини.

2. Вперше доведено, що переривчасте промивання вибою свердловини при алмазному бурінні дозволяє перерозподілити теплові потоки на вибої та збільшити частку теплової енергії, що спрямовується до гірської породи.

3. Вперше обґрунтовано можливість використання режиму переривчастої подачі промивальної рідини при бурінні стандартними алмазними коронками для інтенсифікації процесу руйнування гірської породи за рахунок кращого використання теплової енергії на вибої свердловини, створення високих перепадів температур і розвитку термічних напружень розтягування. Для оцінки ефективності технології переривчастого промивання запропоновано енергоємнісний критерій ефективності руйнування гірської породи.

4. Вперше, для алмазного буріння, встановлено закономірності, що зв'язують параметри процесу знеміцнення гірської породи при бурінні коронками з переривчастим промиванням вибою свердловини (час затримки початку руйнування і початкову довжину мікротріщини) з інтенсивністю конвективного теплообміну на поверхні забою свердловини.

5. Набули подальшого розвитку методи прогнозування контактної температури при алмазному бурінні, що дозволяє враховувати конструктивні особливості алмазних коронок, особливості фізичних процесів, які відбуваються на вибої свердловини, та переривчастий режим подачі промивальної рідини.

6. Вперше встановлено закономірності зміни контактної температури при алмазному бурінні в діапазоні вибійної потужності 2–8 кВт залежно від часових параметрів переривчастого промивання (тривалості фаз подачі і паузи) і витрати промивальної рідини. На основі параметричних досліджень визначено теплоенергетичні параметри переривчастого промивання, які дозволяють запобігти перегріву алмазної коронки.

7. Вперше встановлено закономірності впливу конструктивних особливостей бурових коронок: геометричних характеристик промивної системи, кількості промивних каналів, довжини сектора коронки на контактну температуру, показано нові можливості підвищення ефективності руйнування гірської породи при бурінні шляхом вдосконалення конструктивного виконання інструмента.

Наукове значення роботи полягає в розвитку теорії знеміцнення гірських порід при алмазному бурінні під впливом нестационарних теплофізичних процесів, що відбуваються на вибої свердловини при імпульсному промиванні свердловини, теорії взаємодії алмазних коронок з гірським масивом при бурінні, та встановлені нових закономірностей, що

зв'язують параметри руйнування породи при бурінні з параметрами теплообміну на вибої при імпульсному промиванні.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується використанням фундаментальних законів збереження, механіки суцільних середовищ, коректністю зроблених припущень, всебічним тестуванням розробленої методики розрахунку параметрів теплофізичних процесів при бурінні з імпульсним промиванням, задовільною збіжністю розрахункових та експериментальних даних (середня розбіжність склала 10%) з визначення температури при стендовому бурінні.

Практична цінність роботи полягає в:

- розробці уточненого розрахункового співвідношення для визначення контактної температури при бурінні алмазними коронками;
- розробці методики, алгоритму та програмного забезпечення для моделювання процесів теплообміну при бурінні серійними алмазними коронками при переривчастому режимі промивання;
- розробці методики і побудові критеріальних рівнянь для розрахунку коефіцієнтів конвективної тепловіддачі бурових коронок при бурінні з переривчастим промиванням;
- розробці рекомендацій щодо вибору часових параметрів переривчастого промивання і параметрів технологічного процесу, що забезпечують температурний режим роботи алмазних бурових коронок, при якому не перевищується температура практичної термостійкості;
- обґрунтуванні впливу конструктивних параметрів бурових коронок на їхні температурні режими при бурінні і розробці рекомендацій щодо вдосконалення бурового інструменту;
- розробці технічного рішення з удосконалення алмазної бурової коронки, що дозволяє посилити термоциклічний вплив на породу при бурінні, за яким отриманий патент на корисну модель;
- використанні матеріалів роботи при підготовці фахівців у сфері технічної теплофізики, механіки та технології буріння свердловин.

Матеріали дисертаційної роботи знайшли відображення в навчальних посібниках «Математичне моделювання та методи розрахунку теплотехнологічних процесів», «Математичні методи дослідження теплообміну» (гриф МОНУ), використані в навчальному процесі Національного гірничого університету при курсовому і дипломному проектуванні студентів, що навчаються за спеціальністю «Гірництво», а також навчальному процесі Дніпровського національного університету ім. О. Гончара при підготовці фахівців за напрямками «Теплоенергетика» та «Механіка» при курсовому і дипломному проектуванні.

Реалізація результатів роботи. Розроблені за результатами роботи методичні рекомендації щодо визначення параметрів теплофізичних процесів при переривчастому промиванні затверджені науково-технічною радою Казенного підприємства «Південукргеологія» і рекомендовані до використання при проектуванні технологій алмазного буріння з

переривчастим промиванням, рекомендації прийняті «ТОВ Промислово-геологічна група «Дніпрогідробуд» для використання у виробничих умовах.

Методика і розроблена на її базі програма розрахунку параметрів переривчастого промивання при бурінні прийнята Інститутом геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова (м. Дніпро) Національної академії наук України для використання при проведенні науково-дослідних робіт з ідентифікації параметрів і управління геотехнологічними системами.

Методику розрахунку було схвалено та прийнято до використання при проведенні науково-дослідних робіт Цзілінського університету (м. Чанчунь, Китай).

Особистий внесок автора.

Усі результати експериментальних і теоретичних досліджень, що подані в роботі, отримано особисто або за безпосередньої участі автора. Автором сформульовано мету, ідею і наукові положення роботи, виконано теоретичні дослідження теплового балансу на вибої свердловини та експериментальні дослідження контактної температури при алмазному бурінні, теоретичні дослідження термічного впливу на міцність гірської породи, розроблено методологію дослідження теплообмінних процесів при бурінні з переривчастим режимом промивання, виконано чисельні дослідження і аналіз результатів, сформульовано висновки і рекомендації щодо визначення параметрів переривчастого промивання при алмазному бурінні.

Апробація результатів роботи.

Основні положення та наукові результати роботи розглядалися на: міжнародних наукових та науково-практичних конференціях «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника, технология его изготовления и применения» (АР Крим, Морське, 2005, 2007, 2008, 2009, 2010; Трускавець, 2014, 2015, 2016, 2017), «Бурение скважин в осложненных условиях» (Донецьк, 2006, 2010), «Форум гірників» (Дніпропетровськ, 2005, 2006, 2007, 2011, 2015), «Проблемы промышленной теплотехники» (Київ, 2007), «Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу» (Дніпропетровськ, 2006), «3-ті Епштейнівські читання» (Дніпропетровськ, 2009), «Геологоразведочное и нефтегазовое дело в XXI веке: технологии, наука, образование» (Алматы, Казахстан 2016), «Теплотехнічні процеси і обладнання» (Харків, 2016), засіданнях науково-технічних рад Казенного підприємства «Південукргеологія» (Дніпро, 2015) і ТОВ Промислово-геологічної групи «Днепрогідробуд» (Дніпро, 2015), семінарі кафедри буріння Цзілінського університету (Чанчунь, Китай 2017).

Публікації.

Основні наукові положення і результати дисертації опубліковані в 40 наукових працях, з них 2 монографії, 2 навчальних посібники, 24 статті у фахових виданнях, що входять до переліку МОН України (у т. ч. 3 статті в журналах, що індексуються в наукометричній базі Scopus, 1 стаття в

журналі, що індексується в наукометричній базі Web of Science Core Collection), 3 статті в зарубіжних виданнях, 8 статей в матеріалах наукових конференцій, 1 патент на корисну модель.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, шості розділів, висновків, 8 додатків на 51 сторінці, списку використаних джерел, що містить 289 найменувань на 37 сторінках. Містить 292 сторінки машинописного тексту, 103 рисунка і 46 таблиць. Загальний обсяг дисертації становить 380 сторінок.

Автор висловлює свою вдячність колективу кафедри техніки розвідки родовищ корисних копалин Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» за допомогу в проведенні досліджень.

Частина експериментальних робіт виконано в Цзілінському університеті (м. Чанчунь, Китай) у відповідності до договору про наукове співробітництво між Національним гірничим університетом і Цзілінським університетом. Автор вдячний професору кафедри буріння будівельного коледжу Цзілінського університету Баочангу Лю (Baochang Liu) за допомогу в проведенні експериментальних робіт.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність обраної теми, розкритий зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, поставлена мета і сформульовані завдання дослідження, викладені ідея, об'єкт, предмет і методи дослідження, зазначені наукові положення та наукова новизна отриманих результатів, наведено практичне значення результатів роботи, задекларовано особистий внесок автора, висвітлені апробація результатів роботи, публікації за темою.

У **першому розділі** роботи наведено основні відомості про технологію буріння з імпульсним промиванням, подано класифікацію видів імпульсного промивання, проаналізовано роль температурного фактора при бурінні та виконано огляд досліджень з термічного руйнування гірських порід і теплофізичних процесів, що відбуваються на вибої під час буріння,

Показано, що для інтенсифікації знеміцнення гірської породи, за рахунок ефективного використання теплової енергії, що генерується на вибої під час буріння, серед можливих імпульсних способів промивання найперспективнішим є переривчасте промивання. Дана технологія промивання дозволяє досягти максимального теплового впливу на гірську породу й реалізувати термоциклічний ефект руйнування. Подано результати експериментальних досліджень, які свідчать про суттєве підвищення ефективності руйнування гірської породи і збільшення механічної швидкості буріння при застосуванні переривчастого промивання. Тому для подальших досліджень обрано переривчасте промивання.

Напружено-деформований стан та процеси руйнування гірських порід під впливом полів різної фізичної природа, у тому числі теплових полів, вивчалися в роботах Є.Ф. Епштейна, В.В. Нескоромних, Є.Ю. Пігиди, А.О. Кожевникова, В.М. Мойсишина, Н.В. Зуєвської, Е.М. Барановського, В.В. Круковської, С.Л. Полуянського, О.А. Галяса, С.О. Гончарова, О.П. Дмитрева, О.М. Москальова, Ю.М. Вахаліна, Дж. Тестера (J. Tester), Р. Роха (Rudolph von Rohr), М. Канта (M. Kant). Проаналізовано роботи в яких закладено основи методів розрахунку процесів термічного і термоциклічного руйнування гірських порід. Водночас показано ризики підвищеного зносу бурових коронок, що пов'язано зі зміною температурного режиму буріння та підвищенням контактної температури. Проблема взаємодії бурового інструменту з гірською породою і нормалізації температурного режиму при бурінні вивчалася в працях О.Н. Щербаня, В.П. Черняка, Б.Б. Кудряшова, А.А. Яковлева, Л.К. Горшкова, Ю.М. Оношко, А.М. Абдуладзе, Б.І. Єсьмана, М.І. Корнілова, Г.А. Блінова, Р.К. Богданова, В.Ф. Чихоткіна, В.Г. Горелікова, П.П. Вирвінського, П.Н. Курочкіна, Ю.Є. Будюкова, В.Є. Копилова, О.М. Ісонкіна, М.О. Бондаренка, М.А. Александрова, В.А. Мечника, Я.В. Кунцяка, Дж. Бретта (J.F. Brett), Т. Уорена (T. Warren), В. Пракаша (V. Prakash), А. Ортеги (A. Ortega); Д. Гловки (D. Glowka), Ф. Епла (F.C. Appl), В. Вілсона (W. Wilson).

Разом з тим виконаний аналіз праць показав, що більшість результатів мають частковий характер, єдиний погляд на фізичну картину, що має місце на вибої при бурінні, відсутній, а відомі моделі не дають змогу прогнозувати контактну температуру буріння з переривчастим режимом промивання.

На підставі виконаного в першому розділі роботи аналізу сформульовані задачі досліджень.

У **другому розділі** виконані дослідження впливу переривчастого промивання на нагрівання гірської породи при бурінні та аналіз теплового балансу на вибої в умовах такого режиму промивання.

Введено та обґрунтовано енергоємнісний критерій ефективності буріння:

$$K_{\text{еф}} = \frac{V^{\text{пост}}}{V^{\text{перер}}} = \frac{A^{\text{пост}}}{(A^{\text{пост}} - \Delta A)} = \left(1 - \frac{\Delta A}{A^{\text{пост}}}\right)^{-1},$$

де ΔA – зниження енергоємності руйнування при переривчастому промиванні, яке, відповідно, визначається:

$$\Delta A = A^{\text{пост}} \left(1 - \frac{1}{K_{\text{еф}}}\right)^{-1}.$$

За результатами експериментального буріння з постійним та переривчастим режимами промивання розраховано зниження енергоємності процесу руйнування гірської породи при переривчастому промиванні (табл. 1).

Таблиця 1

Зниження енергоємності процесу руйнування

Вибійна потужність, N, кВт	Коефіцієнт переривчастості, $k_{\text{перер}}$	Коефіцієнт ефективності, $K_{\text{еф}}$	Енергоємність, $A_{\text{пост}}$, кДж/м ³	Зниження енергоємності, ΔA	
				кДж/ м ³	%
1,7	1	2,2	4880·10 ³	2660·10 ³	54.5
	0,2	2,0		2440·10 ³	50
3,4	1	1,45	1850·10 ³	583·10 ³	31.5
	0,2	1,18		282·10 ³	15.3

Розглянуто задачу про тепловий баланс на вибої свердловини з урахуванням висоти коронки та її охолодження і розподіл теплових потоків між гірською породою та буровою коронкою.

Теплота, що генерується на вибої, розподіляється між гірською породою та породоруйнуючим інструментом та відводиться з поверхні інструмента за допомогою конвективного теплообміну. Частка теплоти, що відводиться до породи та інструмента, враховується відповідним коефіцієнтом $k_{\text{п}}$, k_i :

$$q_1 = k_{\text{п}} q_s, \quad q_2 = k_i q_s,$$

де індекс «1» належить до гірської породи, «2» – до інструмента, q_s – поверхнева щільність теплового потоку, який генерується на вибої.

Математична модель у безрозмірному вигляді, що описує розподіл теплових потоків на вибої, має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial Fo} &= k_a \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2}, \quad -\infty < x < 0, \quad Fo > 0; \\ \frac{\partial u_2}{\partial Fo} &= \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} - A_c \cdot u_2, \quad 0 < x < 1, \quad Fo > 0; \\ u_1|_{Fo=0} &= u_2|_{Fo=0} = 0; \\ \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow -\infty} &= 0; \\ \frac{\partial u_2}{\partial x} \Big|_{x=1} &= 0; \\ u_1|_{x=0} &= u_2|_{x=0}; \\ \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=0} - k_\lambda \frac{\partial u_2}{\partial x} \Big|_{x=0} &= Ki, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $u_j = \frac{t_j - t_p}{t_p}$; $x = \frac{X}{L}$; $k_\lambda = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$; $Fo = \frac{\tau a_2}{L^2}$ – критерій Фур'є; $A_c = \frac{\alpha \Pi L^2}{\lambda_2 F}$ –

«охолоджувальний» фактор, $Ki = \frac{q_s L}{\lambda_1 t_p}$ – критерій Кірпічова; $k_a = \frac{a_1}{a_2}$ –

коефіцієнт тепловіддачі; α – коефіцієнт тепловіддачі; τ – час; a_j – коефіцієнти температуропровідності; L – висота інструменту; λ_j – коефіцієнти теплопровідності; F – площа поперечного перерізу інструмента, Π – периметр поверхні, що охолоджується; t_p – температура охолоджуючої рідини.

Задачу (1) розв'язано чисельно-аналітичним методом. На рис. 1 наведено приклад її розв'язання для параметрів, що відповідають реальним умовам буріння: $\lambda_1 = 2,38$ Вт/(м·град), $\lambda_2 = 120$ Вт/(м·град), $t_p = 20$ °С, $\alpha = 2,7 \cdot 10^4$ Вт/(м²·град).

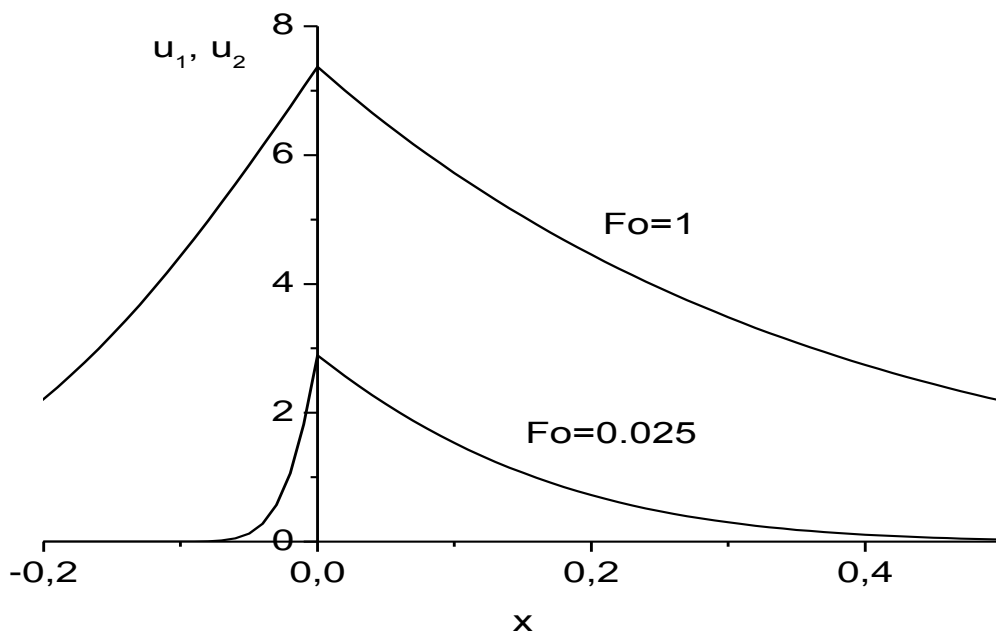


Рис. 1. Розв'язок задачі (1)

Показано, що, не втрачаючи значно в точності розв'язання, цю задачу можна поділити на окремі задачі для гірської породи й інструмента з використанням відповідних коефіцієнтів розподілу теплових потоків та граничних умов на поверхні вибою.

Отриманий розв'язок дозволив визначити за законом Фур'є теплові потоки, що спрямовані в гірську породу та інструмент, і, відповідно, коефіцієнти розподілу. На рис. 2 наведено зміни коефіцієнта розподілу теплоти в гірську породу k_{Π} залежно від інтенсивності охолодження (охолоджуючого фактора) та з урахуванням залежності теплофізичних властивостей породоруйнуючих індентерів (бурових алмазів) від температури.

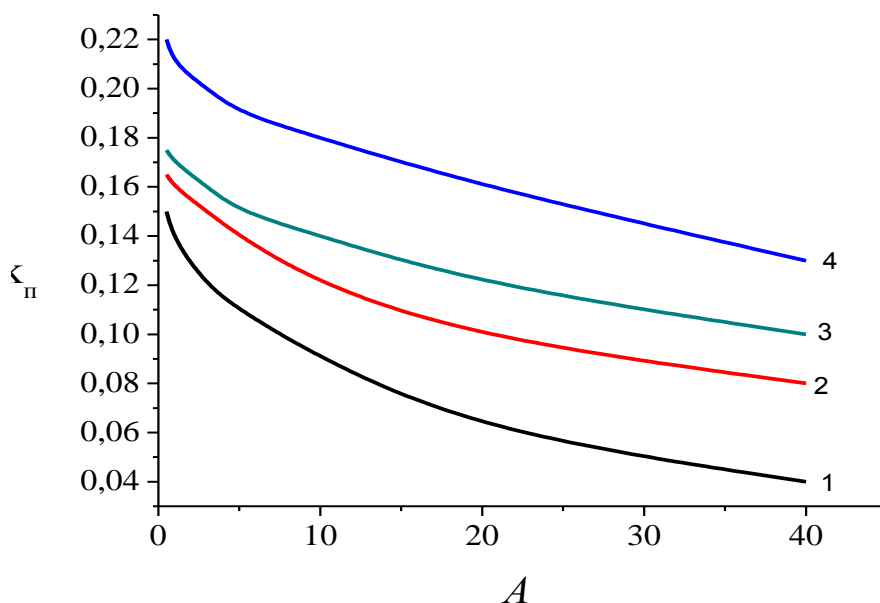


Рис. 2. Залежність коефіцієнта $k_{п}$ від охолоджуючого фактора A_c для пари «граніт – алмаз» при різних значеннях контактної температури: 1 – $t=75$ °C; 2 – $t=175$ °C; 3 – $t=275$ °C; 4 – $t=425$ °C

Отже, для пари тертя «граніт–алмаз» з урахуванням зміни теплофізичних властивостей від температури розрахунки показали, що коефіцієнт $k_{п}$ може змінюватись в 1,45 – 3,7 залежно від контактної температури. Таким чином, доведено, що переривчасте промивання вибою свердловини при алмазному бурінні дозволяє перерозподілити теплові потоки на вибої та збільшити частку теплоти, що спрямовується до гірської породи.

Математичне моделювання температурних полів у гірській породі, що утворюються при бурінні алмазними коронками, показало (рис. 3), що в тонкому привибійному шарі гірської породи виникають коливання температури внаслідок почергового впливу сектора алмазної коронки та промивальної рідини.

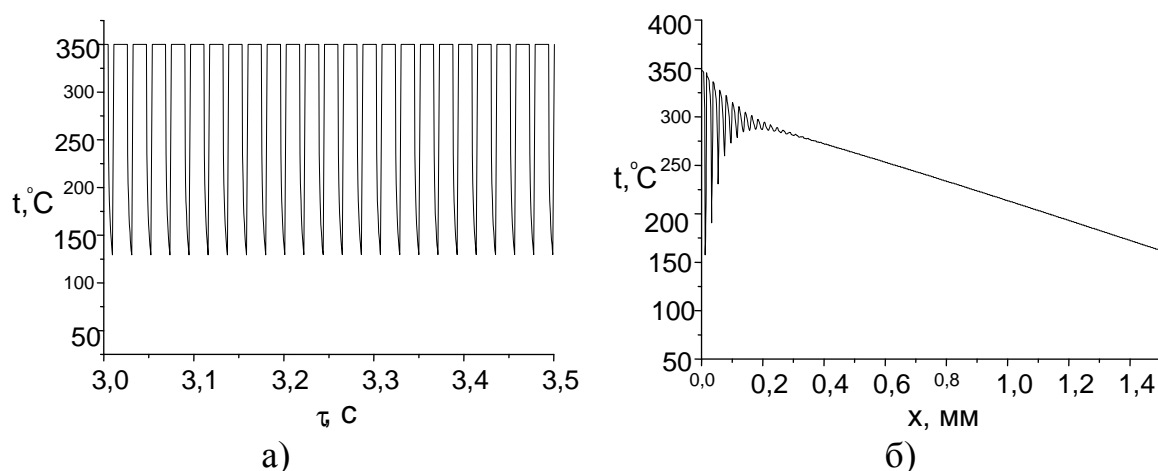


Рис. 3. Коливання температури поверхні вибою з часом при бурінні (а), коливання температури в привибійному шарі породи (б)

Амплітуда температури, що виникає на поверхні вибою, сягає 325 °С. Переведення промивання в переривчастий режим дозволяє збільшити амплітуду температури та інтенсифікувати термоциклічне знеміцнення гірської породи.

Розроблено методику експериментальних досліджень та виконано стендове дослідження контактної температури при бурінні алмазними коронками. Загальний вигляд експериментального стенду наведено на рис. 4.

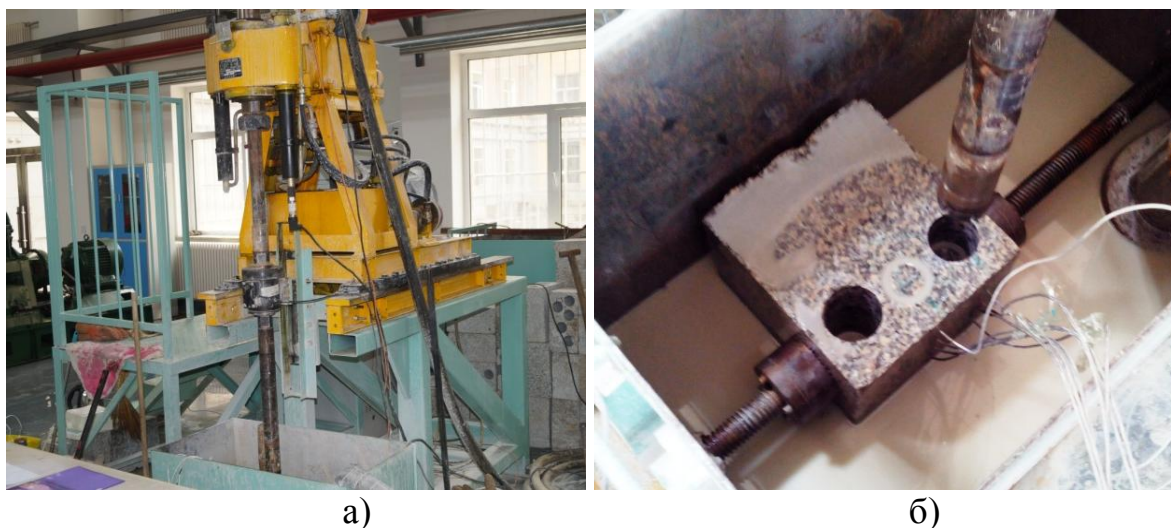


Рис. 4. Загальний вигляд експериментального стенду (а) і блока гірської породи (б)

Результати стендових досліджень показали, що зменшення витрати промивальної рідини (технічна вода) менше ніж 25 л/хв призводить до різкого зростання контактної температури, та, відповідно, до зростання перепаду температури на поверхні вибою. Перехід до переривчастого режиму промивання дозволяє збільшити цей перепад до 2 разів.

У **третьому розділі** дисертаційної роботи виконано дослідження знеміцнення гірської породи при термоциклічному впливі алмазної бурової коронки при переривчастому промиванні.

Теорія термоциклічного знеміцнення гірських порід базується на теорії термопружності в рамках моделі крихкого руйнування Гріффітса. Основними співвідношеннями, що покладені в основу методики розрахунку параметрів знеміцнення, є вираз для напружень розтягування:

$$\sigma_* = \sigma_{\max} = \frac{\beta \cdot E \cdot (T_z - T_x)}{1 - \mu},$$

де β – коефіцієнт лінійного теплового розширення; E – модуль Юнга; T_z – температура нагріву; T_x – температура охолодження; μ – коефіцієнт Пуассона породи. Зв'язок між значенням напруження σ_* і мінімальною довжиною тріщини l_* , що розкривається таким напруженням, визначається залежністю Гріффітса:

$$\sigma_* = \frac{K\sqrt{2}}{\pi\sqrt{l_*}},$$

де K – константа матеріалу, яка визначається з виразу:

$$K^2 = \frac{\pi \cdot E \cdot \gamma}{1 - \mu}.$$

Використовуючи той факт, що при бурінні в привибійному шарі гірської породи формується зона передруйнування, яка характеризується наявністю системи мікротріщин, розглянуто термоциклічний вплив на цю зону з метою послаблення гірської породи. Умова переходу тріщин з рівноважного стану в рухомий стан:

$$\pi N_0 > K, \quad (2)$$

де N_0 – коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) у вершині тріщини.

Після переходу від нагрівання до охолодження у поверхневому шарі породи паралельно межі півпростору напруження розтягування описуються виразом:

$$\sigma_p = \sigma_* \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \exp(hx + h^2 a\tau) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + h\sqrt{a\tau}\right) \right]. \quad (3)$$

Для визначення параметрів за яких тріщина переходить в рухомий стан, враховуючи (2) та (3), розглядається рівняння:

$$N_0 = \frac{\sqrt{2l}}{\pi} \int_0^l \frac{\sigma_p(x)}{\sqrt{l^2 - x^2}} dx, \quad (4)$$

де l – поточна довжина тріщини. Для наближеного розв'язання (4) використано розкладення:

$$N_0 = -\sigma\sqrt{2\pi l} (0.7930C_0 + 0.4829C_1 + 0.3716C_2 + 0.3118C_3 + 0.2735C_4 + 0.2464C_5 + 0.2260C_6 + 0.2090C_7 + 0.1968C_8 + 0.1858C_9 + 0.1765C_{10})$$

та лінійне представлення (3) у вигляді:

$$\sigma(\xi, \tau') = -\sigma_* \varphi(\xi, \tau'),$$

де $\varphi(\xi, \tau') = 1 - \exp(\operatorname{Bi}^2 \tau') \operatorname{erfc}(\operatorname{Bi} \sqrt{\tau'}) - \operatorname{Bi} \exp(\operatorname{Bi}^2 \tau') \operatorname{erfc}(\operatorname{Bi} \sqrt{\tau'}) \cdot \xi$; $\tau' = \frac{a\tau}{l_*^2}$ –

безрозмірний час; $\operatorname{Bi} = \frac{\alpha l_*}{\lambda}$ – критерій Біо; $\zeta = x/l_*$; $\xi = x/l$; $L = \frac{l}{l_*}$.

Отриманий розв'язок (4), який у безрозмірному вигляді записується так:

$$\sqrt{\frac{1}{L}} = 0.895 \cdot A(\tau', \operatorname{Bi}) - 0.545 \cdot B(\tau', \operatorname{Bi}) \cdot L, \quad (5)$$

де $A(\tau', \operatorname{Bi}) = 1 - \exp(\operatorname{Bi}^2 \tau') \operatorname{erfc}(\operatorname{Bi} \sqrt{\tau'})$; $B(\tau', \operatorname{Bi}) = -\operatorname{Bi} \exp(\operatorname{Bi}^2 \tau') \operatorname{erfc}(\operatorname{Bi} \sqrt{\tau'})$.

Вираз (5) зв'язує параметри знеміцнення гірської породи при термоциклічному впливі з урахуванням конвективного теплообміну поверхні вибою з промивальною рідиною. На рис. 5 наведено результати розрахунку залежності безрозмірного часу руйнування від відносної

довжини тріщини для різних значень інтенсивності теплообміну на поверхні.

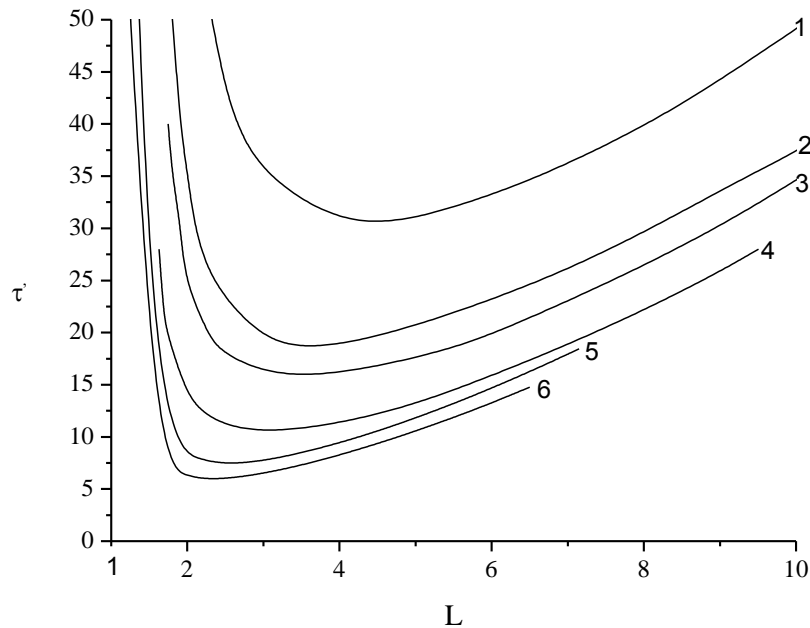


Рис. 5. Залежність безрозмірного часу руйнування від довжини тріщини для різних значень критерію Bi , розрахована:

1 – $Bi = 0,5$; 2 – $Bi = 1$; 3 – $Bi = 1,5$; 4 – $Bi = 2$; 5 – $Bi = 5$; 6 – $Bi \rightarrow \infty$

З використанням отриманої залежності виконано дослідження термоциклічного знеміцнення гірських порід при бурінні з переривчастою промивкою. Для оцінки зниження міцності породи введено параметр:

$$\gamma = \frac{\sigma}{\sigma_0} = \sqrt{\frac{l_0}{l}},$$

де l_0 – початкова довжина тріщини; σ_0 – напруження, що потрібне для розкриття початкової тріщини; l – кінцева довжина тріщини; σ – напруження, що потрібно для розкриття кінцевої тріщини. Тоді за проміжок часу T міцність знижується:

$$\gamma = \left(\frac{l}{l_0}\right)^{-\frac{1}{2}} = \left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0}\right)^{-\frac{1}{2}} = \left(1 + \frac{1}{l_0} \int_0^T v(\tau) d\tau\right)^{-\frac{1}{2}}.$$

Швидкість зростання тріщини $v(\tau)$, визначається за допомогою (5). Для граніту $a = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $E = 2,9 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $\beta = 1 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$, $\mu = 0,1$, $K = 1,7 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^{3/2}$ при бурінні стандартними буровими коронками маємо параметри знеміцнення, що вказані в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри, що характеризують термоциклічне знеміцнення породи при різних режимах промивання

Режим промивання	Постійний	Переривчастий
Перепад температури, °С	300	580
Напруження σ_* , Н/м ²	$-9,667 \cdot 10^7$	$-1,933 \cdot 10^8$
Мінімальна довжина тріщини l_* , що розкривається напруженням σ_* , мм	0,063	0,016
Мінімальна потрібна довжина тріщини для стійкого зростання, l_{\min} , мм	0,142	0,036
Час затримки процесу руйнування τ_{\min} , с	0,0028	0,00098

Виконано розрахунки знеміцнення гірської породи для мікротріщин різної початкової довжини. наведені Початкові значення розмірів мікротріщин взяті з відомих експериментальних даних. Результати розрахунків показують, що зниження міцності сягає 66% для випадку, коли початкові розміри тріщин відносно малі.

Вплив фізико-механічних властивостей гірських порід на ефективність термоциклічного руйнування при бурінні з переривчастим промиванням наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Параметри термоциклічного знеміцнення гірських порід при бурінні з переривчастим промиванням

Гірська порода	Напруження σ_* , Н/м ²	Мінімальна довжина тріщини, l_{\min} , мм	Час затримки процесу руйнування, τ_{\min} , с
Граніт	$-1,93 \cdot 10^8$	0,035	0,001
Залізистий кварцит	$-2,42 \cdot 10^8$	0,07	0,004
Піщаник	$-5 \cdot 10^7$	0,1	0,99
Діорит	$-3,87 \cdot 10^8$	0,007	0,0003

Опір термоциклічному руйнуванню залежно від фізико-механічних і теплофізичних властивостей описується за допомогою критерію:

$$H = 2.39 \frac{1}{a} \left(\frac{\gamma}{E} \right)^2 \left(\frac{1-\mu}{\beta} \right)^4.$$

Результати розрахунку цього критерію для різних гірських порід наведено у табл.4.

\

Таблиця 4

Опір термоциклічному руйнуванню гірських порід

Гірська порода	Опір руйнуванню, $H, \text{с} \cdot \text{K}^4$	Час затримки, процесу руйнування $\tau_{\min}, \text{с}$
Граніт	$2,75 \cdot 10^7$	0,001
Залістий кварцит	$1,07 \cdot 10^7$	0,004
Піщаник	$1,32 \cdot 10^{11}$	0,99
Діорит	$1,53 \cdot 10^6$	0,0003

Зроблено висновок, що для гірських порід з високим значенням $H > 10^{11}$ термоциклічне руйнування ефективне лише в разі тривалого впливу на породу охолоджуючого агента. У той же час знеміцнення гірських порід зі значенням H порядку 10^7 та менше при алмазному бурінні з переривчастим промиванням цілком можливе.

У четвертому розділі виконано дослідження процесів конвективної тепловіддачі на вибої свердловини при бурінні з переривчастим промиванням.

Для визначення контактної температури при переривчастому промиванні та визначенні параметрів теплообміну розглянуто процес нагрівання та охолодження бурової коронки при бурінні. Для моделювання нагрівання бурової коронки запропоновано одновимірну математичну модель:

$$\begin{aligned}
 c_1 \rho_1 \frac{\partial t_1}{\partial \tau} &= \lambda_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial x_1^2}, \\
 c_2 \rho_2 \frac{\partial t_2}{\partial \tau} &= \lambda_2 \frac{\partial^2 t_2}{\partial x_2^2} - A_2(\tau) \cdot (t_2 - t_p), \\
 c_3 \rho_3 \frac{\partial t_3}{\partial \tau} &= \lambda_3 \frac{\partial^2 t_3}{\partial x_3^2} - A_3(\tau) \cdot (t_3 - t_p), \\
 c_4 \rho_4 \frac{\partial t_4}{\partial \tau} &= \lambda_4 \frac{\partial^2 t_4}{\partial x_4^2} - A_4(\tau) \cdot (t_4 - t_p),
 \end{aligned} \tag{6}$$

де індекси 1, 2, 3, 4 відповідають чотирьом ділянкам коронки; λ – теплопровідність матеріалів; ρ – густина матеріалів; c – питома масова теплоємність матеріалів; F – площа поперечного перерізу відповідної ділянки, t_p – температура промивальної рідини. Кожне з рівнянь системи (6) описує процес теплопередачі на певній ділянці бурової коронки.

Охолодження коронки моделюється введенням параметрів $A_j(\tau)$:

$$A_1(\tau) = 0, \quad A_2(\tau) = \frac{\alpha_2(\tau)\Pi_2}{F_2}, \quad A_3(\tau) = \frac{\alpha_3(\tau)\Pi_3}{F_3}, \quad A_4(\tau) = \frac{\alpha_4(\tau)\Pi_4 + \alpha_5(\tau)\Pi_5}{F_4}.$$

Для усталеного потоку промивальної рідини з постійною витратою, отримано аналітичний розв'язок:

$$t_k = \left(k_o + \frac{1}{Gc_p} \right) k_i N + sH + t_0 + t_p, \quad (7)$$

де k_o – показник інтенсивності теплообміну алмазної коронки з промивальною рідиною; H – поточна глибина свердловини; s – термоградієнтний коефіцієнт; t_0 – температура породи у поверхні.

Параметр k_o визначається зі стаціонарного розв'язку (6) та має вигляд

$$k_o = \frac{l_1}{\lambda_1 F_1} - \frac{1}{\lambda_2 F_2 M_2} \cdot \frac{e^{M_2 l_1} - \Xi \cdot e^{-M_2 l_1}}{e^{M_2 l_1} + \Xi \cdot e^{-M_2 l_1}}. \quad (8)$$

де M_2, Ξ – комплекси, що враховують конструкційні особливості бурової коронки та коефіцієнти тепловіддачі.

Дослідження конвективного теплообміну в промивальному каналі бурових коронок виконано чисельно. Математична модель процесів гідродинаміки являє собою стандартну двопараметричну $\kappa - \varepsilon$ модель:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} &= 0, \\ \frac{\partial u_i}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + v_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \\ \frac{\partial \kappa}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \kappa) &= + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + \frac{v_t}{\rho} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon, \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \varepsilon) &= + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} v_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{\kappa}, \\ v_t &= C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon}, \end{aligned} \quad (9)$$

де u – осереднені компоненти вектора швидкості; κ – кінетична енергія турбулентності; ε – дисипація енергії турбулентності; p – осереднений тиск у потоці; v – коефіцієнт кінематичної в'язкості промивальної рідини; v_t – коефіцієнт кінематичної турбулентної в'язкості; ρ – густина промивальної рідини; τ – час; $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_\kappa = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ – емпіричні константи турбулентності, $C_\mu = 0.09$. Як модель привибійної ділянки свердловини і промивального каналу прийнято П-подібну область. Система (9) доповнюється граничними умовами «прилипання» на твердих поверхнях, у вхідному перерізі задається витрата промивальної рідини, яка є функцією часу.

На рис. 6–8 наведено результати моделювання поля швидкостей і поля тиску в потоці для різних моментів часу в період подачі при номінальній витраті $Q_0 = 60$ л/хв для $\delta\tau_1 = \delta\tau_2 = 0,5$ с.

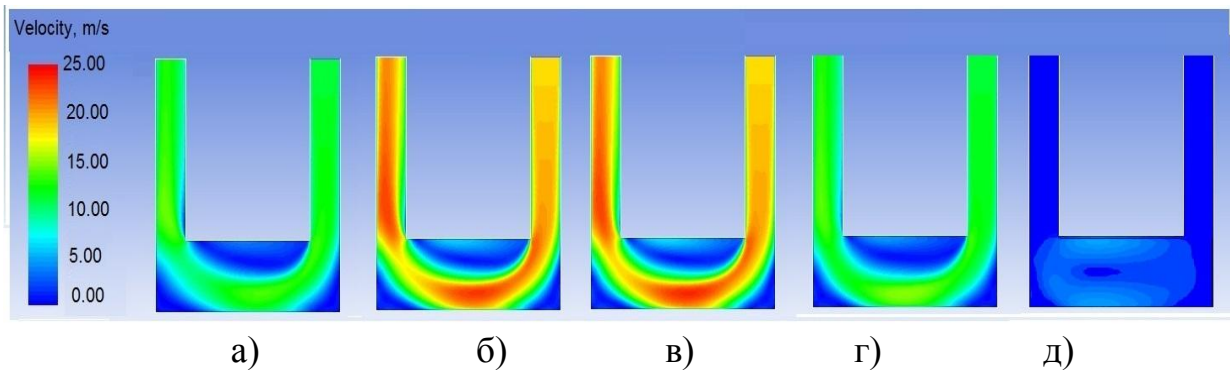


Рис. 6. Поле швидкостей потоку рідини в каналі у фазі подачі: а) – 0,1 с; б) – 0,2 с; в) – 0,3; г) – 0,4 с; д) – 0,5 с

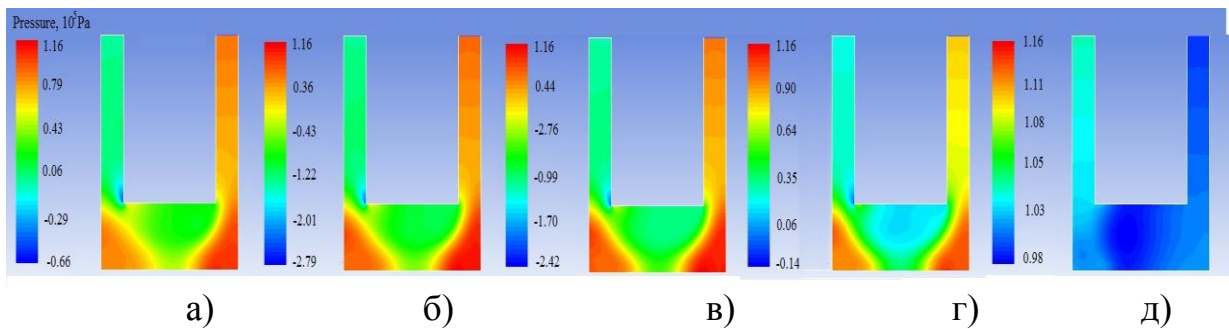


Рис. 7 Поле тиску в каналі у фазі подачі: а) – 0,1 с; б) – 0,2 с; в) – 0,3 с; г) – 0,4 с; д) – 0,5

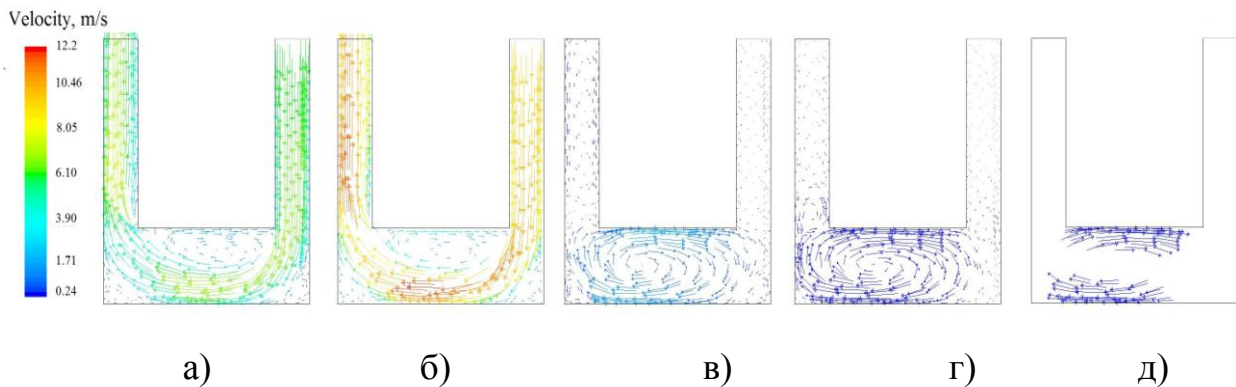
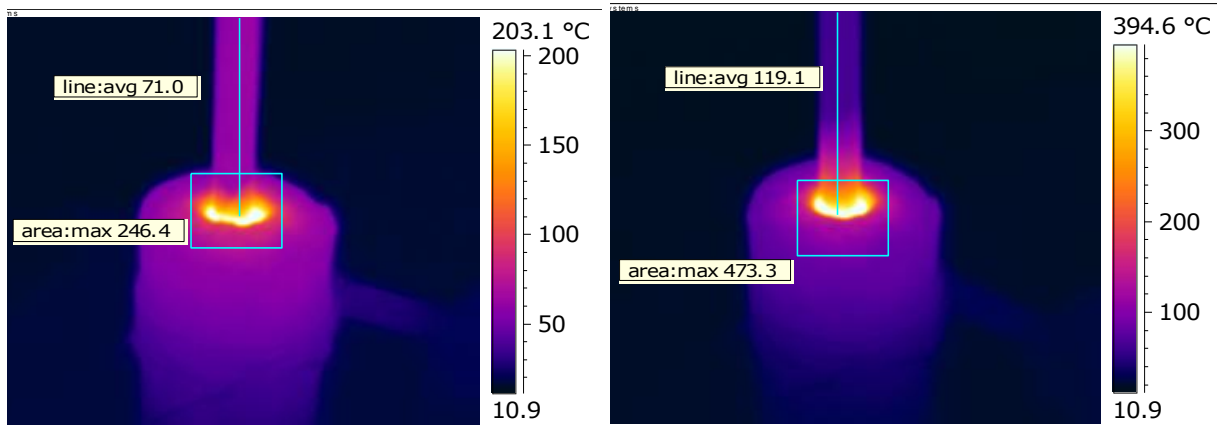


Рис. 8. Вектори швидкості в каналах протягом циклу «подача – пауза»: а) – 0,1 с; б) – 0,3 с; в) – 0,5 с; г) – 0,8 с; д) – 0,9 с

Для визначення тепловіддачі у фазі паузи була розроблена методика експериментального дослідження теплообміну на робочій поверхні з використанням інфрачервоної камери (тепловізора). В лабораторних умовах досліджувалася модель бурового інструмента при терті по поверхні гірської породи, та було отримано термограми (рис. 9).



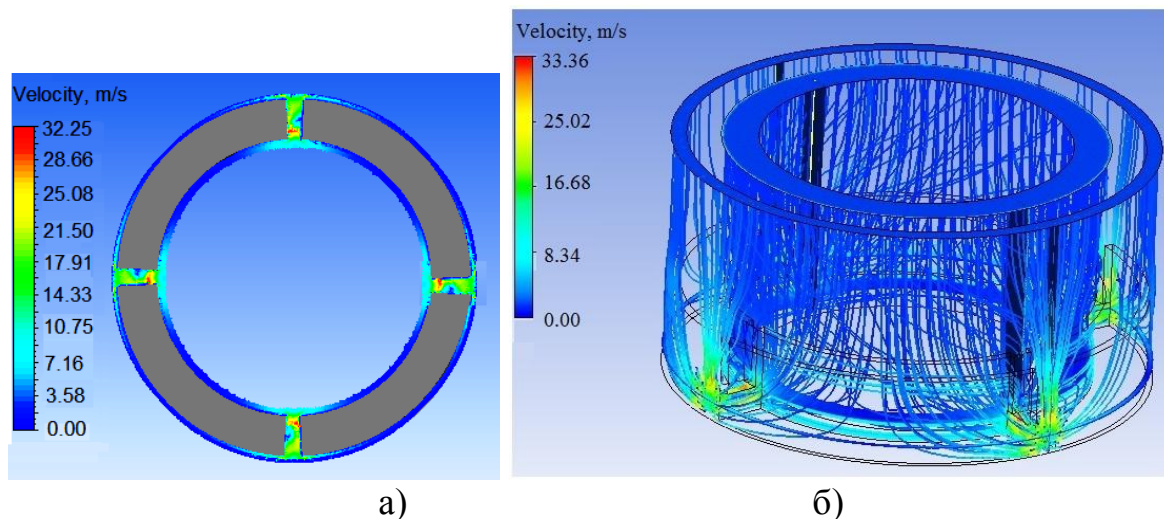
а) б)
Рис. 9. Приклади термограм

Після обробки було отримано параметри критеріального рівняння, що дозволяє визначати коефіцієнти тепловіддачі у фазі паузи:

$$Nu = 4.19 \cdot Re^{0.501},$$

де $Nu = \frac{\alpha D_e}{\lambda_{\text{пов}}}$, $Re = \frac{\pi D^2 n}{v_{\text{пов}}}$, D – діаметр стрижня, n – частота обертання, $\lambda_{\text{пов}}$, $v_{\text{пов}}$ – коефіцієнти теплопровідності і кінематичної в'язкості повітря.

Для розрахунку тепловіддачі у фазі подачі було виконано комп'ютерне моделювання на основі моделі (9) процесу обтікання бурової коронки на вибої свердловини (рис. 10–11).



а) б)
Рис. 10. Розподіл поля швидкості при обертанні коронки ($\tau = 3$ с)
а) в площині, що паралельна вибою; б) навколо коронки

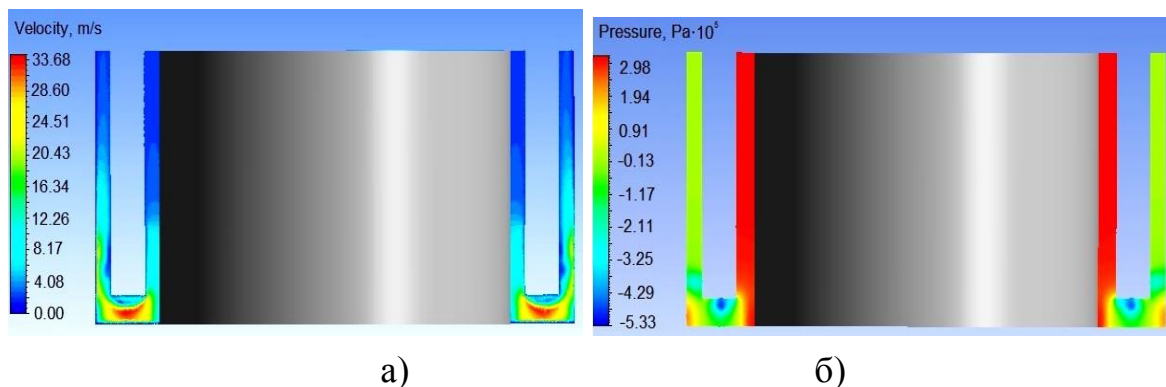


Рис. 11. Розподіл поля швидкості (а) і тиску (б) в привибійній зоні

Результати комп'ютерного моделювання дозволили отримати числові значення коефіцієнтів тепловіддачі на вибої у фазі подачі. Показано, що при переривчастому режимі промивання у фазі подачі коефіцієнти тепловіддачі знижуються на 37% порівняно зі стаціонарним промиванням.

Для верифікації методики дослідження нестационарного температурного режиму бурових коронок та визначення контактної температури при бурінні з переривчастою промивкою було проведено порівняльний аналіз результатів розрахунку з низкою результатів інших авторів, а також з результатами експериментів та результатами комп'ютерного моделювання. Доведено адекватність запропонованої математичної моделі і достовірність результатів моделювання. Порівняння результатів розрахунку температури за запропонованою методикою з експериментальними даними показало середню розбіжність результатів 10% при максимальній розбіжності 22%.

У **п'ятому розділі** роботи виконано дослідження впливу параметрів переривчастого промивання на контактну температуру при бурінні.

Для розробки рекомендацій щодо вибору раціональних параметрів переривчастого промивання виконано теоретичні дослідження температурних режимів алмазних бурових коронок при бурінні. Під раціональними параметрами слід розуміти такі технологічні параметри процесу, як потужність на вибої N і витрата промивальної рідини Q , а також характеристики переривчастої подачі промивальної рідини, за яких контактна температура не перевищує критичних значень. За таке значення прийнято температуру 600 °С. Перевищення цієї температури призводить до переходу буріння в критичний режим з підвищеним енергоспоживанням і спричиняє інтенсивне зношування коронок.

На рис. 12 наведено результати розрахунку контактної температури при бурінні алмазною буровою короною з переривчастим режимом подачі промивальної рідини (вода) з $Q_{ном} = 40$ л/хв при потужності на вибої $N = 6,3$ кВт. Тут же наведено графік зміни функції витрат промивальної рідини в часі, що дає можливість прослідкувати її вплив на характер зміни контактної температури.

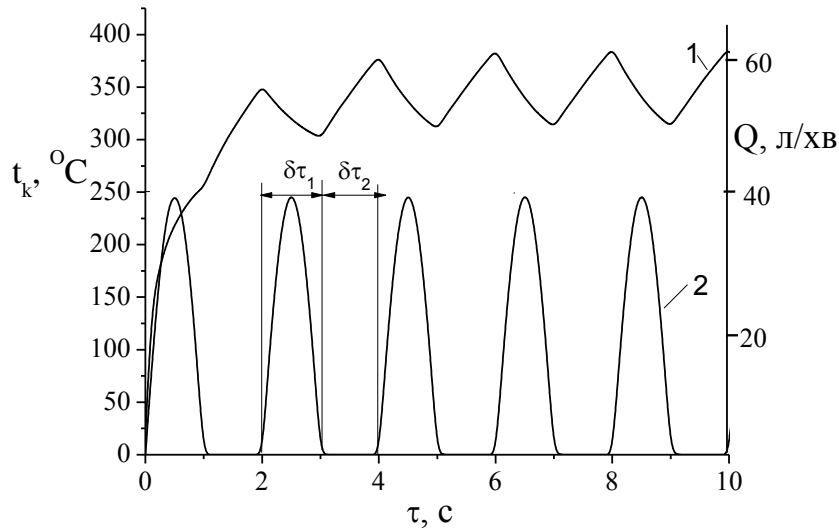


Рис. 12. Зміна контактної температури $t_k=f(\tau)$ та витрат промивальної рідини Q з часом при $\delta\tau_1=\delta\tau_2=1$ с: 1 – контактна температура; 2 – витрата промивальної рідини

Показано, що протягом перших 3–4 с відбувається зростання температури, потім температура виходить на нестационарний усталений режим. Згідно з переривчастим характером подачі промивальної рідини виникають коливання контактної температури в часі. Амплітуда коливань температури при усталеному режимі зберігається постійною.

Вплив тривалості фази подачі $\delta\tau_1$ та фази паузи $\delta\tau_2$ на контактну температуру наведений на рис.13, 14.

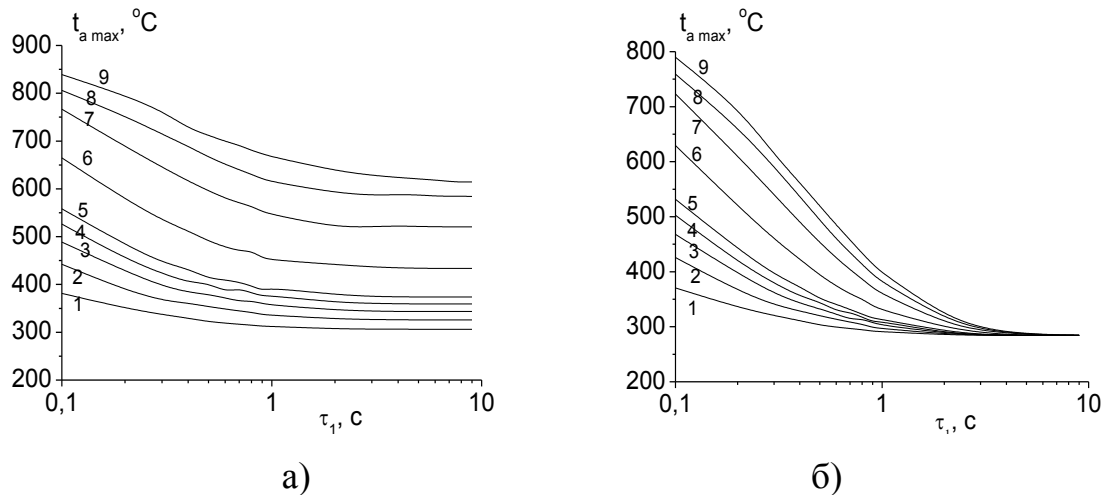


Рис. 13. Максимальна (а) і мінімальна (б) контактна температура залежно від τ_1 для різних значень τ_2 : 1 – 0,2 с, 2 – 0,4 с, 3 – 0,6 с, 4 – 0,8 с, 5 – 1 с, 6 – 2 с, 7 – 4 с, 8 – 6 с, 9 – 8 с

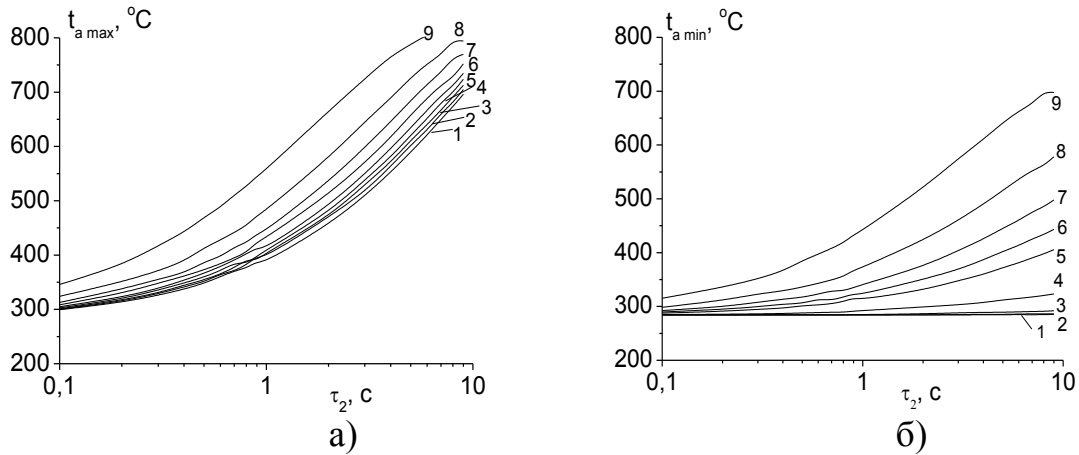


Рис. 14. Максимальна (а) і мінімальна (б) контактна температура алмазів залежно від τ_2 для різних значень τ_1 : 1 – 8 с, 2 – 6 с, 3 – 4 с, 4 – 2 с, 5 – 1 с, 6 – 0,8 с, 7 – 0,6 с, 8 – 0,4 с, 9 – 0,2 с

Аналіз результатів моделювання температурних режимів бурової коронки дозволяє говорити про те, що тривалості фаз паузи $\delta\tau_2$ і подачі $\delta\tau_1$ є факторами, що визначають контактну температуру гірської породи. Зміною тривалості фаз подачі і паузи можна керувати нагріванням коронки і впливати на температурний режим при бурінні з переривчастим режимом.

Розглянуто вплив технологічних параметрів процесу буріння: забійної потужності і витрати промивальної рідини на контактну температуру алмазних коронок. Як основні теплоенергетичні характеристики алмазного буріння запропоновані критична потужність на вибої $N_{кр}$ та мінімально допустима витрата промивальної рідини Q_{min} . Параметри $N_{кр}$ і Q_{min} мають чіткий практичний зміст, який полягає в необхідності дотримувати режимні параметри при бурінні у встановлених межах.

Для стаціонарного режиму промивання значення $N_{кр}$ може бути визначено з використанням критичного значення $t_{кр}$:

$$N_{кр} = \frac{t_{кр} - sH - t_0 - t_p}{k_i \left(k_o + \frac{1}{Gc_p} \right)}$$

У разі режиму переривчастого промивання для визначення $N_{кр}$ і Q_{min} необхідно застосовувати багатфакторний обчислювальний експеримент. Показано, що гранично допустима потужність при переривчастому режимі промивання лінійно залежить від тривалості паузи, зі збільшенням паузи необхідно знизити рівень забійної потужності для збереження докритичного режиму буріння. Залежність Q_{min} від тривалості паузи являє собою лінійну функцію, швидкість зростання якої залежить від потужності на вибої. Із збільшенням потужності на вибої потрібне збільшення

мінімальної витрати промивальної рідини, при цьому для великих значень забійної потужності потрібно збільшення Q_{\min} .

Розроблено рекомендації щодо вибору раціональних параметрів теплофізичних процесів при бурінні з переривчастим промиванням. Для великих інтервалів подачі і паузи такі рекомендації зручно подати у вигляді номограм (рис. 15) з відповідними параметрами.

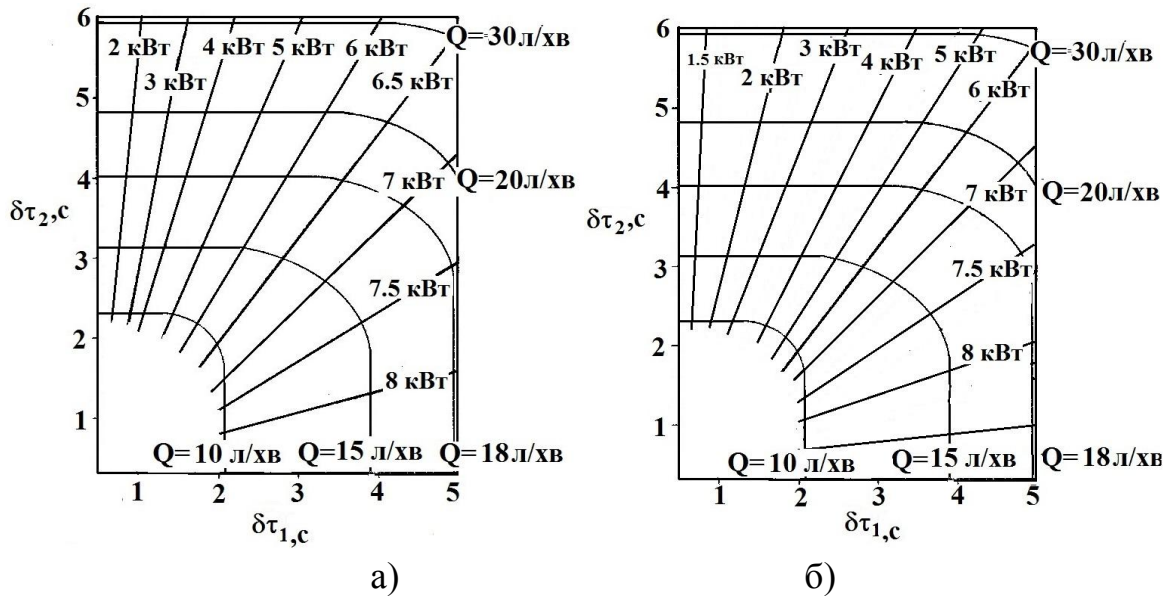


Рис. 15. Номограма для $\delta\tau_1$ і $\delta\tau_2$ залежно від заданих витрат промивальної рідини Q та потужності на вибої для коронки діаметром 76 мм (а); коронки діаметром 59 мм (б)

У шостому розділі роботи розглянуто питання щодо вдосконалення конструкцій бурових коронок для підвищення ефективності термоциклічного знеміцнення гірської породи.

Методика, що розроблена в дисертаційній роботі, використана для дослідження впливу конструктивних особливостей коронок на контактну температуру при бурінні.

Алмазні бурові коронки, що використовуються в теперішній час для буріння геологорозвідувальних свердловин, розрізняються як за розташуванням алмазів (одношарові й імпрегновані), так і за конструктивною реалізацією. Зокрема суттєві конструктивні відмінності можуть бути в промивній (гідралічній) системі коронок. Змінюючи геометричні параметри цієї системи, можна керувати ступенем нагрівання бурової коронки і гірської породи.

Виконані дослідження показують, що при розробці методів підвищення термостійкості коронок розглянуті параметри (кількість промивних каналів і їх ширина) доцільно змінювати спільно в різноманітних комбінаціях.

Аналіз наведених результатів показує:

– збільшення кількості промивальних вікон при постійному рівні потужності призводить до зростання контактної температури;

- збільшення кількості каналів при одночасному зниженні рівня потужності на вибої сприяє зниженню контактної температури;
- збільшення ширини промивальних каналів при постійному рівні потужності призводить до зростання контактної температури;
- збільшення ширини промивальних вікон з одночасним зниженням рівня потужності при $b > 8$ мм призводить до зниження контактної температури.

Конструктивні зміни геометричних характеристик гідравлічної системи алмазних бурових коронок необхідно проводити комплексно з урахуванням режимних параметрів технологічного процесу буріння свердловин.

З використанням розробленої методики змодельований процес нагрівання серійних імпрегнованих бурових коронок 02И4 і БС33, що мають істотні відмінності в геометрії конструкції. Результати моделювання показують, що при однаковому питомому осьовому навантаженні контактна температура при бурінні коронками 02И4 значно вище за контактні температури, що виникають при бурінні коронками БС33 для всіх розглянутих витрат промивальної рідини. Це пояснюється кращою системою охолодження за рахунок більшої кількості каналів з меншими розмірами. Така конструкція дозволяє інтенсифікувати конвективне знімання теплоти з матриці.

Одним з методів підвищення ефективності руйнування гірських порід при обертальному бурінні є зміна конструкції породоруйнуючого інструмента таким чином, щоб посилити термомеханічний ефект. Запропоновано нову конструкцію термомеханічної бурової коронки, що містить пружну консоль з вставкою з термостійкого фрикційного матеріалу (рис. 16).

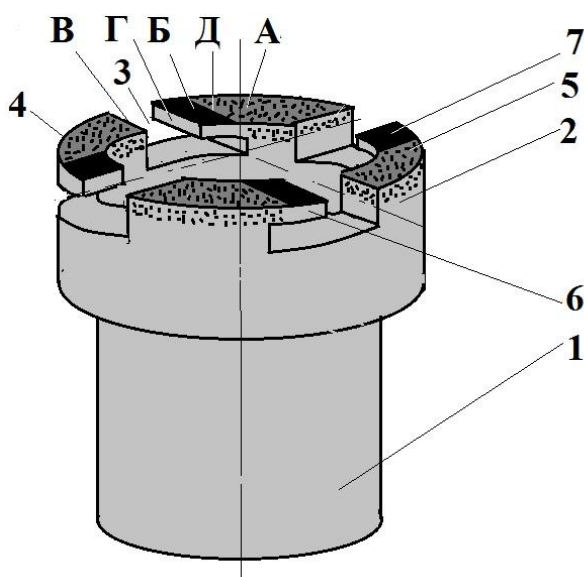


Рис. 16. Загальний вигляд термомеханічної коронки: А – зона різання гірської породи, Б – зона розігріву гірської породи, В – набігаюча кромка сектора, Г – збігаюча кромка сектора, Д – перехідна зона; 1 – корпус коронки, 2 – матриці, 3 – промивальні канали, 4 – сектори матриці, 5 – ріжучі алмази, 6 – пружна консоль, 7 – термостійкий фрикційний матеріал

Внаслідок тертя алмазів і матриці по вибою у місці контакту розвиваються температури, що мають у перехідній зоні Д значні величини, далі, в ході обертання коронки, в контакт з породою вступає консоль б, що армована термостійким фрикційним матеріалом з низькою теплопровідністю. За фрикційні матеріали можуть бути використані спечені матеріали на залізній або мідній основі, що мають високу міцність та термостійкість (1200 °С та вище). Таким чином, при проходженні зони Б по ділянці масиву в місці контакту збігаючої кромки Г і породи можуть розвиватися температури вище за 1000 °С. За рахунок застосування інструмента, що пропонується, досягається збільшення механічної швидкості буріння.

Для визначення раціональних геометричних характеристик такої коронки було виконано дослідження температурного поля вздовж сектора матриці. На рис. 17 показано еволюцію температурного поля сектора і породи в різні моменти часу від початку руху коронки по поверхні вибою при генеруванні теплоти на лінії контакту для коронки А4ДП 6 з довжиною сектора 273 мм, теплопровідність матеріалу матриці $\lambda_1 = 120 \text{ Вт/(м град)}$, теплопровідність породи $\lambda_2 = 1.2 \text{ Вт/(м град)}$, потужність на вибої дорівнює $N = 6 \text{ кВт}$, середнє значення коефіцієнта конвективної тепловіддачі $\alpha = 2,053 \cdot 10^4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}$, $t_p = 20^\circ\text{C}$. Швидкість руху сектора по породі приймалася рівною $w = 1,5 \text{ м/с}$.

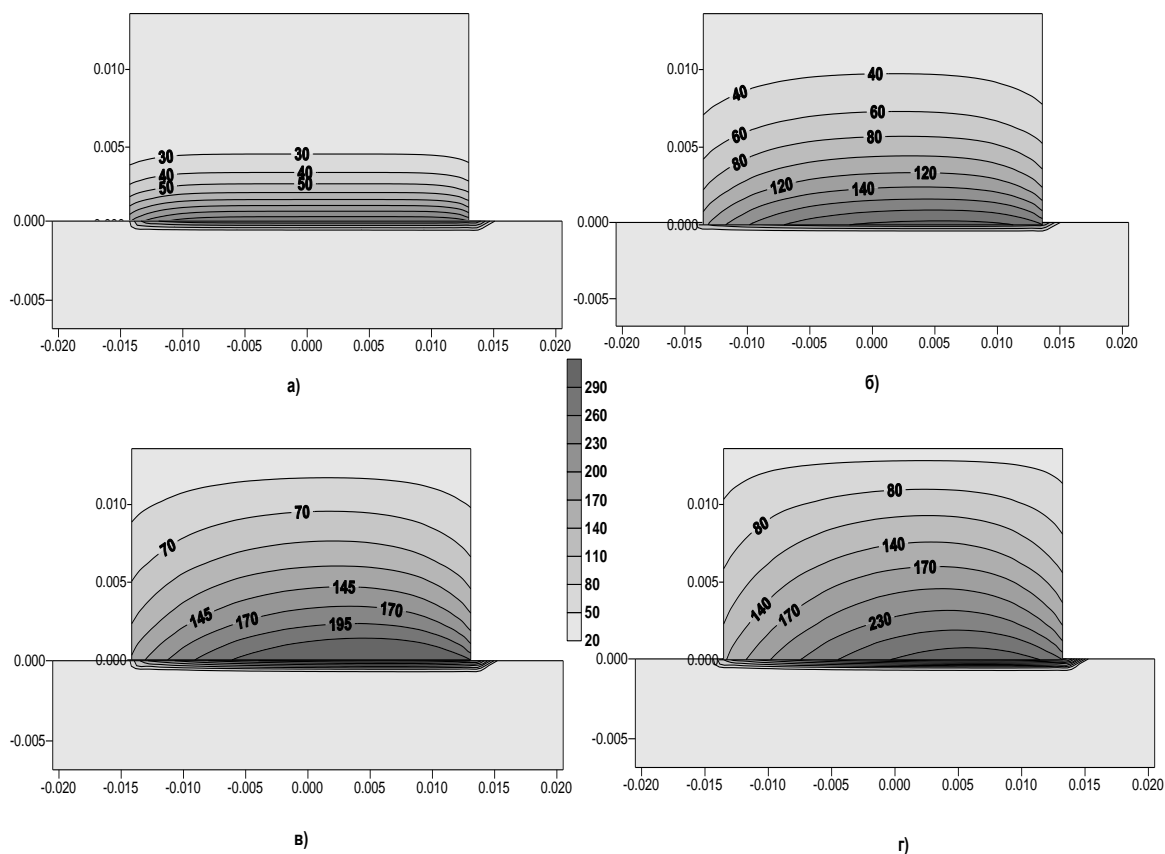


Рис. 17. Температурне поле породи і сектора матриці коронки :

а) $\tau = 0,1 \text{ c}$; б) $\tau = 0,5 \text{ c}$; в) $\tau = 1 \text{ c}$; г) $\tau = 5 \text{ c}$

Внаслідок руху коронки температурне поле сектора несиметричне і максимум температур зміщується до збігаючої частини сектора матриці коронки. Як показали обчислювальні експерименти, починаючи з деякого моменту часу ($\tau \approx 3$), тепловий стан виходить на усталений режим. Результати дослідження показують, що при вибраних параметрах буріння прогрівається лише тонкий шар гірської породи, що безпосередньо прилягає до лінії контакту.

Показано, що за довжиною сектора коронки в області, що прилягає до лінії контакту, розвиваються значні градієнти температури. Таким чином, підтверджується можливість цілеспрямованого використання ефекту термічного знеміцнення породи, який проявляється при бурінні з переривчастим промиванням свердловини.

Використання термостійкої фрикційної вставки дозволить «допалювати» породу до температур, що перевищують критичні значення для матриці без негативного впливу на алмазовмісну матрицю. Положення точки максимуму температури за довжиною сектора коронки може бути прийняте як геометричний параметр для оцінки розмірів сектора і фрикційної вставки.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій на основі вперше встановлених закономірностей набули подальшого розвитку механізми руйнування гірської породи і теорія теплофізичних процесів на вибої свердловини при бурінні алмазними коронками, обґрунтовані раціональні параметри переривчастого промивання котрі, за рахунок ефективного використання теплової енергії, що генерується на вибої свердловини, забезпечують ефективне знеміцнення гірської породи при збереженні термостійкості алмазної коронки, це дозволило вирішити актуальну науково-технічну проблему інтенсифікації алмазного буріння, важливу для розвитку гірничодобувної галузі.

Основні наукові і практичні результати, висновки і рекомендації полягають у такому:

1. На підставі аналізу відомих даних встановлено, що інтенсифікація руйнування гірської породи при обертальному алмазному бурінні можлива за рахунок ефективного використання теплоти тертя на вибої свердловини при переведенні промивання в імпульсний режим. Серед всіх можливих варіантів організації імпульсного промивання, найефективнішим з точки зору забезпечення максимального термічного і термоциклічного впливу на породу є переривчастий режим подачі промивальної рідини.

2. Аналіз теплового балансу на вибої свердловини при бурінні показав, що впровадження переривчастого режиму промивання впливає на розподіл теплових потоків між інструментом та гірською породою в точці контакту. Відбувається зниження енергоємності процесу руйнування до 55%. Показано, що при зменшенні інтенсивності охолодження інструменту,

кількість теплової енергії, яка спрямовується до гірської породи, зростає в 1,45...3,7 разів, а контактна температура до 2 разів.

3. Виконані стендові експериментальні дослідження з визначення впливу витрати промивальної рідини на контактну температуру при бурінні алмазними коронками. В результаті досліджень підтверджено, що зменшення витрати промивальної рідини дозволяє збільшити перепад температури на вибої в 2 і більше разів.

4. Розкрито фізичну сутність підвищення ефективності процесу руйнування гірської породи при бурінні з переривчастою подачею промивальної рідини. Встановлено, що застосування переривчастого режиму подачі промивальної рідини при бурінні алмазними коронками дозволяє порівняно з режимом стаціонарного промивання створити умови для інтенсивного розкриття мікротріщин у породі.

5. Запропоновано підхід до дослідження та параметрів термоциклічного знеміцнення гірської породи (часу затримки процесу руйнування, геометричні параметри мікротріщин) при тепловому впливі для умов конвективного теплообміну на поверхні вибою. Встановлено, що при використанні стандартних коронок і застосуванні переривчастого режиму промивання, створюються умови для підвищення механічної швидкості буріння за рахунок термічного знеміцнення породи.

6. Досліджено процеси конвективного теплообміну на вибої свердловини при бурінні алмазними коронками з переривчастим промиванням. Результати досліджень полів швидкостей та тиску в потоці циркулюючої промивальної рідини засвідчують, що найбільша неоднорідність поля швидкості спостерігається за висотою коронки. Показано, що інтенсивність теплообміну бурової коронки з промивальною рідиною при переривчастій подачі знижується на 37% порівняно зі стаціонарним режимом промивання. Визначено коефіцієнти тепловіддачі як для фази подачі, так і для фази паузи і запропоновано критеріальне рівняння для визначення коефіцієнтів тепловіддачі у фазі паузи.

7. Розроблено математичну модель та методику прогнозування контактної температури і температурних режимів алмазних коронок при бурінні з переривчастим промиванням та виконано верифікацію запропонованої методики.

8. Виконано параметричні дослідження температурного режиму бурової коронки при бурінні з переривчастою подачею промивальної рідини, та встановлено закономірності впливу теплоенергетичних параметрів буріння: вибійної потужності і витрат промивальної рідини і часових параметрів переривчастого промивання на контактну температуру.

9. Встановлено, що контактна температура має коливальний характер, максимальні значення і амплітуда коливань температури залежать від теплоенергетичних параметрів і тривалості інтервалів подачі і паузи. Показано, що при рівнях вибійної потужності менше 3 кВт і до 1 значення контактних температур не перевищує критичних значень в 600 °С. При підвищенні рівня вибійної потужності понад 3 кВт і інтервалах подачі і

паузи понад 1 с, необхідно враховувати сукупність всіх діючих факторів для запобігання перегріву коронки.

10. Показано, що умови термостійкості бурових коронок в умовах підвищених температур при переривчастому промиванні забезпечується шляхом раціонального поєднання режимних параметрів буріння: енергетичних витрат на вибої та витрати промивальної рідини з параметрами переривчастого промивання тривалість фаз подачі і паузи промивальної рідини, коефіцієнту переривчастості. За результатами досліджень розроблено «Методичні рекомендації з визначення параметрів теплофізичних процесів при алмазному бурінні геологорозвідувальних свердловин з переривчастим промиванням».

11. Розроблено рекомендації щодо вибору конструкцій бурових коронок для зменшення теплофізичного зносу при бурінні і підвищення ефективності руйнування гірських порід. Запропоновано технічне рішення з удосконалення конструкції бурової коронки за рахунок використання спеціальних фрикційних вставок з метою підвищення ефекту термічного знеміцнення гірської породи.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Забойные факторы алмазного бурения геологоразведочных скважин / А.А. Кожевников, С.В. Гошовский, И.И. Мартыненко, А.Ю. Дреус и др. – Д.: Лира ЛТД, 2006. – 264 с.
2. Дреус А.Ю. Тепловой фактор при бурении скважин. / А.А. Кожевников, С.В. Гошовский, А.Ю. Дреус, И.И. Мартыненко. – К.: УкрГГРИ, 2008. – 166 с.
3. Дреус А.Ю. Исследование температурного режима алмазной коронки при импульсной промывке / А.Ю. Дреус, А.А. Кожевников, И.И. Мартыненко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2005. – № 12. – С. 64–68.
4. Дреус А.Ю. О термоупругом искажении профиля поверхности забоя скважины при алмазном бурении / А.А. Кожевников, Ю.Н. Вахалин, П.П. Вырвинский, А.Ю. Дреус // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. ИСМ НАН Украины. – 2005. – Вып. 8. – С. 18–22.
5. Дреус А.Ю. Моделирование нагрева алмазной коронки при бурении скважины. / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус, И.И. Мартыненко, Ю.А. Бакаржиев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-геологічна. – 2006. – Вип. 105. – С. 46–51.
6. Дреус А.Ю. Тепловое поле алмазной коронки при бурении с нестационарным режимом промывки скважины / А.А. Кожевников, С.В. Гошовский, А.Ю. Дреус, И.И. Мартыненко // Доповіді Національної академії наук України. – 2007. – № 2. – С. 62–67.

7. Дреус А.Ю. О моделировании процессов теплопереноса на забое при бурении скважины / А.Ю. Дреус, А.А. Кожевников, А.И. Чайка // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т. 29, № 3. – С. 29–35.
8. Дреус А.Ю. Определение коэффициента распределения тепловых потоков на забое при бурении скважины / А.Ю. Дреус, А.А. Кожевников // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2007. – № 8. – С. 54–56.
9. Дреус А.Ю. Численное исследование температурного поля сектора матрицы алмазной коронки при его движении по забою при бурении скважины / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус, С.В. Гошовский, И.И. Мартыненко // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. ИСМ НАН Украины. – 2007. – Вып. 10. – С. 82–88.
10. Дреус А.Ю. Об условиях кипения промывочных жидкостей на забое при бурении скважины / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2007. – № 9. – С. 79–81.
11. Дреус А.Ю. Математическая модель теплопереноса в призабойной зоне горной породы при бурении скважины алмазными коронками / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус, С.В. Гошовский, И.И. Мартыненко // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. ИСМ НАН Украины. – 2008. – Вып. 11. – С. 42–47.
12. Дреус А.Ю. Термодинамика системы «инструмент – горная порода» при генерировании теплоты трения на контакте / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус, С.В. Гошовский, И.И. Мартыненко // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. ИСМ НАН Украины. – 2009. – Вып. 12. – С. 108–113.
13. Дреус А.Ю. Исследование температурного режима моделей буровых коронок на основе физического и вычислительного экспериментов. / А.А. Кожевников, С.В. Гошовский, А.Ю. Дреус, И.И. Мартыненко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2009. – № 7. – С. 54–57.
14. Дреус А.Ю. Использование инфракрасных технологий при исследовании теплофизических задач разработки и эксплуатации скважин / А.А. Кожевников, А.К. Судаков, А.Ю. Дреус // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. «Гірничо-геологічна». – 2010. – Вип. 11 (161). – С. 183–188.
15. Дреус А.Ю. О совпадении экспериментальных и расчетных данных по определению забойной мощности при бурении однослойными алмазными коронками / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус, С.В. Гошовский, И.И. Мартыненко // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. ИСМ НАН Украины. – 2010. – Вып. 13. – С. 64–66.

16. Дреус А.Ю. Экспериментальное исследование теплоотдачи вращающегося стержня при торцевом нагреве / А.Ю. Дреус // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32, № 3. – С. 18–24.
17. Дреус А.Ю. Численный анализ теплового состояния буровых алмазов / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. трудов ИСМ НАН Украины. – 2014. – Вып. 17. – С. 24–26.
18. Дреус А.Ю. Проблема определения контактной температуры при бурении скважин. Обзор / А.Ю. Дреус, А.О. Кожевников, А.К. Судаков и др. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. «Гірничо-геологічна» / ДВНЗ «ДонНТУ». – 2014. – Вип. 2 (21). – С. 10–19.
19. Дреус А.Ю. Основные результаты исследования температурных полей в алмазных буровых коронках при стационарной и нестационарной промывке скважины / А.Ю. Дреус, А.О. Кожевников // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. ИСМ НАН Украины. – 2015. – Вып. 18. – С. 115–119.
20. Дреус А.Ю. Тепловіддача бурового інструменту в умовах змінного охолодження / А.Ю. Дреус // Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Енергетичні і теплотехнічні процеси й устаткування. – 2016. – № 10 (1182). – С. 99–104.
21. Dreus A.Yu. Study on thermal strength reduction of rock formation in the diamond core drilling process using pulse flushing mode / A.Yu. Dreus, A.K. Sudakov, A.A. Kozhevnikov, Yu. N. Vakhalin // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2016.– № 3. – P. 5–8. (наукометрична база **Scopus**)
22. Dreus A. Investigation of heating of the drilling bits and definition of the energy efficient drilling modes / A. Dreus, A. Kozhevnykov, A. Sudakov, K. Lysenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 3, № 7 (81). – P. 41–46. (наукометрична база **Scopus**)
23. Dreus A.Yu. Computer simulation of fluid mechanics and heat transfer processes at the working face of borehole rock / A.Yu. Dreus, K.Ye. Lysenko // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2016. – № 5. – P.29–35. (наукометрична база **Scopus**)
24. Дреус А.Ю. Анализ эффективности разрушения горной породы при бурении с импульсной промывкой скважины / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. ИСМ НАН Украины. – 2016. – Вып. 19. – С. 62–66.
25. Дреус А. Моделирование гидродинамики прерывистого потока промывочной жидкости в гидравлической системе алмазной буровой коронки / А. Дреус, Е. Лысенко, А. Кожевников, Б. Лю // Mining

- mineral deposit. – 2017. – № 11 (2). – P. 84–90. (наукометрична база Web of Sciences Core Collectoion)
26. Дреус А.Ю. Энергетический критерий эффективности алмазного бурения с прерывистой помывкой / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус, Б. Ли // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. ИСМ НАН Украины. – 2017. – Вып. 20. – С. 62–66.
 27. Дреус А.Ю. Расчет показателя интенсивности теплообмена алмазной буровой коронки с промывочной средой при бурении скважины / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус, С.В. Гошовский, И.И. Мартыненко // Известия вузов. Горный журнал. – 2007. – № 6. – С 85–88.
 28. Дреус А.Ю. Сравнительный анализ эффективности 1D и 3D математических моделей для исследования температурных режимов алмазного бурения / А.А. Кожевников, Б.Т. Ратов, А.Ю. Дреус и др. // Горный журнал Казахстана. – 2016. – № 7. – С.39–43.
 29. Дреус А.Ю. Определение температурных режимов алмазной буровой коронки при прерывистой промывке / А.А. Кожевников, Б.Т. Ратов, А.Ю. Дреус и др. // Геология и охрана недр. – 2016. – № 3 (60). – С. 64–68.
 30. Дреус А.Ю. Математическая модель температурного режима алмазной коронки при бурении скважины. / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус, И.И. Мартыненко, Ю.А. Бакаржиев // Матер. міжн. конф. «Форум гірників – 2005» (12–14 жовтня 2005, Дніпропетровськ). Т. 2. – Д.: НГУ, 2005. – С. 250–257.
 31. Дреус А.Ю. Анализ влияния конструктивных параметров гидравлической системы алмазных коронок на их нагрев при бурении скважин / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус, С.В. Гошовский, И.И. Мартыненко // Матер. міжн. конф. «Форум гірників – 2006» (11–13 жовтня 2006, Дніпропетровськ). – Д.: НГУ, 2006. – С. 217–221.
 32. Dreus A. The procedure Thermal Balance Calculation on the Borehole Working Face / A. Dreus, A. Kogevnikov, A. Chayka // Abstracts V-th International Conference «Problems of Industrial Heat Engineering», May 22–26, 2007. – Kyiv, 2007. – P. 84–85.
 33. Дреус А.Ю. Расчет контактной температуры при бурении импрегнированными коронками / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус, С.В. Гошовский, И.И. Мартыненко // Матеріали Міжнародної конференції «Форум гірників 2007» (11–13 жовтня 2007, Дніпропетровськ). – Д.: НГУ, 2007. – С. 223–228.
 34. Дреус А.Ю. Термонапряженное состояние призабойного слоя горной породы при бурении алмазными коронками / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус, С.Ю. Дреус // Матеріали Міжнародної конференції «Форум гірників – 2011» (12–15 жовтня 2011, Дніпропетровськ). – Д.: НГУ, 2011. – С. 78–80.
 35. Дреус А.Ю. Анализ термического воздействия на горную породу при бурении алмазными коронками / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус,

- Ю.Н. Вахалин, О.В. Ливак // Матеріали Міжнародної конференції «Форум гірників – 2015» (30 вересня – 3 жовтня 2015, Дніпропетровськ). – Д.: НГУ, 2015. – Т. 3. – С. 21–25.
36. Дреус А.Ю. Результаты алмазного бурения с импульсной промывкой / А.А. Кожевников М. Отебаев, А.Ю. Дреус, А.Т. Тулепбергенов и др. // Геологоразведочное и нефтегазовое дело в XXI веке: технологии, наука, образование: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (9–13 ноября 2016, Алматы) / Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева. – Алматы, 2016. – С. 139–145.
37. Dreus A. Influence of cooling on the frictional heat distribution between contacting bodies / A. Dreus // Теплотехника, энергетика и экология в металлургии. – Д.: Нова ідеологія, 2017. – С. 159–162.
38. Дреус А.Ю. Математичне моделювання та методи розрахунку теплотехнологічних процесів: Навч. посіб. / В.Б. Веселовський, А.Ю. Дреус, А.В. Сяєв – Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту. 2004. – 248 с.
39. Дреус А.Ю. Математичні методи дослідження теплообміну / А.Ю. Дреус. – Д.: Вид-во ДНУ, 2013. – 131 с.
40. Термомеханічний породоруйнуючий інструмент / А.А. Кожевников, А.Ю. Дреус, А.К. Судаков, Ю.Н. Вахалин // Пат. на корис. модель. № 110443 Україна, МПК E21B 10/46, E21B 7/14. Термомеханічний породоруйнуючий інструмент / – и 201603522; заявл. 04.04.16; опубл. 10.10.16, Бюл. № 19.

У роботах, що виконані у співавторстві, автором: написано третій та четвертий розділи у монографії [1], третій розділ у монографії [2], побудовано математичні моделі, виконано обчислювальні експерименти, проведено аналіз результатів у працях [3; 5–9; 11; 17; 19 21–25; 27–35], виконано аналітичний огляд у праці [18], аналіз і постановку проблеми і обговорення та узагальнення результатів у працях [4; 10; 26; 36], обробку та аналіз експериментальних даних і порівняльний аналіз з чисельними результатами у працях [12–15], теоретичне обґрунтування у праці [40]. У посібнику [38] автором написано сьомий розділ.

АНОТАЦІЯ

Дреус А.Ю. Теплофізичні основи знеміцнення гірських порід при алмазному бурінні свердловин з імпульсним промиванням. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальностями 05.15.09 – «Геотехнічна і гірнична механіка», 05.15.10 – «Буріння свердловин» – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми інтенсифікації руйнування гірської породи при бурінні

алмазними коронками за рахунок ефективного використання теплової енергії, що генерується на вибої. У дисертації набули розвитку теорії механізмів руйнування гірської породи і теплофізичних процесів на вибої свердловини при бурінні алмазними коронками. Показано, що інтенсифікація процесів руйнування досягається шляхом переведення режиму промивання в імпульсний режим, що дозволяє впливати на контактну температуру й керувати теплообмінними процесами на вибої. На основі теорії термопружності розв'язано задачу з розвинення мікротріщин в гірській породі при змінних умовах теплообміну на поверхні вибою. Досліджено вплив режимних параметрів та параметрів преривчастого промивання на температурний стан на вибої при бурінні. Розроблено рекомендації щодо вибору раціональних параметрів теплофізичних процесів при бурінні з переривчастим промиванням.

Ключові слова: ефективність руйнування гірських порід, термоциклічний вплив, буріння, контактна температура, переривчасте промивання, теплообмін на вибої, бурова коронка, математичне моделювання, стендові дослідження.

АННОТАЦИЯ

Дреус А.Ю. Теплофизические основы разупрочнения горных пород при алмазном бурении с импульсной промывкой. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.15.09 – «Геотехническая и горная механика», 05.15.10 – «Бурение скважин» – Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, 2018.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической проблемы интенсификации разрушения горной породы при бурении алмазными коронками за счет эффективного использования тепловой энергии генерируемой на забое. Интенсификация процесса разрушения достигается путем перевода промывки в импульсный режим, что позволяет воздействовать на контактную температуру и управлять теплообменными процессами на забое.

Выполнено исследование влияния импульсной (прерывистой) промывки на нагревание горной породы при бурении и анализ теплового баланса на забое для такого режима промывки. Путем математического моделирования впервые доказано, что импульсная промывка забоя скважины при алмазном бурении позволяет перераспределить тепловые потоки на забое, и увеличить долю теплоты, направляемой в горную породу. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований впервые обоснована возможность использования режима импульсной подачи промывочной жидкости, при бурении стандартными

алмазными коронками, для снижения энергоемкости процесса разрушения горной породы за счет лучшего использования тепловой энергии на забое скважины, создания высоких перепадов температур и термических напряжений растяжения.

На основе теории термоупругости решена задача по развитию микротрещин в горной породе при переменных условиях теплообмена на поверхности забоя. Определены закономерности связывающие параметры разрушения горной породы с интенсивностью конвективного теплообмена на поверхности забоя. Получены параметры процесса разрушения при термоциклическом воздействии, соответствующие условиям работы серийных алмазных буровых коронок, в зависимости от физико-механических свойств горных пород. Показано, что изменение температурного режима на забое при импульсной промывке способствует интенсификации процесса растрескивания поверхностного слоя горной породы.

Разработана методика определения параметров конвективного теплообмена буровой коронки с промывочной жидкостью при импульсном режиме течения. Получили дальнейшее развитие математическая модель и методы прогнозирования температурных режимов буровых коронок, позволяющие рассчитывать контактную температуру для нестационарного теплообмена при импульсной промывке. Выполнены параметрические исследования и показано, что контактная температура при бурении определяется режимными параметрами бурения и параметрами импульсной промывки, линейно зависит от энергетических затрат на забое и нелинейно от расхода промывочной жидкости, интервалов паузы и подачи промывочной жидкости, коэффициента прерывистости. На основе проведенных исследований разработаны рекомендации по практическому определению параметров теплофизических процессов при бурении с импульсной промывкой, обеспечивающих как эффективное термоциклическое разрушение горной породы, так и приемлемые для буровой коронки температурные режимы работы.

Разработаны технические предложения по совершенствованию конструкций буровых коронок для интенсификации процесса разупрочнения горной породы за счет термоциклического воздействия.

Ключевые слова: эффективность разрушения горных пород, термоциклическое воздействие, бурение, контактная температура, прерывистое промывание, теплообмен на забое, буровая коронка, математическое моделирование, стендовые исследования.

ABSTRACT

Andrii Dreus. The thermophysical foundations of weakening of the rocks at diamond drilling with pulse flushing. Manuscript.

The thesis for scientific degree of the doctor of technical sciences, specialty 05.15.09 – "Geotechnical and geomechanics", 05.15.10 – "Borehole drilling" – State higher education institute "National Mining University", Dnipro, 2018

The thesis is devoted to solution of the important scientific problem of intensification of rocks destruction at diamond drilling using the heat energy generated in the working face of borehole. The theories of rock destruction and thermal physics processes on the working face of borehole were developed herein. It is shown that the intensification of processes of destruction is achieved by the transition the flushing to interrupted mode. It allows to influence on the drilling temperature and to control heat transfer processes at the bottom. The problem of cracks development in rocks was obtained using the theory of thermoelasticity taking to account of convective heat transfer. The influence of the mode parameter and the parameters of interrupted flushing on the working face temperature were investigated. Recommendation to choosing of the best parameters of thermophysical processes during drilling with interrupted flushing was developed.

Keywords: efficiency of rock breaking, thermocycle impact, drilling, contact, temperature, interrupted flushing, heat transfer on the working face of borehole , drill core bit, mathematical modeling, bench test.

Підписано до друку 22.05.2018.
Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 2,09. Наклад 100 прим. Зам. № 119.

Видавництво та друкарня «Ліра ЛТД»
Україна, 49107, м. Дніпро, вул. Наукова, 5
Свідоцтво про внесення до Держреєстру
ДК № 6042 від 26.02.2018.

