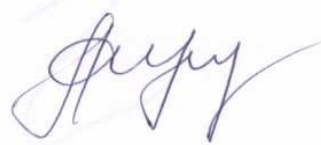


Інститут геотехнічної механіки імені М. С. Полякова
Національна академія наук України

ЯНЖУЛА ОЛЕКСІЙ СЕРГІЙОВИЧ



УДК [622.831.322:622.817.4:622.272.6]:622.861(043.3)

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВЕДЕННЯ ОЧИСНИХ РОБІТ
ПОБЛИЗУ ГЕОЛОГІЧНИХ ПОРУШЕНЬ,
СХИЛЬНИХ ДО РАПТОВИХ ВИДІЛЕНЬ МЕТАНУ**

05.15.09 – «Геотехнічна і гірнича механіка»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова
Національної академії наук України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
МІНЄЄВ Сергій Павлович
Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова
Національної академії наук України,
завідувач відділу (м. Дніпро)

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
КАЛУГІНА Надія Олександрівна,
Інститут фізики гірничих процесів
Національної академії наук України
Вчений секретар інституту (м. Дніпро)

кандидат технічних наук, доцент
ТІМОЩУК Василь Іполитович,
Національний технічний університет «Дніпровська
політехніка» МОН України
доцент кафедри гідрогеології та інженерної геології
(м. Дніпро)

Захист відбудеться «11» грудня 2020 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.188.01 при Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України за адресою: 49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 2а, факс (056) 746-01-51.

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

Автореферат розісланий «10» листопада 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор

В. Г. ШЕВЧЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Із зростанням навантажень на очисні вибої при веденні гірничих робіт у вугільних шахтах істотно збільшується виділення метану. У межах виїмкової ділянки метан виділяється з оголеної поверхні розроблюваного пласта, відбитого вугілля в лаві і конвеєрної виробки, а також з вугілля, що залишається у виробленому просторі у ціликах та невиймаємих пачках, з підроблених і надроблених зближених вугільних пластів-супутників і вміщуючих газонасичених порід. Раптові та інтенсивні газовиділення призводять до небезпечних скупчень метану, а потім, і до великих аварій, вибухів і пожеж. Із збільшенням глибини та ускладненням гірничо-технологічних умов відпрацювання вугільних пластів, механізм реалізації і небезпека прояву таких явищ суттєво трансформуються. Багато серйозних катастроф сталося останнім часом на шахтах, які обладнані сучасною високопродуктивною вугледобувною технікою і поблизу геологічних порушень.

Імпульсні виділення метану, особливо великої інтенсивності, навіть при високих швидкостях руху повітряних потоків по виробках нерідко викликають підвищення концентрації метану до вибухонебезпечного стану. Небезпека полягає також і в тому, що виділення метану реалізується раптово, спонтанно. Такий стан повітряного середовища у вибої виробок в подальшому породжує спалахи і вибухи.

На жаль, в даний час відсутні надійні способи прогнозу імпульсного виділення метану та способи зниження раптового загазування виїмкових виробок. Особливо це характерно для ділянок до першого повного обвалення порід важкої покрівлі. Одна з поширених причин утворення вибухонебезпечного газового середовища у виробках це раптове підвищення виділення метану при посадках основної покрівлі. Найбільш небезпечним вважається виділення метану імпульсного характеру при обваленні покрівлі в зоні впливу геологічних порушень.

На теперішній час не встановлено закономірності фільтраційного процесу метану у вугільному пласті, що вміщає порушену зону впливу геологічних порушень, не розроблено методи запобігання імпульсних загазувань гірничих виробок при відході очисного вибою від зони геологічного порушення, критерії прогнозу раптового газовиділення при обваленні порід покрівлі.

Тому обґрунтування параметрів безпечного ведення гірничих робіт у зонах геологічних порушень, схильних до раптових виділень метану в забій під час гірничих робіт, встановлення закономірностей фільтраційного процесу метану у вугільному пласті, що вміщає порушену зону впливу геологічних порушень, розробка методів запобігання імпульсних загазувань гірничих виробок при відході очисного вибою від зони геологічного порушення, та критеріїв прогнозу раптового газовиділення при обваленні порід покрівлі є актуальним науковим завданням, розв'язання якого надасть можливість підвищити безпеку праці.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в Інституті геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України в межах і відповідно до загальнодержавних програм і планів науково-дослідних робіт Національної академії наук України: «Дослідження особливостей геомеханіки газонасиченого вуглепородного масиву при веденні гірничих робіт в небезпечних умовах на великих глибинах» (№ держ. реєстрації 0115U002533). Автор дисертації

виконував розділ «Оцінка стану двофазного метану і мікроструктури вугілля в зоні тектонічної порушеності вугільного пласта», в якості виконавця.

Ідея роботи полягає у використанні термодинамічної оцінки сорбційної рівноваги метану у вугільному пласті, встановлених закономірностей фільтрації з урахуванням вільного та адсорбованого метану в зоні опорного тиску пласта, що вміщає зону геологічного порушення для обґрунтування параметрів способу зниження імпульсного виділення метану.

Мета роботи – встановлення закономірностей фільтрації метану в непружній зоні опорного тиску вугільного пласта та обґрунтування параметрів ведення очисних робіт у зонах геологічних порушень, схильних до раптових виділень метану в вибій для підвищення продуктивності та безпеки очисних робіт.

Основні завдання досліджень:

1. Встановити закономірності динаміки імпульсних газопроявів з підробленої товщі в зоні дегазуючого впливу очисної виробки поблизу геологічних порушень.
2. Оцінити вплив зон порушеності на зміну газодинамічних і механічних характеристик вугільного пласта.
3. Встановити закономірності фільтраційного процесу метану у зоні опорного тиску вугільного пласта, що вміщає зону порушеності, насичену адсорбованим і вільним метаном.
4. Обґрунтувати параметри ведення очисних робіт у зонах геологічних порушень, небезпечних за раптовими виділеннями метану.
5. Розробити та впровадити способи прогнозу і запобігання імпульсних загазувань гірничих виробок при виході очисного вибою від зони геологічного порушення.

Об'єкт дослідження – геомеханічні процеси у вуглепородному масиві, що вміщає геологічне порушення при імпульсному виділенні метану у вибій.

Предмет дослідження – закономірності та параметри ведення очисних робіт у зонах геологічних порушень, схильних до раптових виділень метану в вибій.

Методи дослідження. Для досягнення мети і виконання поставлених завдань здійснено комплекс досліджень, що включає: аналіз даних і узагальнення раніше виконаних досліджень, фактичного матеріалу щодо імпульсних виділень метану з підробленої товщі та закономірностей фільтрації метану в зонах геологічних порушень; феноменологічні методи розрахунку фільтрації метану у вугільному пласті; термодинамічні і молекулярно-механічні методи досліджень адсорбованого метану у вугіллі; аналіз та інтерпретація отриманих результатів.

Основні наукові положення, що винесені на захист:

1. При фільтрації метану у пружній області опорного тиску вугільного пласта, що вміщує зону порушеності, має місце ефект поглинання метану, обумовлений його адсорбцією центральною частиною порушеної зони в міру її просування до максимуму опорного тиску, в обсязі, що по логарифмічній залежності прагне до максимальної сорбційної газоємності мікропористого простору вугільного пласта, яка дорівнює $60 \text{ м}^3/\text{т}$, що призводить до зниження тиску вільного газу в фільтраційному потоці у пружній області і створює на кордоні з непружною

областю «резервуар» зі значним тиском адсорбованого метану у вугіллі, який може досягати свого граничного значення у 5 МПа.

2. Коли ядро порушеної зони, насичене, в більшій мірі, адсорбованим, ніж вільним метаном, знаходиться в граничній області опорного тиску, то це призводить до зміни характеру фільтраційного процесу у вугільному пласті, що полягає в тому, що спочатку при входженні ядра порушеної зони в непружну область, приблизно, до її середини, відбувається зниження тиску фільтрації метану по логарифмічному закону до 30%, а потім, у міру наближення вибою до ядра його підвищення по зворотному - експоненціальному закону до 100% в початковий період часу поблизу поверхні вибою у порівнянні з тиском вільного метану при його фільтрації.

3. При відході очисного вибою від монтажного хідника поблизу порушень формується зона підвищеної аерогазодинамічної небезпеки, тобто перша зона «квадрата виробленого простору», що характеризується не менше ніж двома інтенсивними сплесками виділення метану в забій, перший з яких відповідає посадці порід основної покрівлі, а другий пов'язаний з повним формуванням зони основного склепіння обвалення в породах покрівлі.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- вперше при фільтрації метану в пружній області опорного тиску вугільного пласта встановлений ефект адсорбції метану мікропористою структурою вугілля, обумовлений тим, що ця мікроструктура в даній області схильна в основному декомпресійним процесам, а ступінь заповнення пор в ній метаном становить 40%, що визначено термодинамічною оцінкою стану адсорбованого у вугіллі метану в незайманому вугільному масиві;

- вперше отримані принципово нові закономірності фільтрації метану в непружній зоні опорного тиску вугільного пласта, з урахуванням його вільної та адсорбованої фази, які полягають в тому, що в міру наближення до вибою виробки у фільтраційному потоці накопичується метан, який десорбується з мікроструктури вугілля, що призводить поблизу вибою до значного збільшення тиску метану в порівнянні з тиском у фільтраційному потоці тільки вільної фази.

– запропоновані геологічні критерії та розроблено метод прогнозу імпульсних загазувань виробок при обваленнях покрівлі;

– встановлено закономірності формування зони підвищеної аерогазодинамічної небезпеки - «квадрата виробленого простору», що характеризується формуванням зони основного склепіння обвалення в породах покрівлі.

Наукове значення роботи полягає у встановленні закономірностей фільтраційного процесу руху метану у вугільному пласті, що вмщає порушену зону, насичену вільним та адсорбованим метаном з урахуванням міжмолекулярних взаємодій в системі «метан-вугілля» у взаємозв'язку з конформаційними перебудовами в мікроструктурі вугілля та з енергетичними умовами активації розвитку процесу десорбції метану у вугіллі.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

– вперше сформульовано основні умови віднесення ділянок розроблюваного пласта до небезпечних за імпульсним виділенням метану та запропоновано типові схематичні геологічні розрізи порід, характерні для можливих проривів метану у

вибої проведених виробок, що є основою для прогнозу можливості імпульсних виділень метану в зонах геологічних порушень при веденні гірничих робіт;

– розроблені «Рекомендації по запобіганню імпульсних загазувань гірничих виробок при відході очисного вибою від зони геологічного порушення». Згідно з рекомендаціями запроваджується особливий режим гірничих робіт на період посадки основної покрівлі і «квадрата лави» на час за 3 дні до і 3 дні після розрахованого часу переходу вибоєм зазначеної зони. У період цього режиму необхідно зменшити навантаження на вибій, приблизно не менше ніж на 30%, і провести збільшення витрати повітря на 30%;

– обґрунтовано способи дегазації газонасичених структур поблизу зон геологічних порушень при первинній посадці основної покрівлі, які рекомендовані до виконання при спорудженні дегазаційних свердловин, пробурених з гірничих виробок і земної поверхні;

– вперше запропоновано нові технологічні схеми дегазації газонасичених структур вуглепородного масиву поблизу зон геологічних порушень за допомогою свердловин, пробурених з гірничих виробок і поверхні землі;

– сформульована методологія розробки заходів для запобігання імпульсних неочікуваних загазувань гірничих виробок при обваленні порід основної покрівлі в зонах геологічних порушень.

Апробація розроблених способів у шахтних умовах, показала ефективність заходів, спрямованих на виключення можливості загазування гірничих виробок при обваленні порід покрівлі.

Реалізація результатів досліджень. Результати, що одержані в процесі дослідження, увійшли до «Рекомендацій по прогнозу небезпеки імпульсних загазованих гірничих виробок при відході очисного вибою від зони геологічного порушення», «Рекомендацій по запобіганню імпульсних загазованих гірничих виробок при відході очисного вибою від зони геологічного порушення» та передані до шахтного управління «Покровське» (акти передачі від 08.07.2020).

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується: коректною постановкою задач; використанням теоретичних методів досліджень, що базуються на фундаментальних положеннях механіки гірських порід; апробованими методами математичного моделювання; збігом теоретичних результатів моделювання процесів фільтрації метану з експериментальними даними на конкретних виробничих ділянках з похибкою, що не перевищує 20 %.

Особистий внесок автора. Здобувачем визначено мету та завдання дослідження; сформовані наукові положення та основна ідея дисертаційної праці; проаналізовані літературні джерела та обґрунтовано актуальність дослідження; безпосередня участь у проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, в їх аналізі та узагальненні результатів; обґрунтування та розробка нового методу прогнозу імпульсних загазувань виробок при обвалюваннях покрівлі; удосконалення та розробка способів дегазації газонасичених структур поблизу зон геологічних порушень при первинній посадці основної покрівлі, їх впровадження в виробництво. Зміст дисертації викладено автором самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні практичні результати і наукові положення дисертаційної роботи доповідалися і отримали схвалення на Міжнародній науково-практичній конференції «Форум гірників» (ДВНЗ «НГУ» 30 вересня – 3 жовтня 2015 р., 05-08 жовтня 2016 р., та 04-07 жовтня 2017 р.), 12-й міжнародній конференції «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности» (Тульський державний університет, 2-3 листопада 2016 р.), XIII Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні технології ведення буровибухових робіт та безпека застосування гранульованих і емульсійних речовин» (КНУ ім. М. Остроградського, 13-19 листопада 2016 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі» (Кривий Ріг, 14 грудня 2016, 14 грудня 2017 рр.), XXVI-й Міжнародній науковій школі «Деформування і руйнування матеріалів з дефектами і динамічні явища в гірських породах і виробках (Сімферополь, Таврійський нац. ун-т, ім. В.І. Вернадського, 19-25 вересня 2016 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційних досліджень опубліковано в 39 роботах, з яких: 14 – публікацій у фахових виданнях рекомендованих МОН України (в тому числі 2 статті в журналах, що індексуються в наукометричній базі Scopus); 8 – публікацій у збірниках матеріалах вітчизняних та зарубіжних конференцій, 13 – патенти на корисну модель.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна праця є рукописом і складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списків використаних джерел к кожному з розділів, та 8 додатків. Загальний обсяг дисертації – 226 сторінок, з яких 145 сторінок - машинописний текст. Дисертація містить 46 рисунків та 20 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету і завдання роботи, визначено наукову новизну, наукове і практичне значення отриманих результатів, а також наведені дані про апробацію результатів і публікації автора з теми дослідження.

У першому розділі проведений аналіз стану питання виділення метану при веденні очисних робіт поблизу зон геологічних порушень. Розглянути узагальнюючи роботи з вивчення основних типів порушень у вуглепородному масиві, які впливають на ведення гірничих робіт, основних типів небезпек в зонах геологічних порушень, виконана оцінка імпульсного виділення метану в цих зонах при обрушенні пород покрівлі. Проаналізовані основні механізми раптових проривів метану в виробки поблизу зон геологічних порушень та основні геологічні критерії прогнозу раптового газовиділення при обрушеннях порід покрівлі. Розглянуті узагальнюючи роботи з вивчення проблеми виділення метану в виробки при видобуванні вугілля, якими займалися наукові заклади Національної академії наук України, такі як Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова та Інститут фізики гірничих процесів, НТУ «Дніпровська політехніка», Донецький науково-технічний університет, Макеевський науково-дослідний інститут по безпеці в гірничій справі, Український науково-дослідний маркшейдерський інститут, Інститут проблем комплексного освоєння

надр, Московський державний гірничий університет, Інститут гірничої справи Сибірського відділення Російської академії наук та інші.

Аналіз динаміки загазувань, що сталися на різних шахтах при обваленнях покрівлі показав, що обсяг газу, який виділяється з підробленої товщі в зоні дегазуючого впливу очисної виробки поблизу геологічних порушень свідчить про спонтанний перехід сорбованого метану у вільний і про приплив газу з ділянок, прилеглих до підробленої товщі та пов'язаної з нею системою тріщин. Згідно з розрахунками ІГТМ НАН України, кількість вільного газу, що спонтанно переходить із зв'язаного стану, збільшується в десятки разів у досить короткий проміжок часу.

Під час обвалення основної покрівлі відбувається оголення тріщинуватого колектору і вільний газ з нього виділяється в гірничі виробки. Причому, газ може виділятися з великих площ, що знаходяться поза зоною впливу очисних робіт. Наступні, після прориву газу, обвалення покрівлі та розвантаження пісковика, як правило, протягом тривалого часу не викликають аномальних газовиділень із зони впливу геологічного порушення. Проаналізовано існуючі геологічні критерії прогнозу раптового газовиділення при обваленнях порід покрівлі. Однак не зважаючи на велику кількість фундаментальних досліджень і значні досягнення в цієї області, проблема безпечного ведення гірничих робіт поблизу геологічних порушень, схильних до раптових виділень метану, залишається ще актуальною.

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

У другому розділі виконана оцінка впливу зон порушеності на зміну газодинамічних і механічних характеристик вугільного пласта.

Для аналізу динаміки імпульсних раптових викидів метану в гірничі виробки при підробці вугільного пласта обрано умови відробки пласта d_4 в ШУ «Покровське», де є два розривних порушення першого порядку, які впливають на розташування шахтного поля, що складається з трьох ділянок. Проведена оцінка впливу порушених зон на характер газовиділення з вуглепородного масиву показала, що геологічні порушення є ділянками підвищеної газодинамічної активності пласта. Достовірність гіпотези про утворення зони з підвищеною концентрацією напружень, що перешкоджає дегазації пласта, підтверджена результатами вимірів початкової швидкості газовиділення.

Своєчасне виявлення малоамплітудних диз'юнктивних порушень, а також встановлення їх параметрів дає можливість заздалегідь прогнозувати потенційно небезпечні зони. Це дозволило уникнути виникнення загазувань вибою та інших проявів газодинамічних явищ за рахунок своєчасного застосування відповідних заходів, а також дозволить звести до мінімуму простої підготовчих вибоїв.

Оскільки вихід летучих речовин є одним з основних показників, що визначають газодинамічну активність пласта і схильність до газовиділення із нього в забій виробок, то в даному розділі була зроблена оцінка впливу порушеності вугільного пласта на цей показник. Встановлена пропорційна залежність між коефіцієнтом мінливості виходу летучих речовин V^{daf} і нерівномірністю залягання вугільного пласта в блоці по висоті K_{min} в зоні впливу «Котлинського насуву».

Виконано оцінка наявності можливих зон скупчення метану поблизу геологічного порушення в околиці виробок шахтоуправління «Покровське». Вдосконалено метод локальних структур для прогнозу зон скупчення метану. В умовах ШУ «Покровське» зазначені роботи були частково виконані в районі 12-ої південної лави для вугільного пласта d_4 .

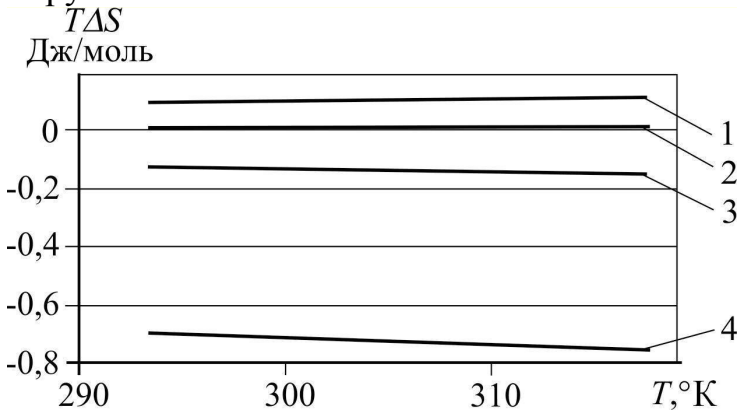
Оцінений вплив зон порушеності на зміну газодинамічних і механічних характеристик вугільного пласта. Встановлено, що найбільш інтенсивно газ виділяється при обваленнях порід в зоні впливу плікативних порушень (антиклиналей, брахіантиклиналей, куполів флексур), а також в зоні впливу з тріщиновато-пористих колекторів. Для недопущення неочікуваних загазувань гірничих виробок і забезпечення безпеки робіт по газовому фактору необхідна дегазація вільних скупчень метану в колекторах вміщуючих порід. Крім того, необхідно виключення гірничо-технологічних умов, що сприяють імпульсному переведенню значних обсягів пов'язаного з вугіллям (в основному адсорбованого) газу у вільний в зоні ведення гірничих робіт.

У третьому розділі розроблена комплексна фізико-математична модель фільтраційного процесу у вугільному пласті, що вміщає зону порушеності, насичену адсорбованим і вільним метаном, з урахуванням силового поля міжмолекулярної взаємодії сорбованої фази метану з мікроструктурою порушеного вугілля. Проведено аналітичний і чисельний розрахунки відповідних фільтраційних закономірностей у зоні опорного тиску вугільного пласта.

Розробка математичної моделі базувалася на аналізі газодинамічних проявів гірського тиску різних типів тектонічних порушень, коли в процесі ведення гірських робіт до них наближається область геодинамічного опорного тиску. Це дозволило в якості узагальнено інформативного параметра, що характеризує початковий стан різних типів тектонічних порушень, вжити енергетичний потенціал порушеної зони в області геодинамічного опорного тиску. Встановлено, що за енергетичний потенціал зон середнього ступеня порушеності можна прийняти енергію, що дорівнює, в середньому, 10^5 Дж. А модель тріщиновато-пористої структури вугілля в цій зоні можна представити в наступному вигляді. У центральній частині порушеної зони має місце ядро у вигляді перем'ятої зони, яка на самому малому масштабному рівні складається з непорушених фрагментів з розмірами в 7 разів менше, ніж у непорушеному вугіллі. Ці фрагменти насичені адсорбованим метаном з досить сильними сорбційними зв'язками і являють собою джерела десорбції метану у вугільному пласті при порушенні його рівноважного стану. Способом його міграції є, переважно, твердотільна дифузія.

Термодинамічна оцінка сорбційної рівноваги по зміні ентропійного фактора $T\Delta S$ показала, що значення цього параметра досягається нулю при ступені заповнення мікропор вугілля на $\theta = 0,4$ (рис. 1). Тобто, найбільш вірогідно енергетично, що при генеруванні метану у вугільному пласті в недоторканому гірському масиві мікропори у порушеному вугіллі заповнені адсорбованим метаном на 40%. При більшому об'єму в порах метану має місце активний процес його десорбції. При розробці методики розрахунку закономірностей фільтрації метану у зоні опорного тиску вугільного пласта, насиченого адсорбованим і вільним метаном вугільний пласт

представляли як структурно-неоднорідну систему у вигляді комбінацій декількох ділянок, що знаходяться в різних зонах опорного тиску і вміщують зону порушеності.



1 – $\theta=0,2$; 2 – $\theta=0,4$; 3 – $\theta=0,6$; 4 – $\theta=0,8$

Рисунок 1 – Залежність зміни ентропійного фактора $T\Delta S$ від температури при різному ступені заповнення пор метаном Θ

При розробці методики розрахунку закономірностей фільтрації метану у зоні опорного тиску вугільного пласта, насиченого сорбованим і вільним метаном вугільний пласт представляли як структурно-неоднорідну систему у вигляді комбінацій декількох ділянок, що знаходяться в різних зонах опорного тиску і вміщують зону порушеності. Розрахунок виділення метану проводився з використанням рівняння фільтрації Желтова Ю.П., яке для кожної комбінації ділянок має вигляд:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k_{\phi}}{\mu \cdot m} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot p \cdot \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (1)$$

де p – поточний тиск газу у пласті, Па; t – час, с; k_{ϕ} – середня газова проникність, m^2 ; m – пористість вугілля в досліджуваній зоні пласта; μ – динамічна в'язкість газу, Па·с; x – відстань від вибою до розрахункової точки в зоні опорного тиску, м.

Алгоритм розрахунку фільтраційних закономірностей метану з урахуванням вільного та адсорбованого газу передбачав вирішення двох наступних задач фільтрації, що описуються рівнянням (1).

Задача фільтрації 1 – визначення тиску метану $P_1(x,t)$ при фільтрації в разі відсутності адсорбції і десорбції в ядрі порушеної зони при наступних початкових і граничних умовах:

$$\text{при } x = 0, \quad t = 0, \quad - \quad P_1 = P_a \quad (2)$$

$$x \text{ при } \sigma_y = \gamma H, \quad \sigma_y = \gamma H; \quad - \quad P_1 = P_u \quad (3)$$

де P_a – тиск метану на вибої пласта, Па; σ_y – вертикальне напруження, Па; H – глибина залягання виробки, м; γ – об'ємна вага порід, H/m^3 ; P_u – пластовий тиск газу в незайманому масиві, Па.

Задача фільтрації 2 – визначення тиску метану $P_2(x,t)$ при фільтрації з урахуванням приросту тиску адсорбції метану $\Delta P_{ad}(x,t)$ чи десорбції в ядрі порушеної зони $P_d(x,t)$ при наступних початкових і граничних умовах:

$$\text{при } x = 0, \quad t = 0, \quad P_2 = P_a; \quad (4)$$

$$\text{при } x = l'_1 + l_{n1}, \quad P_2 = P_1 + P_d - \Delta P_{ad}. \quad (5)$$

де l'_1 – відстань від вибою до перехідної зони, довжина якої дорівнює l_{n1} , м; P_{ad} – тиск адсорбованого метану, Па.

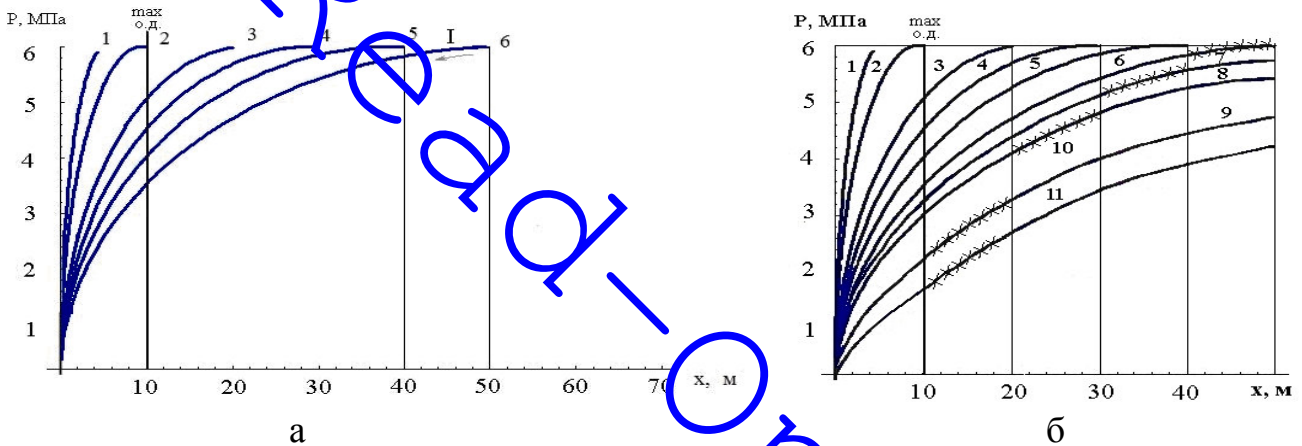
Тиск адсорбованого вугіллям метану $P_{ад}$ встановлювали, використовуючи його взаємозв'язок зі ступенем заповнення пор газом, що описується співвідношенням Хілла:

$$\ln P_{ад} = \ln \frac{\theta}{k_1'(1-\theta)} + \frac{\theta}{1-\theta} - k_2\theta, \quad (6)$$

де θ – ступінь заповнення пор метаном; $k_1' = k_1 \cdot b_2$; k_1 – константа Генрі, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{Па})$; b_2 – обратная площадь поверхности адсорбента, занимаемая одним молекул адсорбата почти при полном заполнении пор метаном, $\text{кг}/\text{м}^3$; $k_2 = 2a_2 / b_2$; a_2 – константа, що характеризує взаємодію між молекулами.

Результати розрахунку фільтрації метану, виконані в рамках задачі 1 і 2 для гірничогеологічних умов ШУ «Покровське», представлені на рисунку 2.

Вони показали, що оскільки мікропористий простір вугілля наповнений метаном всього на 40 %, то при фільтрації вільного метану у пружній області опорного тиску в результаті перепаду вільного і сорбованого метану відбувається процес адсорбції метану мікропорами вугілля.



1 – $t = 35$ с; 2 – $t = 115$ с; 3 – $t = 0,6 \cdot 10^3$ с; 4 – $t = 1,1 \cdot 10^3$ с; 5 – $t = 1,9 \cdot 10^3$ с;
6,7,8,9 – $t = 0,36 \cdot 10^4$ с; 10 – ядро порушеної зони; 11 – $t = 0,72 \cdot 10^4$ с.

I – початкове положення ядра зони порушеності

Рисунок 2 – Закономірності зміни тиску вільного метану у структурно-неоднорідному вугільному пласті в зоні опорного тиску без урахування сорбованого метану (а) і з урахуванням адсорбції метану в ядрі порушеної зони при різному його розташуванні в пружній області опорного тиску (б)

На рисунку 2б представлені закономірності зміни тиску вільного метану з урахуванням того, що частина газу в процесі його фільтрації адсорбовалась мікропористою структурою ядра порушеної зони, при різному його розташуванні в пружній області опорного тиску. Результати розрахунків з урахуванням співвідношення (б) дозволили встановити, що загальна ступінь насичення пористого простору ядра при його наближенні до граничної області опорного тиску порушеної зони, що враховує її первинне насичення на 40%, становить для умов шахти ШУ «Покровське» 93%. Тобто, з урахуванням газу, насиченого у міжпоровому просторі вугілля, це створює на кордоні з граничною областю «резервуар» зі значним

обсягом адсорбованого метану, тиск якого може досягати граничного значення сорбційної ємкості мікропористого простору вугілля.

Коли зона порушеності насичена адсорбованим метаном з високим тиском, входить в граничну область опорного тиску, то поряд з фільтрацією вільного газу, реалізується десорбція метану, що визначається перепадом тиску його вільною та адсорбованою фазами. Закономірність газовіддачі метану, що десорбується встановлювали шляхом моделювання його дифузії з ядра порушеної зони в перехідну. При цьому припускали, що початкова концентрація сорбованого метану в непорушеному сферичному фрагменті вугілля радіусом R_0 дорівнює $c(r,0) = c_0$, а концентрація метану в тріщинах, які повністю або частково оточують його, становить $c(R_0, t) = c_1$. Тоді задача про десорбцію метану з ядра зони порушеності вугільного пласта звелася до задачі про сумарну дифузії метану у фрагментах вугілля, яка для одиничного джерела десорбції описується рівнянням дифузії в сферичних координатах наступним чином:

$$\frac{\partial c(r,t)}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c(r,t)}{\partial r} \right), \quad (8)$$

де $c(r,t)$ - концентрація газу, $1/\text{м}^3$; t - час, с; r - радіальна координата, м; D - коефіцієнт твердотільної дифузії з урахуванням міжмолекулярних взаємодій в системі «метан- вугілля», $\text{м}^2/\text{с}$.

Коефіцієнт твердотільної дифузії в рівнянні (8) визначали з урахуванням міжмолекулярних взаємодій в системі сорбат-сорбент на основі моделі Пейса-Дейтінера, яка найбільш повно зв'язує параметри молекулярної структури вугілля з його дифузійною здатністю, і враховує локальні взаємодії між молекулами метану і сегментами структурного ланцюжка вугілля за формулою:

$$D = (9.1 \times 10^{-4}) \frac{\bar{L}^2}{\lambda^2} \left(\frac{\varepsilon^*}{r^*} \right)^{5/4} \left(\frac{\sqrt{\beta}}{m^*} \right)^{1/2} \frac{d'}{\delta E_a / \delta \lambda} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (9)$$

де \bar{L} - довжина вільного дифузійного стрибка молекули метану, м; λ - середня відстань між структурними сегментами порушеного вугілля, м; ε^* , Дж/моль і r^* , м - середні значення параметрів потенціалу Ленарда-Джонса, що характеризують енергетичний зв'язок між молекулами метану вугільного речовини; β - константа, що характеризує деформацію валентного кута молекулярної структури вугілля на одиницю довжини сегмента, Дж·м/моль; m^* - молекулярна маса одиниці довжини структурного сегмента, кг; R - газова постійна, Дж/(моль·К); T - температура пласта, К; E_a - енергія активації десорбції метану в ядрі порушеної зони, Дж/моль, котра, виражається співвідношенням:

$$E_a = 5,23 \left(\frac{\beta}{d'} \right)^{1/4} \left(\frac{\varepsilon^* r^*}{\lambda^2} \right)^{3/4} \left\{ 0,077 \left[\left(\frac{r^*}{l} \right)^{11} (l - 10d') - r^* \left(\frac{r^*}{r^* + d} \right)^{10} \right] - 0,580 \left[\left(\frac{r^*}{l} \right)^5 (l - 4d') - r^* \left(\frac{r^*}{r^* + d} \right)^4 \right] \right\}^{3/4}, \quad (10)$$

де $d' = d + r^* - l$ - еквівалентний діаметр молекули метану, м; l - відстань між структурними ланцюгами порушеної вугільної речовини, м.

Рівняння (8) вирішувалося методом Фур'є з урахуванням встановлених співвідношень для упаковки вугільних фрагментів в порушеному вугіллі. В результаті було отримано наступну формулу для визначення концентрації десорбованого метану:

$$C(r,t) = \frac{6}{\pi R_0 (1 + \sqrt{3})} \frac{2r_k r \gamma}{\pi R^2} \left(\frac{4R_0}{(1 + \sqrt{3})} - \frac{d_{\min}}{\sin \alpha} \right) \times \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(c_0 - c_R) R_0}{n \pi r} (-1)^{n+1} \sin \frac{n \pi r}{R_0} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D t}{R_0^2}\right) + c_R \right), \quad (11)$$

де r_k – радіус кривизни частки вугілля, м; γ – половина кута, утвореного центром радіуса кривизни частки вугілля і точками дотику з іншими частинками вугілля, рад; d_{\min} – газокінетичний діаметр молекули метану, м; α – кут, що характеризує кривизну пори, рад; R_0, R – радіус відповідно непорушеного та порушеного вугілля, м; c_0, c_R – концентрація сорбованого метану, відповідно в непорушеному та порушеному фрагменту вугілля та в тріщинках, що його оточують, $1/\text{м}^3$.

Результати розрахунку зміни концентрації сорбованої метану в ядрі порушеної зони при $\Delta P = 2 \text{ МПа}$ для умов ШУ «Покровське» представлені на рисунку 3. При цьому для впровадження розрахунків на практиці концентрація метану в $1/\text{м}^3$ перераховувалась мл/г .

На підставі встановлених десорбційних закономірностей адсорбованого у вугіллі метану і фільтраційних закономірностей вільного газу в структурно-неоднорідному вугільному пласті, використовуючи описаний вище алгоритм розрахунку були встановлені закономірності фільтрації метану, обумовлені вільною і адсорбованою фазами в граничній області опорного тиску. Остаточні результати розрахунку наведені на рисунку 4. На цьому рисунку представлений також графік зміни максимального тиску метану в моменті часу менше 1 год. поблизу поверхні вибою – $P^{\max}(t < 1 \text{ год.}, x = 0,2 \text{ м})$. При цьому слід зазначити, що криві 3-6 матимуть місце або в разі газодинамічного стану вугільного пласта після нарізки лави, або після ремонтної зміни. Час $t < 1 \text{ год.}$ відповідає процесу безперервного видобутку вугілля після перезміни.

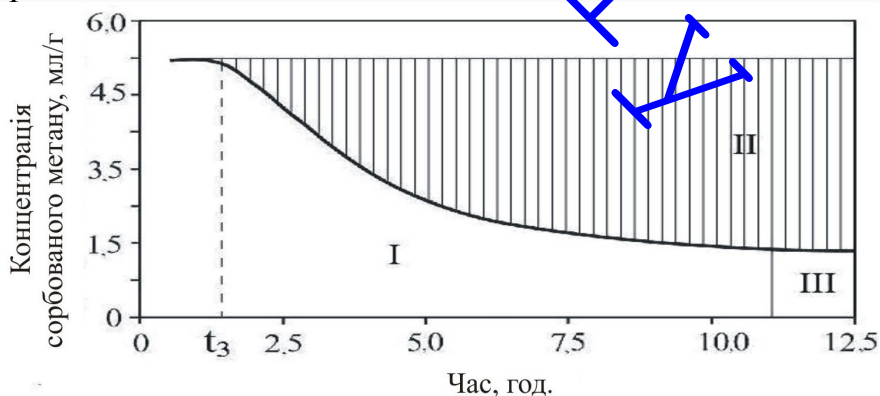
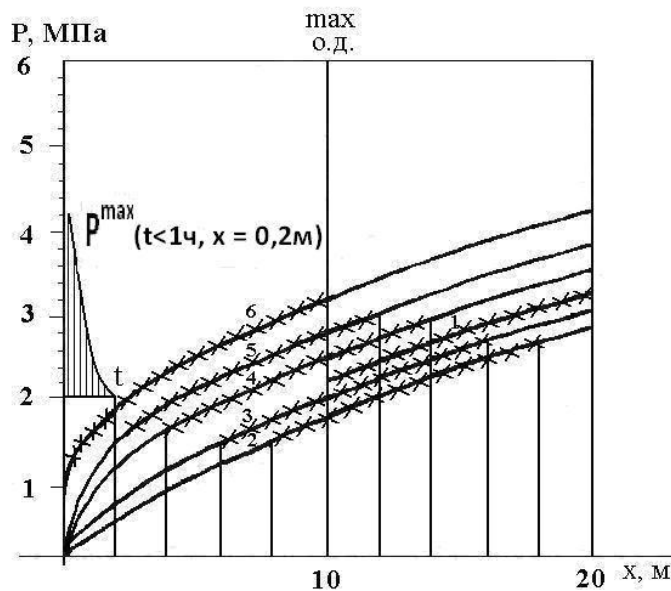


Рисунок 3 – Закономірність зміни концентрації адсорбованого метану, в ядрі порушеної зони (І) і відповідне йому концентрація десорбованого метану (ІІ), де ІІІ – зона залишкового газу; t_3 - час запізнювання розвитку процесу десорбції



1, 2 - тиск метану відповідно, при підході до зони опорного тиску і при $t = t_3$; 3-6 - зміна тиску метану в міру просування вибою до ядра порушеної зони при $t = 1$ год. Рисунок 4 - Закономірності зміни тиску метану у вугіллі, що вміщає ядро порушеної зони, у міру його переміщення в граничній області опорного тиску і максимального тиску поблизу вибою виробки при $t < 1$ год. - P^{\max} ($t < 1$ год., $x = 0,2$ м).

З графіків, представлених на рисунку 4, та при їх порівнянні з фільтраційними закономірностями в разі відсутності ядра порушеної зони в граничній області, наведеними на рисунку 2а, видно наступне. При входженні ядра в граничну область спочатку тиск метану знижується на 30%. Це відбувається через затримку розвитку десорбційного процесу у вугіллі внаслідок перебудови його молекулярної структури при розвантаженні пласта в граничній області. Зі збільшенням розмірів ядра в цій області тиск підвищується за рахунок додаткового обсягу десорбуючого метану. І, як видно з рисунка 4, коли довжина ядра складе 5 м і більше, тиск метану при фільтрації перевищує тиск в разі відсутності ядра в граничній області (рис. 2а). Причому в привибійній області ($x = 0,2$ м) в разі безперервного видобутку вугілля ($t < 1$ год.) і коли ядро повністю знаходиться в непружній області (рис. 4) тиск різко зростає, досягаючи величини 4,2 МПа, в той час, як при відсутності ядра воно майже в два рази менше (рис. 2а).

Таким чином, встановлені закономірності фільтраційного процесу метану у зоні опорного тиску вугільного пласта, що вміщає зону порушеності, насичену адсорбованим і вільним метаном. Коли ядро порушеної зони, насичене, в більшій мірі, адсорбованим, ніж вільним метаном, знаходиться в граничній області опорного тиску, то це призводить до зміни характеру фільтраційного процесу у вугільному пласті, що полягає в тому, що спочатку при входженні ядра в граничну область, приблизно, до її середини, відбувається зниження тиску фільтрації метану, а потім, у міру наближення вибою до ядра порушеної зони, - його підвищення до двох разів в початковий період часу поблизу поверхні вибою у порівнянні з тиском вільного метану при його фільтрації.

У четвертому розділі для перевірки, отриманих в третьому розділі параметрів проведені та проаналізовані шахтні експериментальні дослідження по оцінці небезпечності імпульсних виділень метану при проведенні гірничих робіт.

Об'єктом досліджень у даному розділі був процес неочікуваних імпульсних виділень метану в гірничі виробки поблизу геологічних порушень при первинних і наступних посадках (обваленнях) основної покрівлі. В цьому розділі виконаний аналіз обставин і динаміки газовиділення у зонах геологічних порушень при посадках основної покрівлі, які призвели до аварій на шахтах «ШУ «Покровське», ім. О.Ф. Засядька і ім. С.М. Кірова ДП «Макіїввугілля». Наведено результати досліджень рясності метану на пласті d_4 ВАТ «Шахтоуправління «Покровське» корінної східної лави; 2-ї, 4-ї, 5-ї та 3-ї східних лав пласта h_{10} на шахті ім. С.М. Кірова і 16-ї західної лави пласта m_3 шахти ім. О.Ф. Засядька. При цьому виконано оцінка ефективності дегазаційних свердловин, пробурених в зону впливу антиклінальної складки.

Виконані дослідження дозволили сформулювати механізм імпульсних проривів метану з покрівлі, що полягає в наступному. Одиночний вугільний пласт розробляється, наприклад, в зоні впливу плікративного (антикліналі, куполи, флексури, брахіантикліналі, осьові частини антикліналей) або малоамплітудного розривного (насуви, скиди, взброси) геологічного порушення, здатних утворювати газові «пастки». Безпосередня покрівля розроблюваного пласта представлена газонепроникними породами, що легко обрушаються (аргіліти, алевроліти), вище яких залягає тріщинуватий газонасичений піщаник (тріщинуватий колектор вільного газу). Під час обвалення основної покрівлі відбувається оголення тріщинуватого колектора, в нашому випадку газонасиченого пісковика і вільний газ, що накопичився в ньому, починає інтенсивно виділятися в гірничі виробки. Причому газ може виділятися з великих площ, що знаходяться в зоні впливу очисних робіт. Наступні, після імпульсного прориву газу, обвалення покрівлі і, відповідно, розвантаження пісковика, як правило, не викликають аномальних виділень метану у зв'язку з дегазацією колектора і виходу очисних робіт із зони впливу порушення. Проведені дослідження дозволили зробити висновок про те, що при суцільної і стовпової системах розробки дегазацію газонасичених структур можливо здійснювати як свердловинами, пробуреними з поверхні, так і свердловинами, пробуреними з гірничих виробок. На основі цього механізму розроблено метод прогнозу і обґрунтовані параметри імпульсного виділення метану у зонах геологічних порушень при веденні виїмкових робіт.

Сформульовані умови віднесення ділянок розроблюваного пласта до небезпечних щодо проривів метану з покрівлі і межі таких ділянок (табл. 1) та запропоновано типові схематичні геологічні розрізи порід, які характерні для можливих проривів метану у вибої проведених виробок. Вони є основою для прогнозу можливості імпульсних виділень метану при веденні гірничих робіт, в таких випадках, як:

- наявність геологічних порушень, або зон малоамплітудної порушеності, які є шляхами міграції вуглеводневих газів і створюють пастки вільних газів у зонах впливу порушень або в самих зонах малоамплітудної порушеності;

Таблиця 1 – Умови віднесення ділянок розроблюваного пласта до небезпечних щодо проривів метану

Характеристика гірничо-геологічних умов	Межі небезпечних ділянок
1. В зонах складчатих структур	
1.1 Підроблена товща залягає антиклінально. Відношення висоти складки до її ширини - більше 1/50. Безпосередня покрівля розроблюваного пласта представлена породами, які легко обриваються (аргіліти, алевроліти). Вище розроблюваного пласта на відстані від 2 м до 40 м (m – потужність розроблюваного пласта) залягає піщаник, що вміщує в покрівлі або підшві вугільний пласт або пропласток. Піщаник перекритий в покрівлі породою - газупором.	По простяганню пласта на відстані не менше 20 м по обидва боки від основи складки. В хрест простягання пласта - на протязі довжини вигину
1.2. Підроблена товща залягає у вигляді брахіантикліналі або купола. Відношення висоти купола до його ширини більше 1/50. Інші умови – згідно пункту 1.1 таблиці.	По простяганню і в хрест простягання пласта - на відстані не менше ніж 20 м поблизу основи купола або брахіантикліналі.
1.3. Породна товща залягає у вигляді флексури - колінчатого вигину пластів, які залягають моноклінально. Величина кута (V) флексури від 90° до 170°. Інші умови – згідно пункту 1.1 таблиці.	По простяганню пласта - на відстані не менш ніж 100 м в обидва боки від флексури. В хрест простягання пласта - на відстані довжини флексури.
1.4. Підроблена товща залягає синклінально. Відношення висоти складки до її ширини більше 1/35. Вісь складки вигнута антиклінально. Величина вигину більше 1/50. Інші умови – у пункті 1.1 таблиці.	В хрест простягання пласта на відстані не менш ніж 100 м в обидва боки від осі синкліналі. По простяганню – на відстані зігнутої донної частини синкліналі.
2. В зонах геологічних порушень	
2.1. У підробленій товщі є поздовжнє розривне геологічне малоамплітудне порушення, створене в умовах стиснення, з амплітудою зміщення до 10 м, яке зазвичай не виходить на земну поверхню (зазвичай це апофіза великого насуву). Інші умови - згідно пункту 1.1 таблиці.	На відстані не меншій ніж 20 м в обидва боки від схрещування лінії пласта і зміщувача розриву.
2.2. У підробленій товщі є зона загасання поздовжнього або діагонального розривного геологічного порушення. Інші умови - згідно пункту 1.1 таблиці.	На відстані 40 м в обидва боки від лінії схрещування пласта і зміщувача розриву.

- приуроченість очисних робіт до геологічних структур (брахіантикліналі, антикліналі, бані), де утворення пасток і мікропокладів вільного газу обумовлено структурним положенням ділянки;

- поєднання газонасиченої структурної пастки з тектонічною, яка оголюється при обваленні порід основної покрівлі, і з якої надходять великі обсяги газу в гірничі виробки за невеликі проміжки часу;

- наявність в основній покрівлі газонасичених пісковиків, пластів - колекторів, покритих газонепроникною покришкою (вугільний пласт, аргіліт, алевроліт);

- наявність у покрівлі розроблюваного вугільного пласта покришки - непроникних чи слабопроникних порід глинистого (аргіліти), вуглисто-глинистого,

або піщано-глинистого (алевроліти) складу, які перешкоджають поступової дегазації колекторів при веденні гірничих робіт. Газовиділення починається тільки після обвалення порід основної покрівлі та оголення колектора.

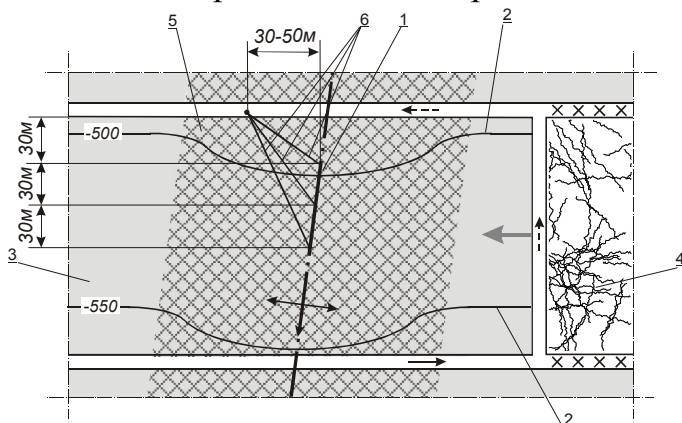


Рисунок 5— Технологічна схема дегазації газонасиченої структури свердловинами, пробуреними з гірничих виробок: 1 – вісь антикліналі; 2 – зогіпсі; 3 – пласт, що розробляється; 4 – вироблений простір; 5 – свердловин; 6 – дегазаційні свердловини

При дегазації газонасичених структур свердловинами, пробуреними з гірничих виробок дегазаційні свердловини повинні перетинати потенційне джерело газовиділення (пласт-колектор) і проникати в породу-газоупор поблизу осі газонасиченої структури (рис. 5). При цьому свердловини буряться назустріч очисного забою. Їх параметри встановлюються в конкретних гірничо-технічних умовах. Для забезпечення необхідного ефекту необхідно бурити не менше трьох свердловин. Відстань між вибоями свердловин повинна бути не більше 30м.

Таким чином, обґрунтовані параметри ведення очисних робіт у зонах геологічних порушень, небезпечних за раптовими виділеннями метану дозволили розробити та впровадити способи прогнозу і запобігання імпульсних загазувань гірничих виробок при відході очисного вибою від зони геологічного порушення та сформулювати основні вимоги до заходів по запобіганню імпульсних загазувань гірничих виробок при обваленні порід покрівлі в зонах геологічних порушень. В основі цих заходів закладений загальновідомий принцип дегазації потенційних джерел газовиділення за допомогою свердловин, причому як при суцільній системі відпрацювання пласта, так і при стовпової.

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій вирішене актуальне наукове завдання, яке полягає у встановленні закономірностей фільтрації метану в непружній зоні опорного тиску вугільного пласта з урахуванням його вільної та адсорбованої фази, обґрунтуванні параметрів ведення очисних робіт у зонах геологічних порушень, небезпечних за раптовими виділеннями метану: метановиділення в забій, параметри дегазаційних свердловин, темпи виїмки, відстань від геологічного порушення і інших та розробці на цій основі способів прогнозу і запобігання імпульсних загазувань гірничих виробок при відході очисного вибою від зони геологічного порушення, що має суттєве значення для підвищення безпеки праці з очікуваним економічним ефектом 2,4 млн. гривень на один очисний забій в рік.

Основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Проаналізовані основні механізми раптових проривів метану в виробки поблизу зон геологічних порушень та основні геологічні критерії прогнозу раптового газовиділення при обрушеннях порід покрівлі. Обвалення порід покрівлі, як правило, супроводжується інтенсивним виділенням метану з розвантажених вугільних пластів і порід у вироблений простір як з підшви, так і з покрівлі розроблювального пласта. При прориву газу з покрівлі виділення метану може збільшуватися в 6-35 раз і досягати максимально встановлених обсягів (до 100 м³/хв) протягом незначного проміжку часу. Потім відбувається поступове зниження дебіту газу, що виділяється.

2. Для недопущення неочікуваних загазувань гірничих виробок і забезпечення безпеки робіт по газовому фактору необхідна дегазація вільних скупчень метану в колекторах вміщуючих порід, а також виключення відповідних гірничо-технологічних умов, що сприяють імпульсному переведенню значних обсягів пов'язаного з вугіллям метану (в основному адсорбованого) у вільний в зоні ведення гірничих робіт. До основних заходів попередження загазувань виробок можна віднести загальне або місцеве збільшення швидкості повітряного потоку, зменшення або перерозподіл виділення метану у гірничі виробки шляхом зміни схем і способів провітрювання, а також додаткову дегазацію вугільних пластів та вміщуючих порід.

3. Встановлено, що за енергетичний потенціал зон середнього ступеня порушеності можна прийняти енергію, що дорівнює, в середньому, 10⁵ Дж/моль. Це означає, що в результаті тектонічного процесу та геодинамічного тиску в порушеній зоні реалізовувалися всі конформації, енергія яких менше вказаного значення енергетичного потенціалу, що становить половину всіх можливих конформацій в молекулярній структурі вугілля. Тобто генерований газ розподілений в поровому і міжпоровому просторі порушеного вугілля на 50 % із зміненою геометрією структури і з досить сильними сорбційними зв'язками, енергія яких дорівнює 10-20 кДж/моль.

4. Виходячи з розглянутих особливостей будови вугільного пласта в порушених зонах, встановлено, що модель трещиновато-пористої структури вугілля в зоні порушеності можна представити в наступному вигляді. У центральній частині порушеної зони має місце «перем'ята» зона, яка на самому малому масштабному рівні складається з непорушених фрагментів вугілля, розміри яких у 7 разів менше, ніж у непорушеному вугіллі. Ці фрагменти розділені порушеною структурою вугілля і являють собою джерела десорбції метану у вугільному пласті при порушенні його рівноважного стану. Способом його міграції є, переважно, твердотільна дифузія. Наступний масштабний рівень становить сукупність фрагментів вугілля між якими розташовуються субмакропори радіусом від 500 Å до 5000 Å, де починає реалізовуватися фільтрація метану, що десорбується. Далі йдуть великомасштабні утворення в ієрархічній структурі вугілля, складені окремосями, розсіченими тріщинами, які насичені вільним метаном, де реалізується фільтрація газу.

5. Вперше теоретична оцінка зміцнення і знеміцнення молекулярної структури вугілля в пружній області опорного тиску показала, що приріст макронапружень в

цій галузі підвищує потенціал молекулярної структури вугілля всього на 10 %. Тому з урахуванням встановленого вихідного значення потенціалу можна стверджувати, що молекулярна структура вугілля низького і середнього ступеня метаморфізму в пружній області опорного тиску буде піддана лише процесам декомпресії, що характеризуються збільшенням міжшарових відстаней в мікроструктурі вугілля без розриву валентних зв'язків.

6. В результаті термодинамічної оцінки вугільного пласта, вперше встановлено, що найбільш імовірний максимум обсягу метану, сорбованого в мікропоровому просторі порушеної зони вугільного пласта становить близько 40% від граничної сорбційної газоемкості вугілля. Тому при його переміщенні в пружній області опорного тиску, в результаті перепаду тиску вільного і сорбованого метану при його фільтрації в перем'ятій зоні буде реалізовуватися процес адсорбції вугіллям метану. Тобто в пружній області опорного тиску має місце ефект поглинання метану центральною частиною порушеної зони вугільного пласта.

При фільтрації метану у пружній області опорного тиску вугільного пласта, що вміщує зону порушеності, має місце ефект поглинання метану, обумовлений його адсорбцією центральною частиною порушеної зони в міру її просування до максимуму опорного тиску, в обсязі, що по логарифмічній залежності прагне до максимальної сорбційної газоемкості мікропористого простору вугільного пласта, яка дорівнює $60 \text{ м}^3/\text{т}$, що призводить до зниження тиску вільного газу в фільтраційному потоці у пружній області і створює на кордоні з непружною областю «резервуар» зі значним тиском адсорбованого метану у вугіллі, який може досягати свого граничного значення у 5 МПа.

7. Встановлено, що найбільш інтенсивне поглинання ядром порушеної зони метану відбувається на початковому етапі його входження в пружну область, коли ядро розташоване, наприклад, для гірничо-геологічних умов шахти «Покровська» на відстані від 20м до 30м від максимуму опорного тиску. У зв'язку з цим, можна рекомендувати здійснювати дегазацію на початковому етапі входження перем'ятої зони в пружну область опорного тиску.

8. Вперше встановлені закономірності фільтрації метану в граничній області опорного тиску, обумовлені вільним і десорбуючимся метаном. В результаті встановлено наступне. Коли ядро порушеної зони насичене, в більшій мірі, адсорбованим, ніж вільним метаном, знаходиться в граничній області опорного тиску, то це призводить до зміни характеру фільтраційного процесу у вугільному пласті, що полягає в тому, що спочатку при входженні ядра порушеної зони в непружну область, приблизно, до її середини, відбувається зниження тиску фільтрації метану по логарифмічному закону до 30%, а потім, у міру наближення вибою до ядра його підвищення по зворотному - експоненціальному закону до 100% в початковий період часу поблизу поверхні вибою у порівнянні з тиском вільного метану при його фільтрації.

9. Для гірничо-геологічних умов ШУ «Покровське» розрахунки показали, що межі зміни тиску метану поблизу вибою виробки в період часу від 35с до 1 год при наявності зони порушеності змінюються від 1 МПа (при $t=1$ год) до 4,2 МПа (при $t=35$ с), а при відсутності цієї зони – від 1 МПа до 2 МПа, тобто в 2 рази менше.

10. Розроблені технологічні схеми дегазації газонасичених структур вуглепородного масиву поблизу зон геологічних порушень за допомогою свердловин, які бурять з гірничих виробок та поверхні землі. Дегація вільних скупчень метану в колекторах за допомогою розроблених способів дозволяє не допустити неочікуваних загазувань гірничих виробок і забезпечити безпеку робіт по газовому фактору.

11. Встановлено, що обвалення порід покрівлі, як правило, супроводжується інтенсивним виділенням метану з розвантажених вугільних пластів і порід у вироблений простір, як з покрівлі, так і з підшови розроблюваного пласта. При прориві газу з покрівлі виділення метану може істотно збільшуватися і досягати максимальних значень протягом незначного проміжку часу. Потім відбувається поступове зниження дебіту газу, що виділяється. Найбільш інтенсивно газ виділяється при обваленнях порід в зоні впливу плікативних порушень з тріщинно-порових газових колекторів. А в зоні впливу розривних порушень газовиділення при обваленні порід покрівлі має меншу інтенсивність.

12. Сформульовано основні умови віднесення ділянок розробляемого пласта до небезпечних та запропоновано геологічні розрізи порід, які характерні для можливих проривів метану у вибій виробок. Вони можуть бути основою для прогнозу можливості імпульсних виділень метану в зонах геологічних порушень при веденні гірничих робіт. Це дозволило сформулювати третє наукове положення.

При відході очисного вибою від монтажного хідника поблизу порушень формується зона підвищеної аерогазодинамічної небезпеки, тобто перша зона «квадрата виробленого простору», що характеризується не менше ніж двома інтенсивними сплесками виділення метану в забій, перший з яких відповідає посадці порід основної покрівлі, а другий пов'язаний з повним формуванням зони основного склепіння обвалення в породах покрівлі.

13. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується: коректною постановкою задач; використанням теоретичних методів досліджень, що базуються на фундаментальних положеннях механіки гірських порід; апробованими методами математичного моделювання; збігом теоретичних результатів моделювання процесів фільтрації метану з експериментальними даними на конкретних виробничих ділянках з похибкою, що не перевищує 20 %.

14. Одержані в процесі дослідження результати ввійшли до «Рекомендацій по прогнозу небезпеки імпульсних загазувань гірничих виробок при відході очисного вибою від зони геологічного порушення», «Рекомендацій по запобіганню імпульсних загазувань гірничих виробок при відході очисного вибою від зони геологічного порушення» та передані до шахтного управління «Покровське».

СПИСОК РОБІТ АВТОРА, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових фахових та закордонних виданнях

1. Сдвижкова Е.А., Кравченко К.В., Халимендик А.В., Халимендииков Е.Н., Янжула А.С. Анализ проявлений горного давления при проведении выработок в районе мелкоамплитудных геологических нарушений (на примере уклона блока

№10 ШУ «Покровское». *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*. 2011. № 9. Ч. 1. С. 269-281.

2. Минеев С.П., Янжула А.С., Кочерга В.Н., Прусова А.А. Внезапные выделения метана импульсного характера в зонах геологических нарушений. *Геотехнічна механіка: міжвед. сб. наук. праць*. Дніпропетровськ, 2015. Вип. 123. С. 48-66.

3. Минеев С.П., Кочерга В.Н., Янжула А.С., Гулай А.А. Обоснование критериев прогноза импульсных выделений метана в зонах геологических нарушений при обрушении пород кровли. *Геотехнічна механіка: міжвед. сб. наук. праць*. Дніпропетровськ, 2015. Вип. 124. С. 32-46.

4. Минеев С.П., Кочерга В.Н., Янжула А.С., Гулай А.А., Рыжова С.А. Закономерность процессов десорбции метана из зоны нарушенности угольного пласта. *Геотехнічна механіка: міжвед. сб. наук. праць*. Дніпропетровськ, 2015. Вип. 125. С. 70-81.

5. Минеев С.П., Кочерга В.Н., Наривский Р.Н., Янжула А.С., Колесников А.Н., Гордиевский К.Н. Методология разработки противоаварийных мероприятий в проекте дегазации угольной шахты. *Геотехнічна механіка: міжвед. сб. наук. праць*. Дніпропетровськ, 2016. Вип. 127. С. 226-238.

6. Минеев С.П., Салегин В.Н., Головки Ю.М., Янжула А.С. Оценка особенностей фильтрации свободного метана в структурно-неоднородном угольном пласте. *Геотехнічна механіка: міжвед. сб. наук. праць*. Дніпропетровськ, 2016. Вип. 128. С. 105-115.

7. Баранов В.А., Янжула А.С. Горно-геологические условия поля ШУ «Покровское». *Геотехнічна механіка: міжвед. сб. наук. праць*. Дніпропетровськ, 2016. Вип. 129. С. 75-81.

8. Минеев С.П., Прусова А.А., Салегин В.Н., Янжула А.С., Кишкань М.А. Моделирование фильтрационного процесса в угольном пласте, вмещающем зону нарушенности, насыщенную свободным и сорбированным газом. *Геотехнічна механіка: міжвед. сб. наук. праць*. Дніпропетровськ, 2016. Вип. 130. С. 20-42.

9. Смирнов А.Н., Минеев С.П., Янжула А.С., Самохвалов Д.Ю., Яценко И.А. Некоторые вопросы аэрогазового контроля в условиях угольных шахт. *Геотехнічна механіка: міжвед. сб. наук. праць*. Дніпропетровськ, 2016. Вип. 132. С. 183-192.

10. Минеев С.П., Кочерга В.Н., Прусова А.А., Головки Ю.И., Янжула А.С., Гулай А.А. Вопросы оценки эффективности мероприятий для исключения возможности загазирования горных выработок. *Геотехнічна механіка: міжвед. сб. наук. праць*. Дніпро, 2017. Вип. 133. С. 190-212.

11. Минеев С.П., Кочерга В.Н., Янжула А.С., Кишкань М.А. Мероприятия для предотвращения загазирования горных выработок. *Фізико-технічні проблеми горного виробництва*. Институт физики горных процессов НАН Украины, 2016. Вып.18. С. 175 -193.

12. Mineev S., Yanzhula O., Yulai O., Miniev, O., Zabolotnirova V. Application of shock blasting mode in mine roadway construction. *Journal «Mining of Mineral Deposits»*. National mining university, 2016. Volume 10. Issue 2. P. 91-96.

13. Mineev S.P., Kocherga V.N., Narivskiy R.N., Yanzhula A.S. Questions of the analysis of the applicable schemes of conveying the moving sites on Ukrainian mines and

effectiveness of degasation. *The International Scientific Periodical Journal "Modern Scientific Researches"*. Minsk, Belarus, 2018. Issue №3. Vol. 1. P. 35-43.

Патенти

14. Спосіб газового моніторингу в лаві при пересуванні механізованого кріплення: пат. 116222 Україна: МПК6 E21F 7/00. № u201612262; заявл. 02.10.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. 4 с.

15. Спосіб дегазації порожнини з метаном: пат. 118496 Україна: МПК6 E21F 7/00. № u201702123; заявл. 06.03.2017; опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15. 4 с.

16. Спосіб дегазації викидонебезпечних вугільних пластів та прилеглих до них газонасичених порід: пат. 118759 Україна: МПК6 E21F 7/00. № u201702009; заявл. 02.03.2017; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 16. 4 с.

17. Спосіб управління провітрюванням виробки: пат. 118775 Україна: МПК6 E21F 7/00. № u201702200; заявл. 09.03.2017; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 16. 4 с.

18. Спосіб газового моніторингу в лаві: пат. 118801 Україна: МПК6 E21F 7/00. № u201702503; заявл. 17.03.2017; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 16. 4 с.

19. Система поверхневої дегазації зони з метаном: пат. 118868 Україна: МПК6 E21F 7/00. № u201703031; заявл. 30.03.2017; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 16. 4 с.

20. Спосіб визначення викидонебезпеки вугільних пластів з урахуванням йодного показника ступеня порушеності вугілля: пат. 120190 Україна: МПК6 E21F 5/00. № u201704048; заявл. 24.04.2017; опубл. 25.10.2017, Бюл. № 20. 4 с.

21. Спосіб попередньої дегазації вугільних пластів та прилеглих до них газонасичених гірських порід: пат. 122440 Україна: МПК6 E21F 7/00. № u201707030; заявл. 04.07.2017; опубл. 10.01.2018, Бюл. № 1. 4 с.

22. Спосіб прогнозу метанонебезпеки вугільних шахт: пат. 123359 Україна: МПК6 E21F 7/00. № u201708797; заявл. 01.09.2017; опубл. 26.02.2018, Бюл. № 4. 4 с.

23. Пристрій для попередньої дегазації вугільних пластів: пат. 124424 Україна: МПК6 E21F 7/00. № u201710225; заявл. 23.10.2017; опубл. 10.04.2018, Бюл. № 7. 4 с.

24. Спосіб буровибухового проведення виробок у газонасичених пластах вугілля та гірських порід: пат. 126862 Україна: МПК6 F42D 1/08, F42D 1/02, E21F 17/16. № u201800625; заявл. 23. 10.2018; опубл. 10.07.2018, Бюл. № 13. 4 с.

25. Спосіб буровибухового проведення виробок у викидонебезпечних пластах вугілля та гірських порід: пат. 126863 Україна: МПК6 F42D 1/08, F42D 1/02, E21F 17/16, E21F 5/00. № u201800626; заявл. 23.10.2018; опубл. 10.07.2018, Бюл. № 13. 4 с.

26. Спосіб буровибухового проведення виробок у газонасичених пластах вугілля та гірських порід: пат. 129041 Україна: МПК6 F42D 1/08, F42D 1/02, E21F 17/16, E21F 5/00. № u201800627; заявл. 23.10.2018; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 4 с.

Основні публікації в матеріалах конференцій

27. Минеев С.П., Кочерга В.Н., Янжула А.С., Прусова А.А. Особенности импульсных выделений метана при обрушении пород кровли в геологических нарушениях. *Форум горняков - 2015*: матеріали міжнар. конф., м. Дніпропетровськ, 30 вересня - 3 жовтня 2015 р. ТОВ «Лізунов Прес», 2015. Т. 2. С. 72-82, (очна участь).

28. Минеев С.П., Дякун Р.А., Кострица А.А., Янжула А.С., Кишкань М.А., Гулай А.А. Прогноз выбросоопасных зон на угольном пласте d_4 ШУ «Покровское»

по относительной изменчивости уклонов. *Форум гірників- 2016*: матеріали міжнар. конф., м. Дніпро, 05-08 жовтня 2016 р. НГУ, 2016. Т. 1. С. 123-132, (очна участь).

29. Минеев С.П., Кочерга В.Н., Янжула А.С. Метановыделение при высоких скоростях подвигания очистного забоя. *Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности*: 12-я международная конференция, Тула, 2-3 листопада 2016 р. Тульский государственный университет. Под редакцией Р.А. Ковалева, 2016. Том. 1. С. 59-66, (заочна участь).

30. Минеев С.П., Янжула А.С., Лосев В.И., Минеев А.С. Режим сотрясательного взрывания при проведении выработок. *Сучасні технології ведення буровибухових робіт та безпека застосування гранульованих і емульсійних речовин. Їх економічна ефективність і техногенна безпека*: XIII Всеукраїнська науково-технічна конференція, Кременчук-Свялява, 11-12 жовтня 2016 р. КНУ ім. М. Остроградського, 2016. С. 34-37, (очна участь).

31. Минеев С.П., Кочерга В.Н., Янжула А.С. Основные закономерности метановыделения при высоких скоростях подвигания забоя. *Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі*: міжнародна науково-технічна конференція. Кривий Ріг, 14 грудня 2016 р. С. 168, (очна участь).

32. Минеев С.П., Филип В.А., Янжула А.С., Шиповский И.Е. Развитие концепции энергонасыщенного материала для моделирования выбросоопасности углепородного массива. *Деформування і руйнування матеріалів з дефектами і динамічні явища в гірських породах і сировоках*: матеріали XXVI міжнар. наук. школи ім. академіка С.А.Хрїтіановича. Алушта, 19-25 вересня 2016 р. Сімферопіль: ТНУ ім. В.І. Вернадського, 2016. С. 143-146 (заочна участь).

33. Минеев С.П., Кочерга В.Н., Янжула А.С. Методология прогноза импульсных метановыделений в забой очистных выработок. *Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі*: II міжнародна науково-технічна конференція. – Кривий Ріг, 14 грудня 2017 р. ДВНЗ «КНУ», 2017. С.196, (заочна участь).

34. Усов О.А., Минеев С.П., Дякун Р.А., Поляков Ю.А., Янжула А.С., Рудь В.П. Лабораторные исследования двумерной фильтрации воды через угольные образцы. *Форум гірників - 2017*: матеріали міжнар. конф., м. Дніпро, 04-07 жовтня 2017 р. НГУ, 2017. С. 298-307, (очна участь).

Публікації в інших виданнях

35. Минеев С.П., Кочерга В.Н., Янжула А.С. Закономерности метановыделения при высоких скоростях подвигания очистного забоя. *Вугілля України*, 2015. №7-8. С. 26-31.

36. Кожушок О.Д., Янжула А.С., Кирьяков М.А. Решение проблем вентиляции угольной шахты в условиях нештатной ситуации. *Вугілля України*, 2015. №11. С.20-26.

37. Минеев С.П., Кочерга В.Н., Янжула А.С. Оценка импульсного метановыделения в зонах геологических нарушений при обрушении кровли. *Вугілля України*, 2016. №1. С. 11-18.

38. Минеев С.П., Кочерга В.Н., Янжула А.С., Гулай А.А. Основные параметры прогноза импульсных метановыделений в зонах геологических нарушений. *Вугілля України*, 2016. №3. С. 25-32.

39. Минеев С.П., Кочерга В.Н., Янжула А.С., Гулай А.А., Кишкань М.А. Оценка эффективности мероприятий по предотвращению загазования горных выработок при посадке пород кровли. *Вугілля України*, 2016. № 8. С. 18-31.

Особистий внесок автора в роботи, опубліковані в співавторстві: 1 – розроблення експериментальних основ прогнозу газоносності вугільних пластів; 2, 10 – збирання інформації та складання бази даних; 3, 4, 5, 19 – аналіз даних, та визначення зон підвищеної тріщинуватості; 6, 8, 9, 12 – збирання даних на ділянці, оброблення та інтерпретація; 7, 13 – прогнозування зон скупчення метану; 11, 14-18, 27-31, 33, 34 – обґрунтування та розрахунки показників; 32 – моделювання викидонебезпечності; 19-22 – прогнозування ефективності способу; 23-26, 35-39 – обґрунтування параметрів способу.

АНОТАЦІЯ

Янжула О.С. Обґрунтування параметрів ведення очисних робіт поблизу геологічних порушень, схильних до раптових виділень метану. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.09 – «Геотехнічна і гірничая механіка». – Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України. – Дніпро, 2020.

В дисертації встановлені закономірності фільтраційного процесу метану у вугільному пласті, що вміщує порушену зону, насичену вільним та адсорбованим метаном з урахуванням міжмолекулярних взаємодій в системі «метан-вугілля» у взаємозв'язку з конформаційними перебудовами в мікроструктурі вугілля і з енергією активації розвитку десорбційних процесів у вугіллі при переміщенні очисного вибою поблизу зон геологічних порушень, реалізація яких дозволила розробити способи безпечного ведення гірничих робіт у зонах геологічних порушень, схильних до раптових виділень метану в забій виробки, що дозволило підвищити безпеку ведення гірничих робіт.

Результати досліджень ввійшли до «Рекомендацій по прогнозу небезпеки імпульсних загазувань гірничих виробок при відході очисного вибою від зони геологічного порушення», «Рекомендацій по запобіганню імпульсних загазувань гірничих виробок при відході очисного вибою від зони геологічного порушення» та передані для використання до шахтного управління «Покровське».

Ключові слова: гірничі виробки, геологічні порушення, вільний та адсорбований метан, фільтрація, десорбція, виділення газу, очисний вибій, небезпечні зони.

АННОТАЦИЯ

Янжула А.С. Обоснование параметров ведения очисных работ вблизи геологических нарушений, склонных к внезапным выделениям метана. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.15.09 – «Геотехническая и горная механика». – Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины. – Днепро, 2020.

В диссертации установлены закономерности фильтрационного процесса метана в угольном пласте, что вмещает нарушенную зону, насыщенную свободным и адсорбированным метаном с учетом межмолекулярных взаимодействий в системе «метан-уголь» во взаимосвязи с конформационными перестройками в микроструктуре угля и с энергией активации развития десорбционных процессов в угле при перемещении очистного забоя вблизи зон геологических нарушений, реализация которых позволила разработать способы безопасного ведения горных работ в зонах геологических нарушений, склонных к внезапным выделениям метана в забой выработки, что позволило повысить безопасность ведения горных работ.

Результаты исследований вошли в «Рекомендации по безопасному отходу очистного забоя от монтажного ходка с пересечением «аэрогазодинамически опасных зон», «Рекомендации по прогнозу опасности импульсных загазирования горных выработок при отходе очистного забоя от зоны геологического нарушения», «Рекомендации по предотвращению импульсных загазирования горных выработок при отходе очистного забоя от зоны геологического нарушения» и переданы для использования в шахтное управление «Покровское».

Ключевые слова: горные выработки, геологические нарушения, свободный и адсорбированный метан, фильтрация, десорбция, выделение газа, очистной забой, опасные зоны.

THE SUMMARY

Yanzhula O.S. Substantiation of the parameters of coal face operations near faults, prone to sudden release of methane. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of a Candidate of Technical Sciences in specialty 05.15.09 – “Geotechnical and mining mechanics” – Institute of Geotechnical Mechanics named by M.S. Polyakov, National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2020.

Regularities of the filtration process of methane in a coal seam that comfortably accommodates the faulted zone, which saturated free and adsorbed methane with regard to intermolecular interactions in the system of “methane-coal” in conjunction with conformational rearrangements in the microstructure of coal and with the activation energy of the development of desorption processes in the coal when moving stope in close proximity to zones of geologic violations were established in the dissertation. The implementation of these regularities has allowed us to develop methods of safe conducting mountain works in zones of geological faults, which are prone to sudden release of methane in the stope workings, thus improving the safety of mining operations.

The results of the studies were included in the "Recommendations for prediction of danger of gas-lading impulse in mining with waste stope from the geological fault zone", "Recommendations for prevent the gas-lading impulse in workings with waste stope from the geological fault zone" and were handed over for use in the Mine Management "Pokrovskoe".

Key words: workings, geological faults, free and adsorbed methane, filtration, desorption, release of gas, the stope, the danger zones.

Янжула Олексій Сергійович

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВЕДЕННЯ ОЧИСНИХ РОБІТ ПОБЛИЗУ
ГЕОЛОГІЧНИХ ПОРУШЕНЬ,
СХИЛЬНИХ ДО РАПТОВИХ ВИДІЛЕНЬ МЕТАНУ**

(Автореферат)

Регістр

Підписано до друку 08.11.2020 р.
Гарнітура Times. Друк ізографічний.
Папір офсетний. 0,9 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, 21

К