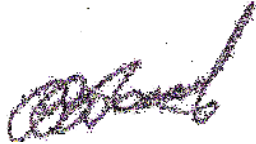


Національна академія наук України  
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова

ЗБЕРОВСЬКИЙ ВАСИЛЬ ВЛАДИСЛАВОВИЧ



УДК [622.831.325:532.528](043.5)

РОЗВИТОК НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ОСНОВ ГІДРОІМПУЛЬСНОЇ ДІЇ  
НА ВИКИДОНЕБЕЗПЕЧНІ ВУГІЛЬНІ ПЛАСТИ

05.15.02 – «Підземна розробка родовищ корисних копалин»

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дніпро – 2019

Дисертацією є рукопис

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

Науковий консультант доктор технічних наук, професор  
**Софійський Костянтин Костянтинович**,  
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова  
НАН України, завідувач відділу (м. Дніпро);

Офіційні  
опоненти:

доктор технічних наук, професор  
**Бондаренко Володимир Ілліч**,  
Національний технічний університет «Дніпровська  
політехніка» МОН України, завідувач кафедри підземної  
розробки родовищ;

доктор технічних наук, професор  
**Окаєлов Василь Миколайович**  
Донбаський державний технічний університет МОН  
України, завідувач кафедри гірництва;

доктор технічних наук  
**Васильковський Всеволод Олексійович**  
Інститут фізики гірничих процесів НАН України,  
завідувач відділу фізики вугілля і гірських порід

Захист відбудеться «22» березня 2019 р. о 13-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.188.01 при Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України за адресою: вул. Сімферопольська, 2а, м. Дніпро, 49005, тел. / факс (0562) 46-24-26.

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

Автореферат розісланий «19» лютого 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук, професор



В.Г. Шевченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Дослідження небезпечних і шкідливих явищ, що виникають при веденні гірничих робіт на викидонебезпечних вугільних пластах, розробка нових способів запобігання ГДЯ, а також методів їх контролю і оцінки ефективності, відносяться до найбільш складних проблем вугільної галузі України. На великих глибинах під впливом техногенних чинників в геологічній товщі гірських порід відбуваються трансформаційні процеси, що призводять до структурних перетворень викидонебезпечного вугілля і формування нової системи вугілля-газ.

Найбільш складні умови створюються в зонах підвищеного тиску і при проведенні виробок на незахищених вугільних пластах, де при виїмці вугілля відбувається спонтанне саморуйнування пласта. Використання нормативних способів запобігання раптових викидів вугілля і газу не завжди забезпечує безпеку гірничих робіт. Випадки ГДЯ з катастрофічними наслідками відбуваються до теперішнього часу. Тому в небезпечних зонах застосовують струсне підривання, що призводить до збільшення витрат та часу видобутку вугілля і зниження швидкості проведення виробок з 6 до 2 метрів на добу.

Явище газодинамічного саморуйнування і реакція викидонебезпечного вугільного пласта на його динамічне навантаження постійно досліджуються, але з деяких питань носять дискусійний характер. Підхід до зміни стану вуглегазового пласта з позиції взаємодії твердої і газоподібної складових системи вугілля-газ дозволив вирішити ряд науково-практичних задач. Наприклад, явище газодинамічного саморуйнування ефективно використовується при гідродинамічній дії через свердловини, а при гідророзпушуванні пластів найефективнішим є використання імпульсного нагнітання рідини в режимі періодично-зривної кавітації.

Експериментальні дослідження кавітаційних генераторів дозволили розробити пристрій для гідроімпульсної дії, що підтвердило можливість розробки малоенергоємних, безпечних і екологічно чистих технологій зниження викидонебезпечності вугільних пластів. Разом з тим, аналіз відомих технічних рішень показує, що підвищення інтенсифікації гірничих робіт і ефективності способів запобігання ГДЯ неможливе без урахування закономірностей процесів перетворення в системі вугілля-газ, що виникають під впливом техногенних чинників.

До теперішнього часу вплив техногенних чинників на ініціювання процесу саморуйнування і газовиділення вивчено недостатньо. Малодосліджені процеси зміни стану системи вугілля-газ під проявом деформацій зсуву в геологічній товщі і попереду вибою підготовчої виробки, зміни напружено-деформованого стану викидонебезпечного пласта при його гідророзпушуванні. Відсутня методологія розрахунку параметрів і методів контролю гідроімпульсної дії, не розроблено спосіб і технологічні схеми гідроімпульсного розпушування викидонебезпечних вугільних пластів.

Вирішення цих питань неможливо без вивчення складових системи вугілля-газ і зміни її стану під впливом техногенних чинників, розробки

методології дослідження процесу кавітаційної течії рідини, розрахунку параметрів нагнітання і їх контролю при гідроімпульсному розпушуванні вугільних пластів. Тому, розвиток науково-технічних основ гідроімпульсної дії на викидонебезпечні вугільні пласти з урахуванням закономірностей зміни стану викидонебезпечного вугілля під проявом деформаційних процесів і додаткового навантаження від імпульсного нагнітання рідини та розробка способу гідроімпульсного розпушування викидонебезпечного пласта і керування його станом є **актуальною науковою проблемою** в області підземного видобутку вугілля, що має важливе значення для створення нових екологічно чистих технологій інтенсифікації гірничих робіт.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в рамках держбюджетних тем Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України: №3 «Теоретичні основи зсуву масиву гірничих порід і управління деформаційними процесами при підземній виїмці вугілля» (РК 0103U004307), № III-36-07 «Техніко-технологічне рішення інтенсифікації газовиділення і зниження пилоутворення гідроімпульсною дією на газонасичені пласти при підземному видобутку вугілля» (РК 0107U002004) і № III-63-12 «Обґрунтування методів розрахунку параметрів пристрою гідроімпульсної дії на вугільні пласти (ГР 0112U000493), а також 7 тем за господарською тематикою з ПАТ «Краснодонвугілля», в яких автор був відповідальним виконавцем.

**Ідея роботи** полягає у використанні встановлених закономірностей гідроімпульсної дії на викидонебезпечні вугільні пласти для забезпечення керування станом системи вугілля-газ та створення безпечних умов праці у вибоях підготовчих виробок.

**Мета роботи** – розвиток науково-технічних основ гідроімпульсної дії та розробка способу гідроімпульсного розпушування викидонебезпечних вугільних пластів для підвищення швидкості проведення виробок і створення безпечних умов праці.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні **задачі**:

- встановити закономірності зміни стану системи вугілля-газ у викидонебезпечному вугіллі під впливом техногенних чинників;
- розробити методи і методики досліджень параметрів гідроімпульсної дії, встановити робочі режими нагнітання і активну стадію процесу;
- виконати обґрунтування параметрів та встановити закономірності процесу гідроімпульсної дії на вугільні пласти відповідно глибини їх залягання;
- провести гірничо-експериментальні дослідження, встановити параметри і критерії контролю процесу гідроімпульсного розпушування вугільних пластів в умовах шахт ПАТ «Краснодонвугілля»;
- виконати оцінку зміни стану викидонебезпечності вугільних пластів, встановити безпечну зону виїмки вугілля і розробити параметри способу;
- розробити технологічні схеми і провести промислові випробування способу гідроімпульсного розпушування викидонебезпечних вугільних пластів, оцінити економічну ефективність і перспективу розвитку досліджень.

**Об'єкт досліджень** – процеси зміни стану системи вугілля-газ в техногенно-порушеному вуглепородному масиві, перерозподілу напружень і кавітаційної течії рідини при її високонапірному нагнітанні у вугільний пласт.

**Предмет досліджень** – закономірності зміни стану викидонебезпечного вугілля та параметрів динамічного навантаження вуглепородного масиву і методи їх контролю при гідроімпульсній дії на викидонебезпечні вугільні пласти.

**Методи досліджень.** В дисертаційній роботі використовувався комплекс наукових методів досліджень, що включав: аналіз теоретичних і експериментальних досліджень, які базуються на гіпотезах, теоріях і формах знаходження газу в вугіллі, умовах і чинниках порушення природної рівноваги системи вугілля-газ, граничного стану крайової частини викидонебезпечних вугільних пластів і зсуву гірських порід; аналіз передових досягнень науки і техніки з питань досліджень гідророзпушування вугільних пластів – при формулюванні наукової проблеми; експериментальні дослідження явища періодично-зривної кавітації – при моделюванні процесу імпульсного нагнітання рідини; аналітично-розрахункові методи – для вдосконалення інженерного методу розрахунку динамічних параметрів і характеристик автоколивань тиску рідини, які створюються пристроєм гідроімпульсної дії; статистичний аналіз із застосуванням сучасної електронно-обчислювальної техніки при обробці результатів лабораторних і гірничо-експериментальних досліджень, що базуються на методах механіки суцільних середовищ, фільтрації рідини і газу, чисельного моделювання з використанням методу кінцевих елементів.

**Основні наукові положення і результати**, які виносяться на захист.

1. Гідроімпульсне розпушування викидонебезпечного вугільного пласта через свердловину діаметром 42...46 мм, глибиною буріння 6...8 метрів під тиском нагнітання рідини від 10 до 23 МПа, який лінійно залежить від глибини герметизації свердловини, призводить до прояву прогнозованих складних взаємопов'язаних послідовно виникаючих в масиві процесів, що включають зміну напружено-деформованого стану крайової частини пласта і його дегазацію внаслідок тріщиноутворення та інтенсивної фільтрації метану, які дозволяють попереду вибою завчасно, до глибини буріння свердловин, створити безпечну зону і збільшити швидкість проведення виробки в 2-3 рази.

2. Тиск нагнітання рідини при гідроімпульсній дії лінійно залежить від глибини залягання пласта і для глибин від 600 до 1300 метрів складає від 8 МПа до 23 МПа, при цьому в режимі нагнітання рідини з тиском до 15 МПа при роботі кавітаційного генератора виникають періоди зародження, стійкої і затухаючої кавітації, а при тиску більше ніж 15 МПа кавітаційним генератором реалізується стійкий режим гідродинамічних автоколивань з початковим розмахом  $\approx 5,0$  МПа і частотою  $\approx 1,0$  кГц, в якому зміна тиску підпору рідини до 0,82 тиску нагнітання призводить до автономної роботи генератора.

3. Керування станом системи вугілля-газ в крайовій частині викидонебезпечного вугільного пласта забезпечується зміною тиску автоколивань рідини, які лінійно залежать від тиску підпору рідини в

свердловині, а тиск нагнітання лінійно залежить від максимальних значень розмаху автоколивань, при цьому зміна тиску підпору рідини в свердловині призводить до розвитку активної стадії гідророзпушування, завершення якої є критерієм контролю ефективності гідроімпульсної дії.

4. Розвиток деформаційних процесів і зміна опорного гірського тиску в геологічній товщі при надробленні та підробленні викидонебезпечних пластів в умовах великих глибин відбувається під впливом деформацій зсуву за логарифмічними залежностями прояву граничних кутів деформацій  $\delta_0$  і кутів розриву порід  $\delta''$  від відстані між пластами і дозволяє встановити у часі і просторі межі, в яких формуються умови трансформації викидонебезпечного вугілля і зміна стану системи вугілля-газ.

**Наукова новизна роботи** полягає в наступному:

1. Вперше в практиці гідророзпушування викидонебезпечних вугільних пластів тиск нагнітання визначено з урахуванням тиску гідровіджиму пласта в залежності від глибини буріння і герметизації свердловини, що дозволило встановити граничне значення тиску нагнітання рідини в свердловину при гідроімпульсній дії;

2. Вперше обґрунтовано і експериментально підтверджено механізм переведення викидонебезпечного вугільного пласта у безпечний стан під впливом гідроімпульсної дії, при якій навколо фільтраційної частині свердловини у вугільному пласті виникає високочастотна гідроімпульсна вібрація, яка призводить до складних взаємопов'язаних процесів зміни напружено-деформованого стану пласта, розвитку різнопохилого тріщиноутворення і інтенсивної фільтрації метану, що дозволяє внаслідок дегазації і зміни властивостей вугілля попереду вибою завчасно, до глибини буріння свердловин, створити безпечну зону і збільшити швидкість проведення виробки в 2-3 рази;

3. Вперше експериментально встановлено, що при зміні тиску нагнітання періодично-зривна течія рідини, що виникає в кавітаційному генераторі, має початкову, стійку і затухаючу стадії і реалізується в фільтраційній частині свердловини у вигляді високочастотної гідроімпульсної вібрації, що дозволило встановити межі робочих діапазонів режимів гідроімпульсній дії в залежності від глибини залягання викидонебезпечних вугільних пластів;

4. Вперше в межах робочих діапазонів режимів імпульсного нагнітання рідини встановлена активна стадія гідроімпульсного розпушування пластів, яка характеризується закономірностями зміни максимальних значень розмаху автоколивань тиску від тиску гідроопору вугілля, що дозволяє контролювати процес гідророзпушування за амплітудно-частотним спектром звукового супроводу роботи генератора і процесу тріщиноутворення;

5. Вперше графоаналітичним методом встановлені граничні кути прояву деформацій і кути розриву порід (розвитку максимальних деформацій) при зміні опорного гірського тиску під впливом гірничих робіт, які відповідають стадіям зародження та завершення деформаційних процесів в геологічній товщі на пластах, що підроблюються або надроблюються, і описуються логарифмічними рівняннями та дозволяють встановити у часі і просторі



техногенні зони, в яких формуються умови трансформації викидонебезпечного вугілля.

**Обґрунтованість і достовірність** наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується: коректністю поставлених завдань, які базуються на сучасних уявленнях щодо стану газонасиченого вуглепородного масиву та вугільного пласта, теоріях зсуву підробленого масиву і гідродинаміки, великим об'ємом експериментальних даних з обробкою і аналізом результатів досліджень на ПЕОМ, відносною погрішністю експериментальних і теоретичних даних не більше 20%, результатами гірничо-експериментальних робіт при гідророзпушуванні викидонебезпечних вугільних пластів з підтвердженням їх адекватності нормативними методами контролю у вибоях підготовчих виробок.

**Наукове значення роботи** полягає у встановленні закономірностей зміни стану вугільної речовини під проявом деформаційних процесів в геологічній товщі і додаткового навантаження викидонебезпечного пласта попереду вибою підготовчої виробки шляхом зміни динамічних параметрів імпульсного нагнітання рідини в залежності від тиску гідроопору вугілля, зміни гідравлічних параметрів режимів нагнітання рідини від глибини розробки вугільного пласта, що дозволило обґрунтувати параметри і розробити спосіб гідроімпульсного розпушування викидонебезпечних вугільних пластів з метою керування станом системи вугілля-газ та створення безпечних умов праці у вибоях підготовчих виробок.

**Практичне значення** одержаних результатів.

1. Розроблено методологію розрахунку параметрів і контролю гідроімпульсної дії, у якій розглянута:

- методика розрахунку динамічних параметрів пристрою гідроімпульсної дії на викидонебезпечні вугільні пласти;
- методика визначення кутів зовнішнього і внутрішнього тертя вугілля викидонебезпечних пластів ПАТ «Краснодонвугілля»;
- методика розрахунку параметрів кавітаційного генератора;
- методика розрахунку параметрів зв'язаних процесів зміни стану двофазної фільтрації води і метану при нагнітанні рідини у вугільний пласт;

2. Розроблено методику проведення гірничо-експериментальних робіт гідроімпульсної дії на вугільні пласти при проведенні підготовчих виробок;

3. Розроблено Технічне завдання на розробку стандарту СГУ-П «Правила ведення гідроімпульсного розпушування викидонебезпечних вугільних пластів при проведенні виробок комбайнами»;

4. Розроблена програма і методика приймальних випробувань способу гідроімпульсного розпушування викидонебезпечних вугільних пластів при проведенні виробок комбайнами в умовах ПАТ «Краснодонвугілля»;

5. Розроблений спосіб гідроімпульсного розпушування викидонебезпечних вугільних пластів у вибоях підготовчих виробок;

6. Розроблена методика і виконані приймальні (промислові) випробування способу гідроімпульсного розпушування викидонебезпечних

вугільних пластів крутого падіння при буропідривному способі проведення виробок.

**Реалізація результатів роботи.** Результати дисертаційної роботи використані при розробці:

- проектів проведення заходів по створенню безпечних умов праці за пиловим і газовим факторами гідророзпушуванням вугільного масиву в умовах пластів  $k_2$  та  $k_2+k_2^B$  ОП «Шахта Дуванна» ПАТ «Краснодонвугілля» («Акт впровадження ...» від 30 жовтня 2008 р);

- доповнень до «Технологічної проектної документації ...» при проведенні підготовчих виробок комбайнами в умовах пласта  $i_3^1$  СП «Шахтоуправління «Суходільське-Східне» ПАТ «Краснодонвугілля» («Акт впровадження ...» від 25 квітня 2012 р);

- доповнень до «Технологічної проектної документації ...» при проведенні підготовчих виробок комбайнами в умовах пластів  $k_2^H$  та  $i_3^1$  СП «Шахтоуправління «Молодогвардійське» ПАТ «Краснодонвугілля» («Акт впровадження ...» від 17 серпня 2014 р);

- першої редакції стандарту СГУ-П «Правила ведення гідроімпульсного розпушування викиднебезпечних вугільних пластів при проведенні виробок комбайнами в умовах ПАТ «Краснодонвугілля» («Програма і методика випробувань способу ...» затверджено: ПАТ «Краснодонвугілля» 16.10.2012 р, МакНДІ 03.10.2012 р, ІГТМ НАН України 27.09.2012 р).

Методики розрахунку параметрів гідроімпульсної дії, досліджень параметрів нагнітання і властивостей викиднебезпечного вугілля передані на кафедри «Аерології та охорони праці» і «Підземної розробки родовищ» ДВНЗ «Національний гірничий університет» («Довідка про використання наукових розробок ...» від 24.05.2018 р).

Очікуваний економічний ефект від використання гідроімпульсної дії в умовах шахт ПАТ «Краснодонвугілля» складає 1,3 млн. грн. в рік на один комбайн («Розрахунок економічної ефективності ...» від 14.08.2014 р).

**Апробація роботи.** Основні положення і результати досліджень доповідалися, обговорювалися та одержали схвалення на засіданнях: бюро Центральної комісії з питань вентиляції, дегазації і боротьби з ГДЯ в шахтах вугільної промисловості України (м. Макіївка, Протокол №39 від 27.12.2006 р., Протокол №42 від 28.02.2008 р., Протокол №46 від 19.05.2009 р., Протокол №50 від 22.12.2010 р., Протокол №52 від 10.07.2012 р.); на засіданнях наукових конференцій і симпозіумах: «Неделя горняка» (м. Москва, 26-30.01.2004 р., 24-28.01.2011р.); «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (м. Москва, 21-23.10.2002 р., 15-19.11.2010 р., 19-23.11.2012 р.); «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках» (м. Сімферополь, 19-25.09.2005 р., 21-27.09.2009 р, 20-26.09. 2010 р., 19-25.09.2011 р., 23-29.2013 р.); «Форум гірників-2006» (м. Дніпропетровськ, 11-13.09.2006 р.); «Імпульсні процеси в механіці суцільних середовищ» (м. Миколаїв, 17-21.09. 2009 р.); «Дисперсні системи» (м. Одеса, 20-24.09.2010 р.); «Математичні проблеми технічної механіки» (м. Дніпропетровськ, 13-15.04. 2011 р.); Симпозіум по плануванню горных



работ и выбору оборудования MPES 2011. (м. Алмати, 12-14.10.2011 р.); «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (м. Тула, 1-2.11.2012 р.); «Тиждень еколога-2017» (м. Кам'янське, 10-13.04.2017 р.); «Школа підземної розробки» (м. Бердянськ, 4-8.09.2018 р.).

**Особистий внесок автора** полягає у формулюванні наукової проблеми, мети, ідеї, задач досліджень, наукових положень, новизни і висновків; у встановленні закономірності формування зон трансформації системи вугілля-газ у викидонебезпечних пластах, що підроблюються та надроблюються; розробці методології розрахунку параметрів і контролю гідроімпульсної дії; рекомендації щодо впровадження нових технічних рішень з підвищення безпеки робіт на викидонебезпечних вугільних пластах шляхом використання гідроімпульсної дії, лабораторні і гірничо-експериментальні дослідження виконані під керівництвом автора за сприянням співробітників ІГТМ НАН України, ТНУ МОН України, МакНДІ, ДонНДІ і технічного персоналу шахт ПАТ «Краснодонвугілля».

Зміст дисертації викладений автором особисто.

**Публікації.** Основні наукові положення та результати дисертації опубліковані в 42 наукових працях, з них: 2 – монографії; 29 – у спеціалізованих фахових виданнях (6 з яких входять до наукометричних баз та надруковані у іноземних журналах), 7 – у збірниках наукових праць та доповідей на міжнародних конференціях, 4 патенти України, 12 робіт без співавторів.

**Структура і об'єм дисертації.** Дисертація складається із анотації, вступу, 6 розділів, висновків і списку використаних джерел з 234 найменувань на 35 стор., містить 385 сторінок машинописного тексту, включає 57 таблиць та 177 рисунків, з яких 59 на окремих сторінках (основна частина 291 сторінка), а також 7 додатків на 91 сторінці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *першому розділі* приведені відомості про дослідження існуючих і розробку нових способів запобігання газодинамічних явищ, а також взаємодії вугілля і газу. Виконано комплексний аналіз результатів досліджень: структурно-текстурної будови, складу і технологічних властивостей вугілля; поверхні вугілля, як межі розділу середовищ; стану системи вугілля-газ в тріщино-пористій структурі вугілля і як твердого вуглецевого розчину; способів і засобів підвищення безпеки ведення гірничих робіт на викидонебезпечних пластах.

Відмічено, що значний внесок в ці дослідження зробили вчені Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Національного гірничого університету МОН України, Державного Макіївського науково-дослідного інституту з безпеки робіт у гірничій промисловості Міністерства енергетики та вугільна України, Інституту фізики гірничих процесів НАН України, Донецького державного науково-дослідного вугільного інституту,

Донецького національного технічного університету МОН України, Українського науково-дослідного і проектно-конструкторського інституту гірничої геології, геомеханіки і маркшейдерської справи НАН України, Інституту гірничої справи ім. О.О. Скочинського, Інституту проблем комплексного освоєння надр РАН та інші.

Встановлено, що відомі гіпотези і уявлення про систему вугілля-газ не дозволяють пояснити і обґрунтувати об'єми газовиділення при саморуйнуванні вугілля, які призводять до катастрофічних наслідків. Відзначено, що найскладніше проблема газодинамічного чинника розв'язується на нерозвантажених гірничими роботами викидонебезпечних пластах, де найбільш ефективним для підвищення безпеки ведення гірничих робіт є імпульсне нагнітання рідини.

Аналіз досліджень стану системи вугілля-газ і взаємодії її складових, свідчить, що до теперішнього часу проблема забезпечення безпечного ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ, вивчена недостатньо. Як і раніше не досліджені: процеси формування системи вугілля-газ, недостатньо вивченими залишаються процеси саморуйнування вугільних пластів, зміна стану викидонебезпечного вугілля під проявом деформацій зсуву в геологічній товщі і попереду вибою підготовчої виробки при його гідророзпушуванні, не вивчено вплив додаткового навантаження вугільного пласта від зміни динамічних параметрів гідроімпульсної дії і зміни гідравлічних параметрів режимів імпульсного нагнітання рідини від глибини розробки вугільного пласта. Немає обґрунтування параметрів способу гідроімпульсного розпушування і методів його контролю за оцінкою безпеки ведення гірничих робіт. Виходячи з цього сформульовані мета роботи, задачі і методи їх досліджень.

У другому розділі розглянута гіпотеза формування системи вугілля-газ, як природного вуглегазового середовища. На прикладі найбільш поширеного в Донецькому басейні пласта  $l_3$  і елементного вмісту у вугіллі вуглецю, водню і кисню розглянуто середньостатистичні структурні формули їх з'єднання різної стадії вуглефікації (табл. 1).

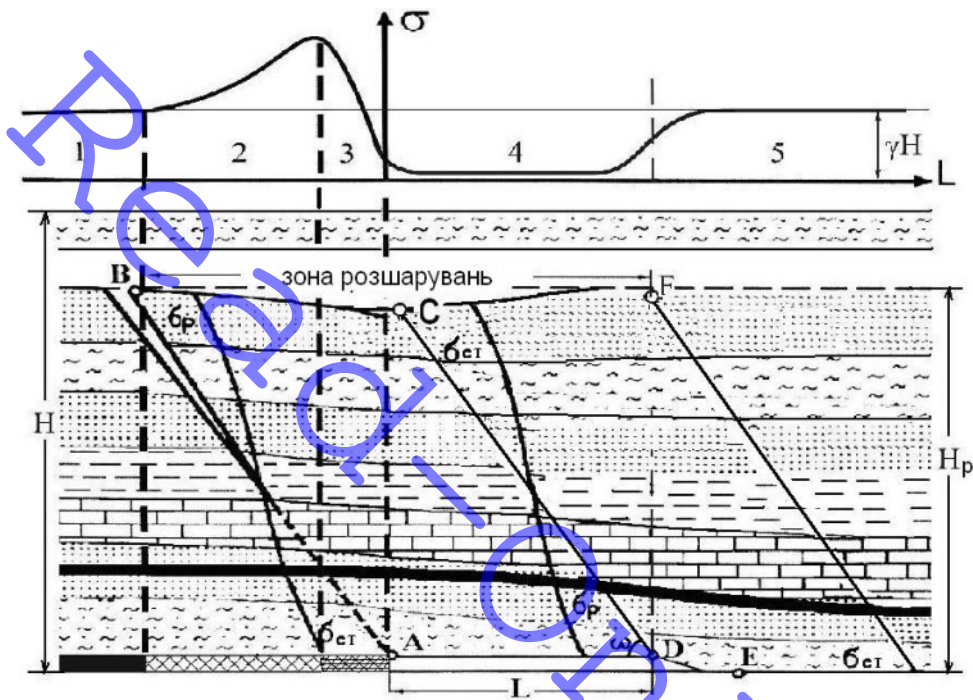
Таблиця 1 – Елементний склад вугілля різного марочного складу на прикладі пласта  $l_3$  Донецького басейну

Марочний склад вугілля	Елементний склад вугілля пласта $l_3$				
	Елементний склад, %			Формула і вага	
	$C^{daf}$	$H^{daf}$	$O^{daf}$	формула	молекулярна вага
Г	80,00	5,60	14,40	$C_{37}H_{31}O_5$	554,67
Ж	89,00	5,50	9,50	$C_{62}H_{46}O_5$	872,94
К	88,70	5,30	6,00	$C_{97}H_{69}O_5$	1314,66
Т	92,40	3,80	3,80	$C_{96}H_{47}O_3$	1248,43
А	95,0	2,0	3,0	$C_{52}H_{12}O$	620

По зміні молекулярної ваги складових вугілля розглянуто кроки його переходу від одного марочного складу до іншого. Переходи супроводжуються

зміною структури з відторгненням простих речовин у вигляді  $H_2O$ ,  $CH_4$  і  $CO_2$ . В хімічній будові надмолекулярної організації (НМО) це відображається збереженням подвійних зв'язків  $C=C$  вуглецю кристалічної частини макромолекули і розривом одинарних зв'язків вуглецю, водню и кисню в шарах бічних радикалів аморфних угруповань, з яких, при порушенні рівноваги енергетичних сил і зміні стану системи вугілля-газ, утворюються нові молекули води і метану. Відомо, що найбільш нестійкими до зовнішньої дії є вугілля марок К и Ж, структура НМО макромолекули яких розглядається як глобулярна.

Для представлення фізики процесу техногенних перетворень в системі вугілля-газ розглянуто чинники зовнішньої дії на вуглегазовий масив у взаємозв'язку з параметрами зсуву підробленого масиву гірничих порід (рис.1).



$\sigma_p$  – розтягуючі напруження;  $\sigma_{ct}$  – стискуючі напруження;  $L$  – довжина підробленого блоку гірських порід;  $H_p$  – відстань до зони розшарування;  $\omega$  – кут зсуву гірських порід; 1-5 зони зміни гірського тиску

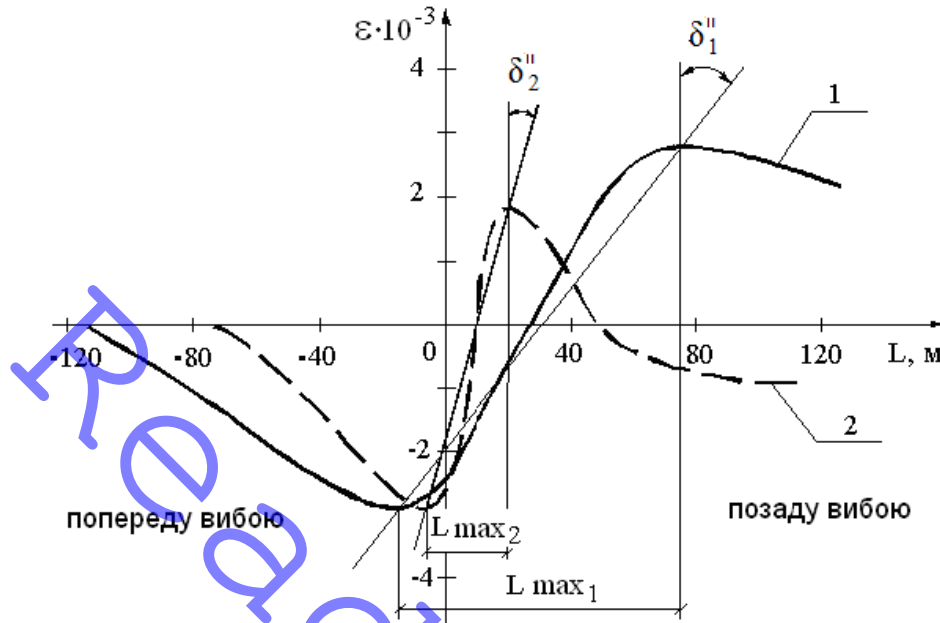
Рисунок 1 – Геомеханічна модель взаємозв'язку динамічної мульди зсуву і зони опорного гірського тиску

Одержані результати були використані при дослідженні впливу техногенних чинників на газодинамічний стан викидонебезпечних пластів.

За результатами досліджень Новичихина І.А., графоаналітичним методом встановлені граничні кути прояву деформацій  $\delta_0$  і кути нахилу кривої розвитку максимальних деформацій, які відповідають кутам розриву гірських порід  $\delta''$  (Рис.2). Це дозволило встановити, що по характеру прояву деформацій і зміні інтенсивності швидкості газовиділення можливо визначити не тільки межі зони розвантаження, а і лінії меж, що характеризують стадію зародження

деформацій і прояву максимальних напружень, по яких в геологічній товщі формуються блоки і відбувається зсув підробленого масиву.

В подальшому розглянуто, як зміна напружень, які виникають при веденні гірничих робіт в геологічній товщі, впливає на трансформацію системи вугілля-газ в підробленому та надробленому масиві.



1 – підроблення; 2 – надроблення;  $\varepsilon$  – деформації вугільного пласта;  
 $L_{\max}$  – відстань до точки прояву максимальних деформацій (довжина підробленого блоку гірських порід), м;  $\delta''$  – кут розриву гірських порід, град.

Рисунок 2 – Характер розвитку деформацій в пластах, що підроблюються і надроблюються

На рис. 3 і 4 приведені залежності, що характеризують зміну максимальних напружень в підробленому та надробленому масиві при зміні відстані між пластами.

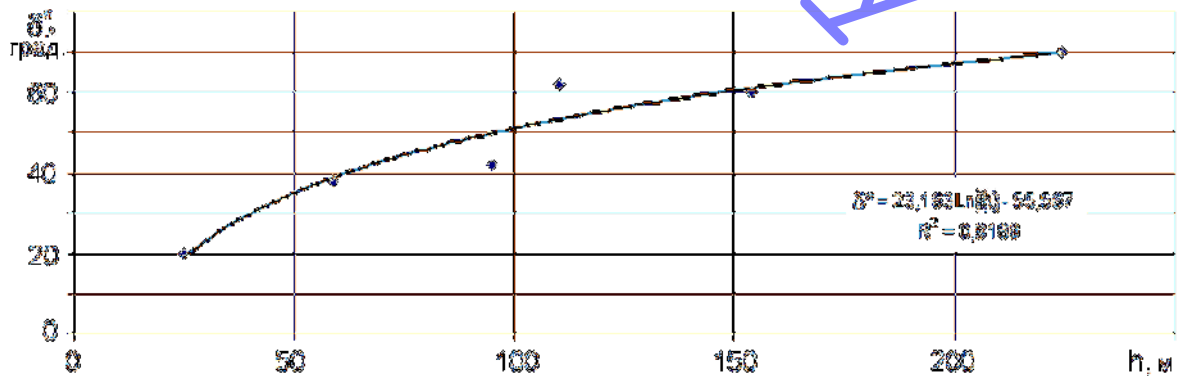


Рисунок 3 – Залежність зміни кута розриву гірських порід  $\delta''$  від відстані між пластами, яка характеризує зміну максимальних напружень в підробленому масиві

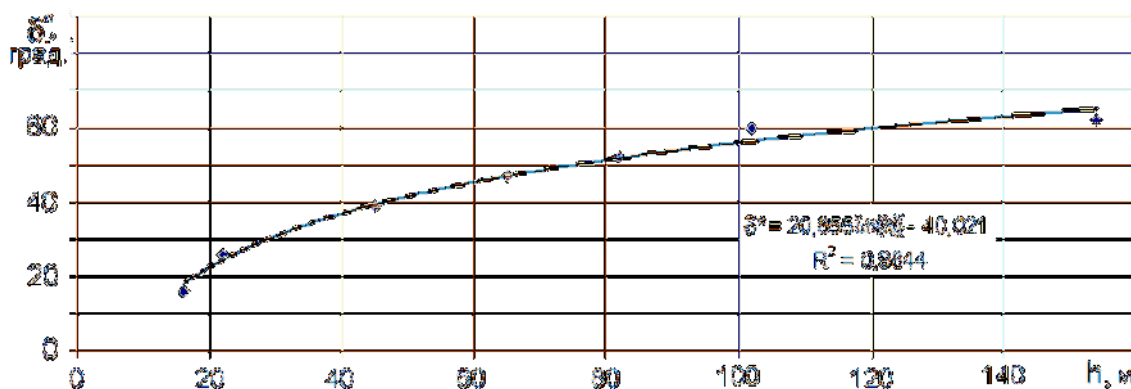


Рисунок 4 – Залежність зміни кута розриву гірських порід  $\delta''$  від відстані між пластами, яка характеризує зміну максимальних напружень в надробленому масиві

Встановлене дозволило відзначити, що інтенсивність процесів техногенного перетворення в системі вугілля-газ викидонебезпечних пластів взаємозв'язана з розвитком деформаційних процесів і описується логарифмічними кривими. Коефіцієнт детермінації  $R^2$  від 0,86 до 0,98 показує, що між параметрами зсуву і залягання вугільних пластів існує достатньо високий кореляційний зв'язок.

Вищевикладене дозволило встановити, що зміна стану системи вугілля-газ в геологічній товщі при надробленні та підробленні викидонебезпечних пластів відбувається під впливом деформацій зсуву за логарифмічними залежностями прояву граничних кутів деформацій  $\delta_0$  і кутів розриву порід  $\delta''$  від відстані між пластами, що дозволяє встановити у часі і просторі зони зміни опорного гірського тиску, в яких формуються умови трансформації викидонебезпечного вугілля.

У *третьому розділі* розглянуто стан крайової частини пласта під впливом техногенних чинників і нагнітання рідини, а також обґрунтування параметрів динамічного навантаження при гідророзпусуванні викидонебезпечних вугільних пластів відповідно глибини їх залягання (рис. 5).

З урахуванням висновку, що при прояві деформацій зсуву і зміні напружено-деформованого стану, макромолекула вугільної речовини при руйнуванні генерує молекули метану, виконано розрахунок тиску гідровіджиму, як критерію граничного стану крайової частини пласта при нагнітанні рідини. Модель розрахунку відрізняється від раніше запропонованих тим, що в ній окрім коефіцієнтів фільтрації і тертя враховується зміна напружено-деформованого стану і трансформація стану системи вугілля-газ.

В запропонованій моделі вперше тиск гідровіджиму розраховано відносно глибини герметизації свердловини і розглянуто як критерій стійкості системи вугілля-газ. Приклад результатів розрахунку тиску гідровіджиму для умов залягання пласта  $i_3^1$  гор. 915м СП «Суходільське-Східне» ПАТ «Краснодонвугілля» приведений на рис. 6.



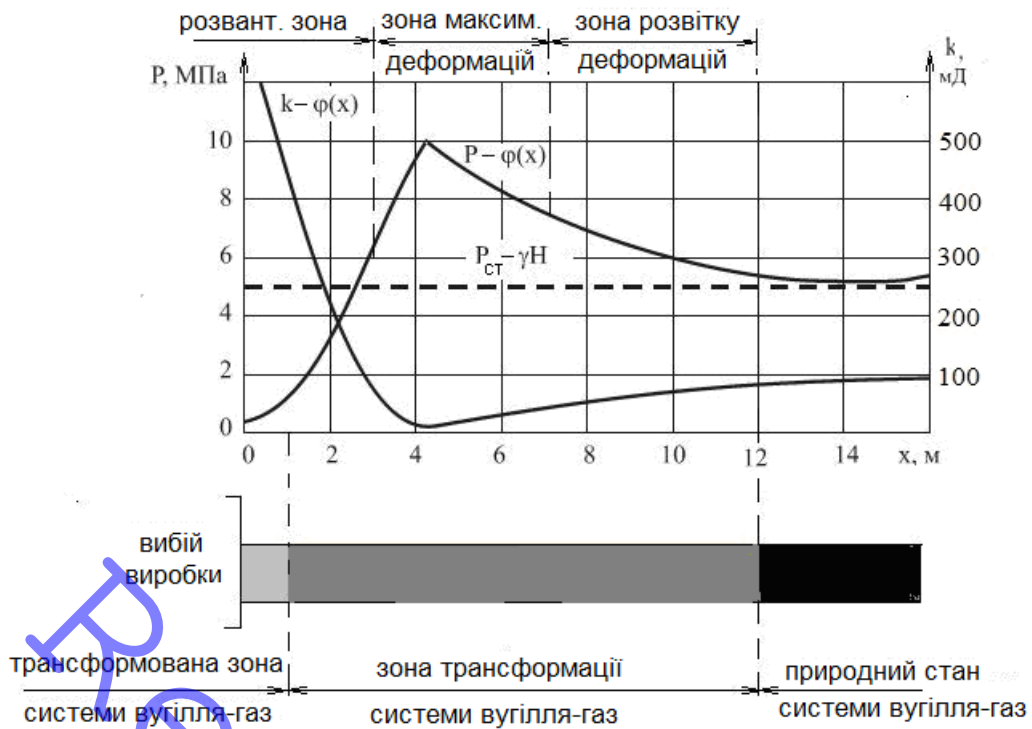
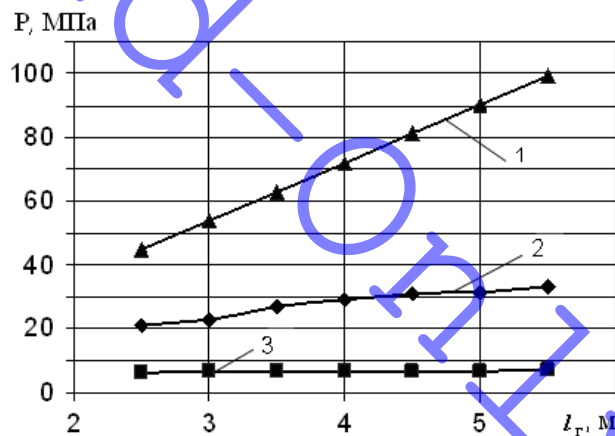


Рисунок 5 – Схема зон трансформації вугільного пласта і його фільтраційних властивостей під впливом техногенних чинників попереду вибою виробки



- 1 – розрахунок по нормативній методиці,  
 2 – розрахунок по розробленій моделі імпульсного нагнітання,  
 3 – по розрахунку високонапірного нагнітання рідини

Рисунок 6 – Зміна тиску гідровіджиму від глибини герметизації свердловин

Порівняльний аналіз результатів розрахунку з даними, що одержані в промислових умовах при гідровіджиму або проривах води при гідророзпушуванні, показав, що їм відповідають дані розрахунку тиску гідровіджиму по запропонованій моделі. При гідроімпульсній дії гідровіджим крайової частини пласта може відбутися якщо при заданій глибині герметизації свердловини (рис. 6, крива 2) тиск нагнітання перевище розрахункове значення (1).

$$P_H = 4,1 l_T + 11,5 \quad R^2 = 0,95 \quad (1)$$

Відомо, що міцність вугілля і його опір зсуву характеризується кутом або коефіцієнтом внутрішнього і зовнішнього тертя. Проте достатньо ясних уявлень і відомостей про ці параметри викидонебезпечного вугілля в науковій і довідковій літературі до даного часу немає. Враховуючи, що гідроімпульсна дія призводить до зміни міцнісних характеристик вугілля, з урахуванням результатів досліджень, виконаних проф. Васильєвим Л.М., була розроблена методика за їх визначенням. Зразки виготовлялися з проб вугілля викидонебезпечних пластів  $i_3^1$  і  $k_2^H$ , що розробляються на шахтах ПАТ «Краснодонвугілля».

На підставі експериментально встановлених значень навантаження зсуву  $F_{зс}$  і стискаючого навантаження  $F_{ст}$  встановлено, що розбіжність значень кутів внутрішнього тертя при навантаженні зсуву  $F_{зс}$  перпендикулярно і паралельно нашаруванню складає менше 1% і знаходиться в межах погрішності вимірювань. Наприклад, для досліджуваних зразків вугілля середньої пачки пласта  $k_2^H$ , коефіцієнти внутрішнього тертя  $\mu$  рівні 0,95 і 0,96, а кути внутрішнього тертя  $\rho$  відповідно 43,5 і 43,8 град. Одержані залежності характеризуються коефіцієнтом детермінації  $R^2=0,98\dots0,99$ .

Отримані результати дозволили встановити залежність опору вугілля зсуву від стискаючого навантаження (2).

$$F_{зс} = 1,14 F_{ст} + 41,42 \quad \text{при } R^2 = 0,98. \quad (2)$$

Тобто, зусилля ініціювання тріщин зсуву визначається незалежно від напрямку навантаження викидонебезпечного вугілля (рис. 7).

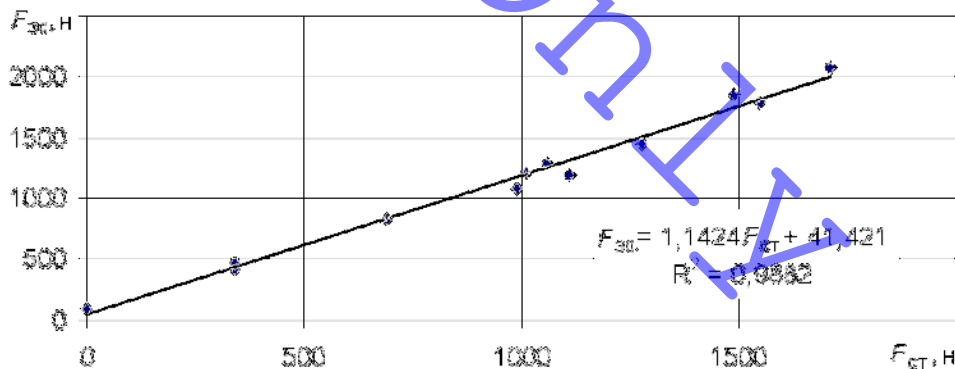


Рисунок 7 – Розрахункові залежності навантаження зсуву  $F_{зс}$  від стискаючого навантаження  $F_{ст}$

Отримані результати дозволяють відмітити, що зусилля ініціювання тріщин зсуву при навантаженні викидонебезпечних вугільних пластів в гірничо-геологічних умовах не залежить від напрямку стискаючого і руйнуючого навантаження, що додається.

Дослідженнями конструктивних параметрів кавітаційних генераторів імпульсів тиску рідини (ГК) встановлено, що в комплексі гірничого обладнання

для гідророзпушування викидонебезпечних вугільних пластів слід використовувати насосні установки УНР або УНІ з генератором ГК-2,5. При цьому необхідно враховувати, що при тиску нагнітання (1) максимальне значення розмаху автоколивань імпульсів тиску  $\Delta P_{\max}$  не повинне перевищувати  $0,75 \gamma H$ . Нижня межа тиску нагнітання повинна відповідати критерію ефективності гідророзпушування – зниженню тиску нагнітання не менше ніж на 30 % від максимально встановленого (Рис. 8). Отримані розрахунки дозволили встановити, що діапазон тиску імпульсного нагнітання складе  $0,52 \gamma H \leq P_H \leq 0,75 \gamma H$ , або для умов ведення гірничих робіт на глибинах від 600 до 1300 м –  $8 \leq P_H \leq 23$  МПа.

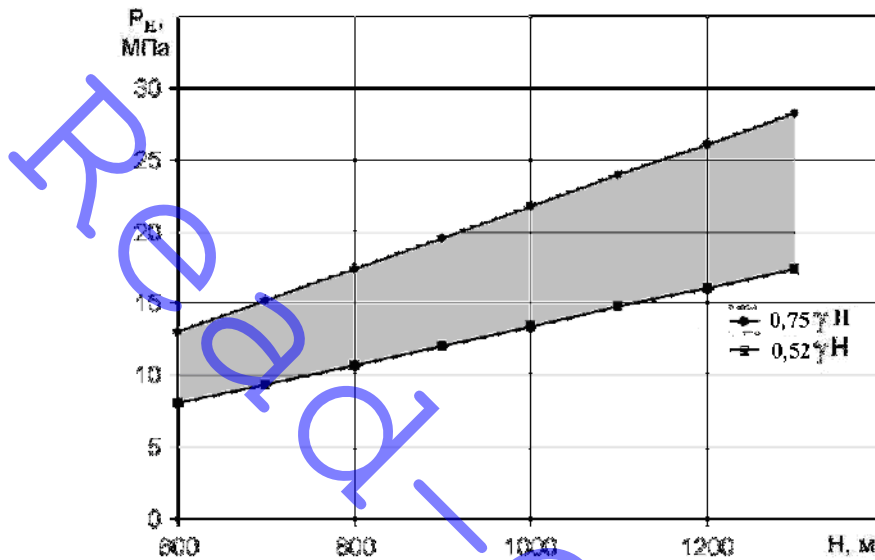


Рисунок 8 – Залежність діапазону тиску імпульсного нагнітання рідини від глибини залягання викидонебезпечних вугільних пластів ( $\gamma=2,65 \text{ Т/м}^3$ )

Для проведення досліджень параметрів динамічного навантаження у встановлених межах були розроблені: «Методика лабораторних досліджень параметрів пристрою гідроімпульсної дії на викидонебезпечні вугільні пласти»; «Методика моделювання процесу імпульсного нагнітання рідини»; «Методика інженерного розрахунку динамічних параметрів пристрою гідроімпульсної дії»; математична модель розрахунку гідродинамічних параметрів генератора і алгоритм розрахунку значень розмаху автоколивань тиску рідини, які в подальшому дозволили розробити методологію розрахунку параметрів і контролю гідроімпульсної дії.

Визначення значень динамічних параметрів генератора ГК-2,5 були виконані при проведенні досліджень його витратної характеристики при різних режимах нагнітання від  $P_H=5$  МПа до  $P_H=30$  МПа. Встановлено, що режим стійкої кавітаційної течії рідини за генератором припиняється при параметрі кавітації  $\tau = P_{\text{п}}/P_H = 0,82$  або  $P_{\text{п}} \leq 0,82 P_H$ .

Виходячи із цієї умови встановлено: залежність тиску нагнітання  $P_H$  від тиску підпору  $P_{\text{п}}$ ; діапазон робочої зони працездатності генератора ГК-2,5;

залежності розмаху і частоти автоколивань від тиску підпору рідини в свердловині (гідроопору вугілля). Отримані результати дозволили сформувати базу даних зміни динамічних параметрів гідроімпульсної дії і встановити, що відносна погрішність теоретичних і експериментальних даних не перевищує 20% для розмаху автоколивань і 10% для частоти їх проходження.

Для оцінки впливу параметрів нагнітання на динамічні параметри кавітаційній течії рідини, за допомогою чисельного диференціювання отриманих результатів, були визначені максимальні значення розмахів автоколивань  $\Delta P_{\max}$  і відповідні їм значення параметрів імпульсного навантаження (табл. 2), які характеризують активну стадію гідроімпульсної дії.

Таблиця 2 – Встановлені параметри нагнітання рідини при максимальних значеннях розмаху автоколивань тиску

$P_n$ , МПа	$Q$ , л/хв	$\Delta P_{\max}$ , МПа	$f$ , Гц	$P_n$ , МПа
5	28	10,89	1201	1,01
10	39	17,28	1516	1,68
20	55	26,36	1943	2,84
30	69	35,51	2227	3,9

Отримані результати дозволили встановити залежності розмаху і частоти автоколивань від тиску нагнітання, підпору і витрати рідини. Зміна максимальних значень розмаху автоколивань від тиску нагнітання (3) дозволяє обґрунтувати граничне значення максимального тиску нагнітання (4).

$$\Delta P_{\max} = 0,97 P_n + 6,8 \text{ при } R^2 = 0,996, \quad (3)$$

$$P_{n.\max.\text{роз.}} = 1,03 \Delta P_{\max} - 7,01. \quad (4)$$

Розрахункове значення тиску нагнітання (4) зіставляється з значенням, встановленим для глибини залягання вугільного пласта (1), і не повинне перевищувати його величину.

Таким чином, керування станом системи вугілля-газ в крайовій частині викидонебезпечного вугільного пласта забезпечується зміною тиску автоколивань рідини, які лінійно залежать від тиску підпору рідини в свердловині, а тиск нагнітання лінійно залежить від максимальних значень розмаху автоколивань, при цьому зміна тиску підпору рідини в свердловині призводить до розвитку активної стадії гідророзпушування, завершення якої є критерієм контролю ефективності гідроімпульсної дії.

Механізм передачі імпульсів тиску вугільному пласту в умовах великих глибин розглянуто з позиції зміни напруженого стану навколо свердловини і зводиться до статичної і динамічної крайовим задачам теорії пружності.

Відповідно до прийнятої моделі гідроімпульсної дії прийнято: вугільний масив є однорідним суцільним пружним середовищем; рух рідини відбувається

за рахунок необмеженої протяжності свердловини (процеси фільтрації не враховуються); на поверхні свердловини, гармонійно залежні від часу імпульси тиску визначаються технічними характеристиками генератора.

Тоді напруження навкруги свердловини, що знаходиться на глибині  $H$ , при імпульсному нагнітанні рідини визначаються сумою складових  $\epsilon^{(\gamma H)}$ , пов'язаних з гірським тиском і  $\epsilon^{(Hidro)}$ , породженої тиском рідини

$$\epsilon = \epsilon^{(\gamma H)} + \epsilon^{(Hidro)} \quad (5)$$

Напруження, викликані імпульсним нагнітанням, визначаються статичною  $p_{st}$  і динамічною  $p_{din}$  складовими:

$$p = p_{st} + p_{din}, \quad (6)$$

$$p_{st} = \bar{p} = (p_{max} + p_{min}) / 2, \quad p_{din} = 0.5 \Delta p \cos(\omega t), \quad \Delta p = p_{max} - p_{min}. \quad (7)$$

При представленні тиску рідини, що нагнітається, у вигляді (6), розрахунок виникаючих радіальних напружень зводиться до рішення двох крайових задач теорії пружності. Статична складова визначається рішенням Ламе

$$\sigma_{rr}^{(st)}(r) = \frac{a^2}{r^2} p_{st}, \quad (8)$$

а динамічна складова – рішенням задачі про гармонійне навантаження поверхні свердловини в необмеженому пружному середовищі

$$\sigma_{rr}^{(din)}(r) = -0.5 \Delta p \frac{2br^{-1}H_1^{(2)}(k_1r) - k_1H_0^{(2)}(k_1r)}{2ba^{-1}H_1^{(2)}(k_1a) - k_1H_0^{(2)}(k_1a)}, \quad (9)$$

де  $H_n^{(2)}(k_1r)$  – функція Ханкеля;

$k_1 = 2\pi f \sqrt{\rho(1+\nu)(1-2\nu)/E(1-\nu)}$  – число подовжніх хвиль;

$\rho$  – густина масиву, кг/м<sup>3</sup>;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона;

$E$  – модуль пружності, МПа;

$f$  – частота гармонійної дії на поверхню свердловини, с<sup>-1</sup>.

Оскільки рідина, що нагнітається в свердловину, чинить тиск по нормалі, зміна напруженого стану в масиві буде діяти по радіальних компонентах (8), (9), записаним в полярній системі координат.

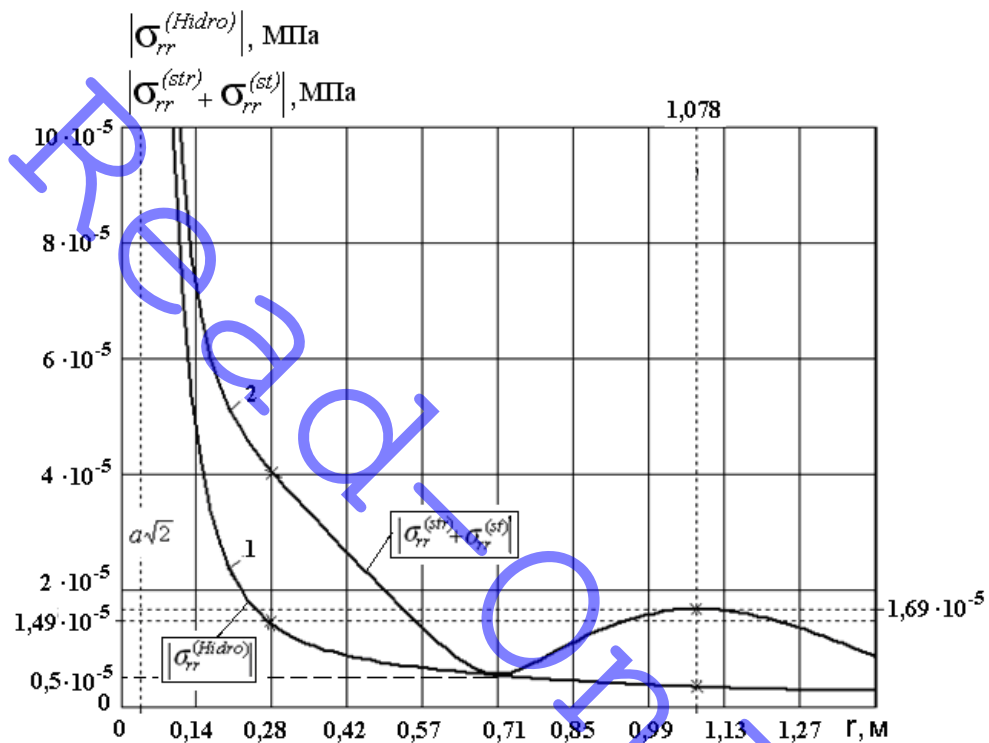
В результаті рішення поставлених задач встановлено:

- розподіл радіальних і максимальних (по модулю) напружень навколо свердловини;



- залежності напружень від радіальної відстані до осі свердловини для різних коефіцієнтів бічного тиску;
- частотні залежності динамічної складової напружень при різних коефіцієнтах Пуассона і внутрішнього тертя;
- вплив меж вугільного пласта на розподіл радіальних напружень (рис. 9).

Визначено (рис. 9), що при потужності пласта 2 м навколо свердловини до відстані  $r = 0,71$  м спостерігається уповільнення спаду напружень до значення  $0,5$  МПа, потім, до  $r = 1,078$  м, зростання до максимуму  $1,69$  МПа і далі, до поверхні пласта, спостерігається їх убавання. Такий характер зміни напружень відповідає розвитку тріщин у напрямі вміщуючих порід.



- 1 – напруження на відстані  $r$  від центру свердловини в безмежному середовищі;  
2 – напруження на відстані від центру свердловини в напрямі  $\vartheta = \pi / 4$

Рисунок 9 – Розподіл радіальних напружень навколо свердловини

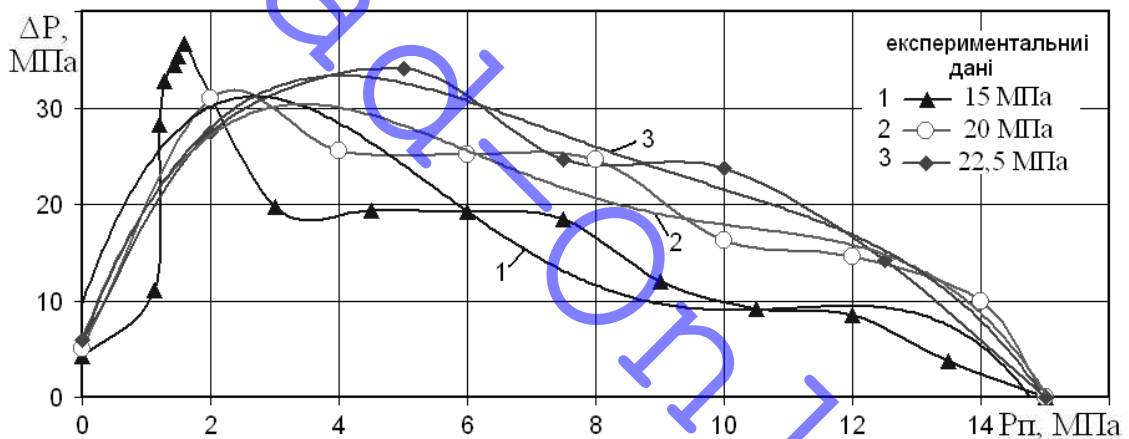
Виконані дослідження дозволили обґрунтувати параметри гідроімпульсної дії на викидонебезпечний вугільний пласт.

У четвертому розділі приведені результати досліджень закономірностей розвитку частоти і розмаху автоколивань при моделюванні процесу імпульсного нагнітання рідини. При рішенні поставлених задач одночасно розглядалися динамічні характеристики кавітаційної течії рідини, що реалізується ГК-2,5 при різних його геометричних параметрах, і режимні параметри нагнітання рідини. Дослідження параметрів періодично-зривної течії рідини в діапазоні тиску підпору від нуля до  $P_{\text{п}} = P_{\text{н}}$  дозволили встановити стадії розвитку, стійкої і затухаючої кавітації і обґрунтувати активну стадію гідроімпульсної дії.

Виходячи з встановлених задач, дослідження динамічних параметрів генератора розділено на дві складові частини. Перша включала рішення задач дослідження генератора ГК-2,5 з довжиною критичного перетину  $l_{кр} = 3,0; 6,0$  і  $30,0$  мм, з кутом розкриття дифузора  $\beta = 20^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$  з метою обґрунтування робочого діапазону та його активної стадії. Друга – встановлення робочого діапазону пристрою з генератором ГК-2,5 з  $l_{кр} = 3,0$  мм і  $\beta = 20^\circ$  для різних глибин залягання викидонебезпечних вугільних пластів.

Дослідженнями встановлено, що зміна кута розкриття дифузора з  $\beta = 20^\circ$  до  $\beta = 45^\circ$  і збільшення довжини критичного перетину з  $l_{кр} = 3,0$  мм до  $l_{кр} = 30,0$  мм призводить до збільшення зони розвитку кавітаційної течії з  $0,5$  до  $2,0$  МПа і зменшенню затухаючої зони з  $12$  до  $5,0$  МПа. Це призводить до зниження значень динамічних параметрів генератора, його робочого діапазону і активної стадії.

Визначено, що для глибин залягання вугільних пластів на глибинах до  $700$  м найбільш ефективним є режим імпульсного нагнітання при тиску від  $10$  МПа до  $15$  МПа. Умовам залягання вугільних пластів на глибинах від  $700$  до  $1300$  м, що відповідає тиску нагнітання  $15 \dots 23$  МПа, задовольняють всі режими нагнітання з тиском більш ніж  $15$  МПа (рис. 10).



1, 2, 3 – лінії тренда встановлених залежностей в робочому діапазоні режимів нагнітання  $P_n = 15, 20, 22,5$  МПа

Рисунок 10 – Залежності розмаху автоколивань  $\Delta P$  від тиску підпору при  $P_n = 15; 20; 22,5$  МПа (ГК-2.5 з  $l_{кр} = 3$  мм,  $\beta = 20^\circ$ )

Встановлені закономірності розмаху автоколивань від тиску підпору рідини в фільтраційній частині свердловини достатньо добре описуються рівнянням полінома 4 ступеня:

$$\begin{aligned} & \text{- при } P_n = 15 \text{ МПа} \\ & \Delta P = -0,014 P_{п}^4 + 0,48 P_{п}^3 - 5,21 P_{п}^2 + 18,83 P_{п} + 9,73 \quad R^2 = 0,69 \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{- при } P_n = 20 \text{ МПа;} \\ & \Delta P = -0,011 P_{п}^4 + 0,36 P_{п}^3 - 4,14 P_{п}^2 + 17,51 P_{п} + 5,99 \quad R^2 = 0,93 \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{- при } P_n = 22,5 \text{ МПа} \\ \Delta P &= -0,008 P_n^4 + 0,29 P_n^3 - 3,59 P_n^2 + 17,2 P_n + 5,79 \quad R^2 = 0,98 \quad (12) \end{aligned}$$

При цих режимах, стадія зародження явища кавітації практично відсутня. Стійка періодично-зривна течія рідини виявляється з моменту подачі рідини на вхід генератора. Тому в промислових умовах робочий режим нагнітання слід визначати дослідними нагнітаннями. Наприклад, при  $P_n = 15$  МПа максимум розмаху автоколивань  $\Delta P \approx 38$  МПа досягається при  $P_n \approx 1,8$  МПа, а максимум частоти  $f \approx 10,0$  кГц при  $P_n \approx 12,0$  МПа. Робочий діапазон генератора за тиском підпору рідини в свердловині складає  $0,1 \leq P_n \leq 12,0$  МПа.

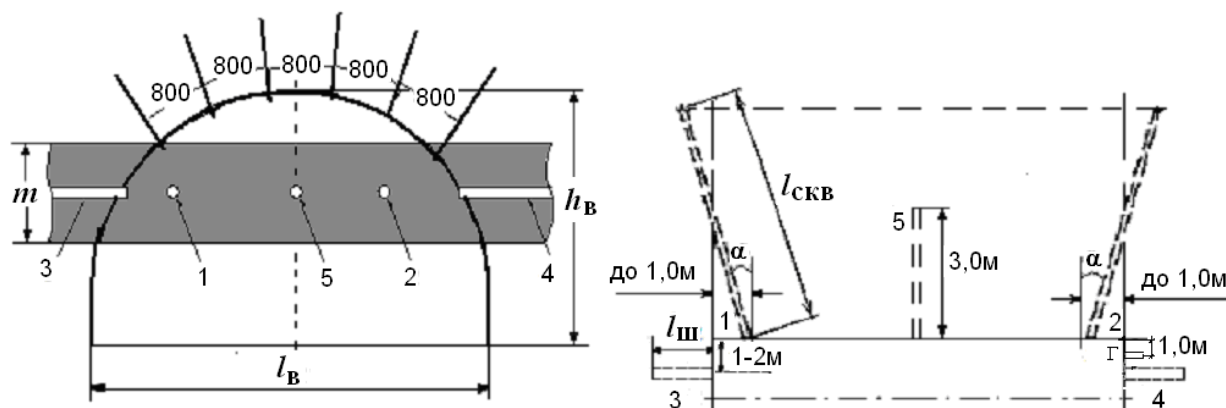
Таким чином, отримані результати дозволили встановити, що тиск нагнітання рідини при гідроімпульсній дії лінійно залежить від глибини залягання пласта і для глибин від 600 до 1300 метрів складає від 8 МПа до 23 МПа, при цьому в режимі нагнітання рідини з тиском до 15 МПа при роботі кавітаційного генератора виникають періоди зародження, стійкої і затухаючої кавітації, а при тиску більше ніж 15 МПа кавітаційним генератором реалізується стійкий режим гідродинамічних автоколивань з початковим розмахом  $\approx 5,0$  МПа і частотою  $\approx 1,0$  кГц, в якому зміна тиску підпору рідини до 0,82 тиску нагнітання призводить до автономної роботи генератора.

У *п'ятому розділі* розглянуто методи контролю параметрів гідророзпушування при проведенні гірничо-експериментальних досліджень. Об'єм проведених досліджень у 8 вибоях підготовчих виробок склав 35 циклів гідророзпушування по нормативній методиці і 30 циклів в режимі імпульсного нагнітання рідини при запланованих 10 циклах. При проведенні досліджень пройдено більш ніж 1,2 км виробок.

Оцінка безпеки ведення гірничих робіт проводилася шляхом зіставлення ефективності гідророзпушування при статичному і імпульсному нагнітанні рідини за наслідками контролю газодинамічного стану вугільного пласта у вибої виробки нормативними методами контролю: по початковій швидкості газовиділення з контрольних шпурів, за контролем акустичного сигналу системою АПСС-1; за контролем акустичної емісії апаратурою ЗУА-98.

На рис. 11 приведений приклад технологічної схеми гідророзпушування при проведенні заходів в умовах СП «Шахтоуправління «Молодогвардійське» на пласті  $k_2^H$  у вибоях східного конвеєрного ходка (СКХ). Приклад зіставлення параметрів статичного і імпульсного режимів гідророзпушування приведений в таблиці 3.

Результати досліджень дозволяють відмітити, що при імпульсному нагнітанні час активного процесу гідрообробки знижується не менше ніж в два рази, а витрата рідини до 60 %. Зона розвантаження крайової частини пласта збільшується до глибини буріння технологічних свердловин. В обробленій зоні швидкість газовиділення з контрольних шпурів по ходу вибою і в боки проектного контуру виробки (див. рис. 11) на глибині до 3,5 м знижується до показника «сліди», а вміст метану в атмосфері виробки при руйнуванні вугілля комбайном не перевищує 1,0 %.



1, 2 – технологічні свердловини; 3, 4, 5 – контрольні шпури;  
 $l_{СКВ}$  – довжина свердловини, м;  $l_{ш}$  – довжина шпура, м;  
 $\alpha$  – кут довороту осі свердловини на масив;  $\Gamma$  – геофон

Рисунок 11 – Технологічна схема гідророзпушування пласта  $k_2^H$  у вибої східного Орловського конвеєрного ходка

Таблиця 3 – Параметри гідророзпушування пласта  $k_2^H$  гор. 617 м у вибої 33 східного Орловського конвеєрного ходка (від діагон. вент. штреку)

Режим Нагнітання	Параметри гідророзпушування (середнє значення)			
	тиск нагнітання, МПа	час нагнітання, хв.	об'єм рідини, м <sup>3</sup>	питома витрата рідини, л/т
статичний	14,0-18,0	36,2	1,42	19,5
імпульсний	13,0-14,0	9,2	0,52	7,0
Ефективність:		74,6%	63,4%	64,1%

Однією з основних задач досліджень в промислових умовах було встановлення критерію контролю гідроімпульсної дії за тиском підпору рідини у фільтраційній частині свердловини. Враховуючи складність візуальної фіксації проміжних значень тиску на манометрі його свідчення реєструвались відеозйомкою. В подальшому за допомогою MS Excel було встановлено графічне зображення коливань тиску рідини з інтервалом 0,25 с (рис. 12).

Аналіз досліджень показав, що процес гідроімпульсної дії включає початкову, активну і кінцеву стадії. На початковій стадії фільтраційна частина свердловини заповнюється рідиною. Потім, при сталому тиску на вході генератора ( $P_n = \text{const}$ ), у фільтраційній частині свердловини спостерігаються стійкі коливання тиску рідини в діапазоні від 2,0 до 7,0 МПа. Це свідчить, що навколо свердловини відбувається процес інтенсивного тріщиноутворення, який характеризує активну стадію гідророзпушування. Далі, через 6-8 хвилин, відбувається різке падіння тиску до 1,0...2,0 МПа. Цей етап характеризує завершення гідроімпульсної дії. Відповідно критерію контролю гідророзпушування, процес вважається завершеним, якщо значення максимально встановленої величини тиску нагнітання рідини, тобто тиску

гідроопору в свердловині, знижується не менше ніж на 30%. В нашому прикладі зниження тиску гідроопору пласта склало 70%.

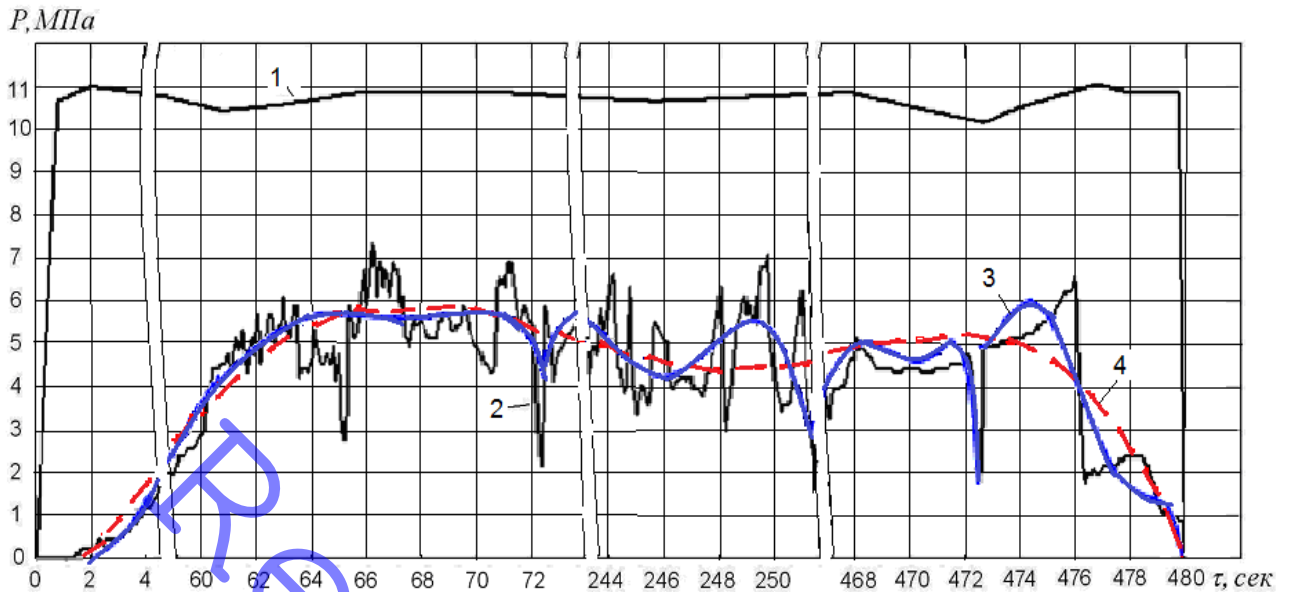
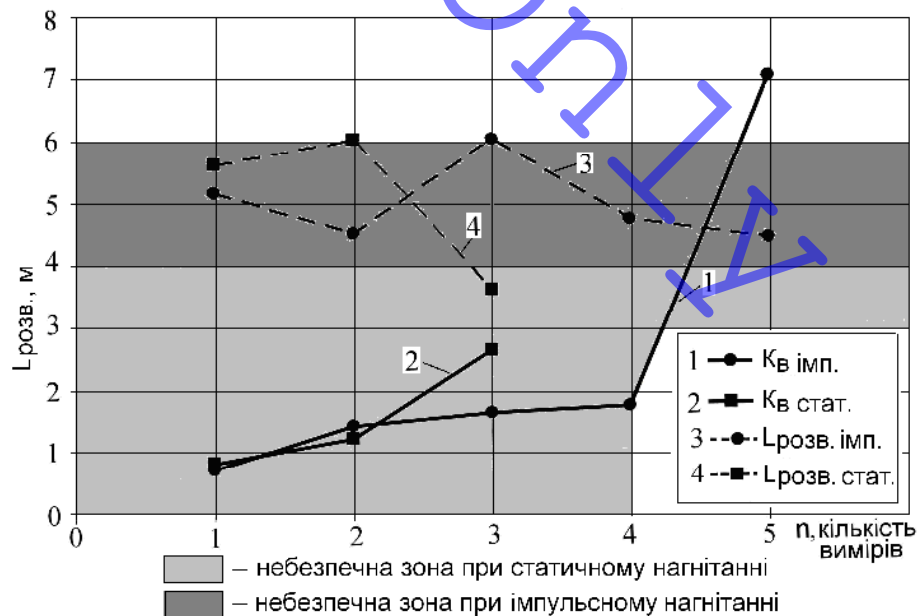


Рисунок 12 – Приклад реєстрації тиску нагнітання (крива 1) і підпору рідини у фільтраційній частині свердловини (крива 2), 3,4 – лінії тренда

Оцінка безпеки ведення гірничих робіт за наслідками контролю системою АПСС-1 показала, що зона розвантаження при імпульсному нагнітанні рідини через свердловини глибиною буріння 6,0 метрів перевищує зону герметизації свердловини (4,0 м) і складає 5...7 м (рис. 13).



$K_v$  – коефіцієнт викидонебезпечності;  $L_{розв.}$  – зона розвантаження

Рисунок 13 – Приклад співставлення результатів визначення зони розвантаження системою АПСС-1 при статичному та імпульсному нагнітанні



При цьому, в покрівлі пласта, на віддаленні більш ніж 10 м, спостерігається розвиток деформацій, які забезпечують рівномірний (без затримок) перерозподіл напружень у вугільному пласті, що забезпечує безпеку праці по чиннику раптових викидів вугілля і газу. Таким чином експериментальними дослідженнями встановлено, що для постійного підтримання безпечної зони необхідне проведення заходів через 6-7 метрів, що відповідає глибині буріння технологічних свердловин.

Контроль безпеки ведення гірничих робіт апаратурою ЗУА-98 показав, що звуковий супровід гідроімпульсної дії дозволяє контролювати як процес нагнітання, так і процес тріщиноутворення. Буріння свердловин під контролем апаратурою ЗУА-98 (рис.14) дозволяє контролювати як зону розвантаження, так й зону підвищеного тиску попереду вибою виробки.

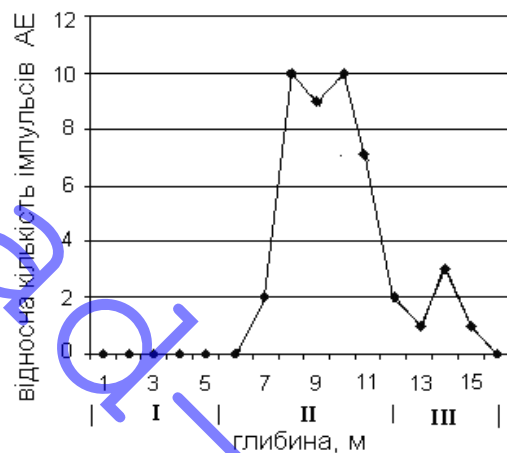


Рисунок 14 – Приклад результатів контролю стану пласта  $k_2^H$  гор. 617м апаратурою ЗУА-98 попереду вибою 33 східного конвеєрного ходка (від діаг. вент. ходка)

Так за результатами контролю встановлено, що на глибині до 6,0 м імпульси АЕ відсутні, що вказує на повне розвантаження масиву в зоні обробки. При подальшому бурінні свердловини спостерігається стрімке зростання імпульсів АЕ і їх падіння. Це свідчить про перерозподіл напружень, викликаних гідроімпульсною дією і тиском гірських порід.

Аналіз отриманих результатів показав, що гідроімпульсну дію слід застосовувати, коли вугільний пласт знаходиться в умовах напруженого стану поза зоною розвантаження на віддаленні 3,5...4,5 м від вибою виробки. Чим вище концентрація напружень в масиві, тим ефективніша дія високочастотних коливань генератора ГК-2,5 з метою тріщиноутворення. За відсутності небезпечного стану масиву в проведенні гідроімпульсної дії немає необхідності.

Далі, за результатами гірничо-експериментальних досліджень, із застосуванням чисельного моделювання розглянуто зміну напружено-деформованого стану (НДС) крайової частини вугільного пласта. Такий підхід дозволив врахувати наявність в тріщино-поровому просторі вугільного пласта

метану і зміну фільтраційної проникності вугілля при його динамічному навантаженні.

При рішенні задачі розглянуто процеси: зміни НДС гірського масиву; фільтрації рідини і метану; час гідродії. Оцінку безпеки ведення гірничих робіт по зміні НДС розглянуто на тимчасових ітераціях  $i$  шляхом порівняння геомеханічного параметру  $Q = (\sigma_1 - \sigma_3) / \gamma h$ , що характеризує ступінь різнокомпонентності поля напружень при статичному і імпульсному нагнітання рідини (рис. 15).

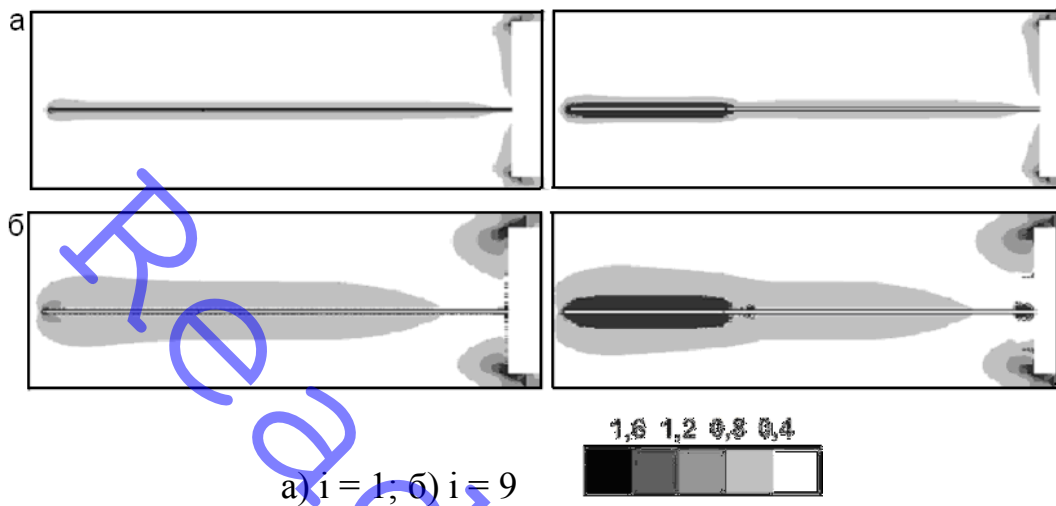


Рисунок 15 – Розподіли значень параметра  $Q$  і зони непружних деформацій при статичному (зліва) і імпульсному (справа) режимах

Встановлено, що область різнокомпонентності  $0,4 < Q < 0,8$  навколо свердловини збільшується з часом нагнітання. Зона непружних деформацій при статичному режимі практично відсутня. При гідроімпульсній дії формується область непружних деформацій, в якій виконується критерій руйнування (Кулона-Мора) і параметр  $P = \sigma_3 / \gamma H < 0,1 \dots 0,3 \sigma_{сж} / \gamma H$ , що характеризує її як область тріщиноутворення і різкого зростання проникності вугілля.

На рис. 16 приведені зони насиченості порового простору водою і метаном в різні моменти часу.

Зволожені області з відтисненим метаном показані ізобарами  $p / p_0 \geq 1$  ( $p$  параметр фільтрації метану). На перших тимчасових ітераціях рідина, що закачується, переміщується у глибину пласта, вільний газ видавлюється на відкриту поверхню або стискається у поровому просторі (рис. 16 а, б). Після нагнітання, 6-9 ітерації, в порушеній області починається процес фільтрації метану. На 10-й тимчасовій ітерації відбувається посування вибою виробки на 3,0 м, а фільтрація метану з вугільного пласта продовжується (рис. 16 в).

При гідроімпульсній дії область, в якій  $p / p_0 < 1$ , має значно більші розміри, отже, фільтрація метану в ній відбувається швидше (рис. 17 а). Цей висновок підтверджується результатами експериментальних досліджень початкової швидкості газовиділення з контрольних шпурів у вибоях підготовчих виробок (рис. 17 б).

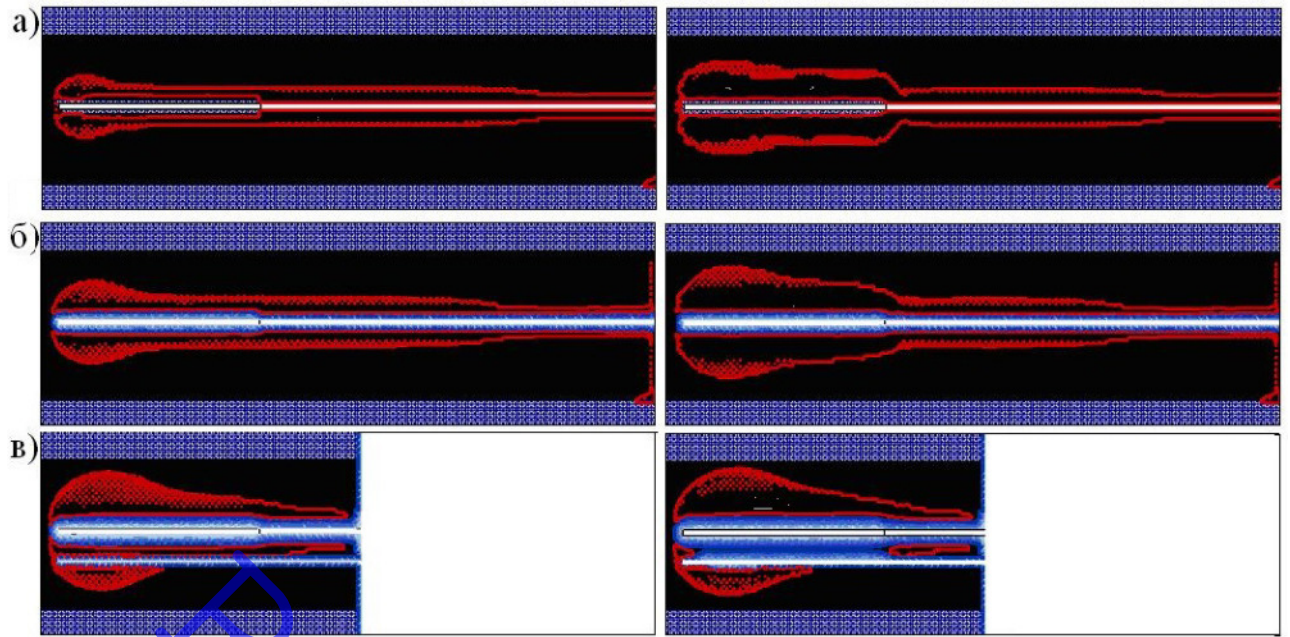
а)  $i = 3$ ; б)  $i = 5$ ; в)  $i = 10$ 

Рисунок 16 – Область гідродії при статичному (зліва) і імпульсному (справа) режимах нагнітання

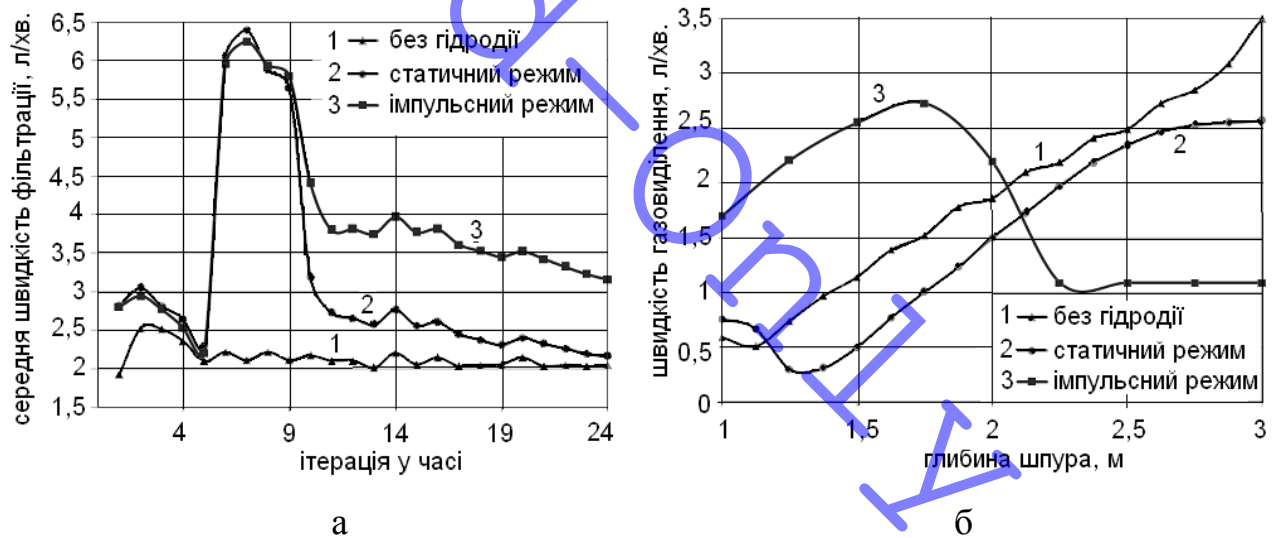


Рисунок 17 – Результати теоретичних досліджень методом скінченних елементів швидкості фільтрації – а) і інструментальних вимірювань газовиділення з контрольних шпурів – б)

У шостому розділі наведено загальний об'єм і середньостатистичні результати гірничо-експериментальних досліджень. Встановлено, що при імпульсному нагнітанні час активного процесу гідрообробки знижується не менше ніж в два рази, а витрата рідини до 60%. Розвантажена зона крайової частини пласта збільшується до глибини буріння технологічних свердловин і характеризується зниженням швидкості газовиділення з контрольних шпурів по

ходу вибою до 1 л/хв. і в боки проектного контуру виробки до значення «сліди». В обробленій зоні вміст метану в атмосфері виробки при руйнуванні вугілля комбайном не перевищує 1,0 %. Ефективність гідроімпульсної дії в діапазоні тиску нагнітання рідини 10,0...25,0 МПа забезпечується насосними установками з темпом нагнітання 30...50 л/хв.

Відмічено, що в результаті теоретичних, лабораторних і гірничо-експериментальних досліджень встановлені конструктивні параметри пристрою гідроімпульсної дії, умови використання, технологічні параметри, параметри процесу і критерії ефективності гідророзпушування, що дозволило розробити новий спосіб гідроімпульсного розпушування викидонебезпечного вугільного пласта. Встановлено, що гідроімпульсне розпушування викидонебезпечного вугільного пласта під тиском нагнітання рідини від 10 до 23 МПа через свердловини діаметром 42...46 мм, глибиною їх буріння 6...8 метрів з урахуванням безпечної глибини герметизації і тиску гідровіджиму, відповідно глибини залягання пласта, призводить до прояву прогнозованих складних взаємопов'язаних послідовно виникаючих в масиві процесів, що включають зміну напружено-деформованого стану крайової частини пласта і його дегазацію внаслідок тріщиноутворення та інтенсивної фільтрації метану, які дозволяють попереду вибою завчасно, до глибини буріння свердловин, створити безпечну зону і збільшити швидкість проведення виробки в 2-3 рази.

На підставі отриманих результатів розроблено методику проведення приймальних (промислових) випробувань способу гідроімпульсного розпушування викидонебезпечних вугільних пластів крутого падіння при буропідливному способі проведення виробок.

Промислові випробування виконані в умовах пласта  $l_6$  – «Ізвестнячка - захід» у вибої відкатного штреку гор. 1146 м ВП «Шахта Центральна» ДП «Торецьквугілля» на протязі 100 м проведення виробки. Результати випробувань оформлені Актом виконаних робіт. При проведенні досліджень встановлено, що після 10 хв. гідроімпульсної дії швидкість газовиділення з контрольних шпурів на глибині до 3,5 м знижується до показника «сліди». Після проведення БПР в зоні впливу гідроімпульсної дії – впродовж 6-7 метрів, що відповідає 3-м циклам БПР, ознаки ГДЯ відсутні.

Отримані результати дозволили розробити технологічні схеми способу гідроімпульсного розпушування викидонебезпечних вугільних пластів при проведенні підготовчих виробок комбайнами на похилих пластах і пластах крутого падіння при буропідливному способі проведення виробок.

Результати досліджень використані при розробці Технічного завдання і першої редакції керівництва – «Правила ведення гідроімпульсного розпушування викидонебезпечних вугільних пластів при проведенні виробок комбайнами в умовах ПАТ «Краснодонвугілля».

Встановлено, що економічна ефективність, яка очікується при використанні способу у вибоях підготовчих виробок, складає 1,3 млн. грн. в рік на один комбайн. Наведено подальший розвиток результатів досліджень.



## ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою в галузі підземної розробки родовищ корисних копалин, в якій вирішена актуальна наукова проблема керування станом викидонебезпечного вугільного пласта гідроімпульсною дією, яка полягає у встановленні закономірностей зміни і механізму переведення системи вугілля-газ в безпечний стан під проявом деформаційних процесів в геологічній товщі і попереду вибою підготовчої виробки під впливом додаткового навантаження пласта шляхом зміни динамічних параметрів імпульсного нагнітання рідини в залежності від тиску гідроопору вугілля, зміни гідравлічних параметрів режимів нагнітання від глибини розробки пласта, що дозволило обґрунтувати параметри і розробити спосіб гідроімпульсного розпушування викидонебезпечного вугільного пласта з метою керування його станом та створення безпечних умов праці у вибоях підготовчих виробок, виконати промислові випробування способу і отримати очікуваний економічний ефект 1,3 млн. грн. в рік на один комбайн.

Основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи.

1. Аналіз відомих рішень підвищення безпечних умов праці на викидонебезпечних вугільних пластах, досліджень будови і особливостей газовиділення при саморуйнуванні вугілля показав, що підвищення інтенсифікації гірничих робіт і ефективності способів запобігання ГДЯ неможливе без урахування закономірностей процесів перетворення системи вугілля-газ, яка формується під впливом техногенних чинників в геологічній товщі і крайовій частині викидонебезпечного масиву. Тому керування станом системи вугілля-газ в крайовій частині викидонебезпечних вугільних пластів пов'язано з подальшим розвитком і створенням нових способів запобігання газодинамічним явищам.

2. Запропоновано модель структурних перетворень макромолекули вугілля, яка пояснює об'єми виділення метану, які перевищують розрахункові значення, при саморуйнуванні вугільного пласта. Показано, що при зміні стану системи вугілля-газ відбувається розрив одинарних зв'язків вуглецю, водню і кисню у шарах бічних радикалів аморфних угруповань, тому при руйнуванні вугілля можуть утворюватися нові молекули води й метану. Вперше встановлено, що розвиток деформаційних процесів і зміна опорного гірського тиску в геологічній товщі при надробленні та підробленні викидонебезпечних пластів в умовах великих глибин відбувається під впливом деформацій зсуву за логарифмічними залежностями прояву граничних кутів деформацій  $\delta_0$  і кутів розриву порід  $\delta''$  від відстані між пластами і дозволяє встановити у часі і просторі межі, в яких формуються умови трансформації викидонебезпечного вугілля і зміна стану системи вугілля-газ.

3. Експериментально встановлено, що зусилля ініціювання тріщин зсуву при навантаженні викидонебезпечних вугільних пластів лінійно залежить від стискаючого навантаження і не залежить від напрямку руйнуючого навантаження, що додається перпендикулярно або паралельно прошарків, що

складають пласт, тому зусилля ініціювання тріщин зсуву в цих гірничо-геологічних умовах не залежить від нашарування пласта.

4. Вперше встановлено, що тиск нагнітання рідини при гідроімпульсній дії лінійно залежить від глибини залягання пласта і для глибин від 600 до 1300 метрів складає 8 МПа до 23 МПа, при цьому в режимі нагнітання рідини з тиском до 15 МПа при роботі кавітаційного генератора виникають періоди зародження, стійкої і затухаючої кавітації, а при тиску більше ніж 15 МПа кавітаційним генератором реалізується стійкий режим гідродинамічних автоколивань з початковим розмахом  $\approx 5,0$  МПа і частотою  $\approx 1$ кГц, в якому зміна тиску підпору рідини до 0,82 тиску нагнітання призводить до автономної роботи генератора.

5. Вперше встановлено, що керування станом системи вугілля-газ в крайовій частині викидонебезпечного вугільного пласта забезпечується зміною тиску автоколивань рідини, які лінійно залежать від тиску підпору рідини в свердловині, а тиск нагнітання лінійно залежить від максимальних значень розмаху автоколивань, при цьому зміна тиску підпору рідини в свердловині призводить до розвитку активної стадії гідророзпушування, завершення якої є критерієм контролю ефективності гідроімпульсної дії.

6. При проведенні гірничо-експериментальних робіт вперше виконано адаптування методу прогнозу і контролю викидонебезпечності вугільних пластів за параметрами акустичного сигналу апаратурою системи АПСС-1. Встановлено новий критерій контролю гідроімпульсної дії за реєстрацією високочастотної складової акустичного сигналу, що виникає при роботі генератора, яка реєструється на моніторі комп'ютера і закінчується за сигналом «активний процес завершений». Вперше виконано моніторинг стану вугільного пласта при його гідророзпушуванні за контролем акустичної емісії гірського масиву системою ЗУА-98. Встановлено, що акустична емісія при гідроімпульсній дії виникає в областях масиву, де локальні напруження перевищують межу міцності вугілля і є реакцією на порушення рівноваги діючих напружень в масиві, тобто на технологічну дію, і вирішує задачу зв'язку: джерело–масив–джерело.

7. Розроблено методику проведення гірничо-експериментальних робіт гідроімпульсної дії на вугільні пласти при проведенні підготовчих виробок комбайнами. Роботи виконані у 8 підготовчих виробках при 35 циклах нагнітання рідини по нормативній методиці гідророзпушування і 30 циклах імпульсного нагнітання, при загальній протяжності виробок близько 1,2 км. Результатами гірничо-експериментальних робіт підтверджено теоретичні дослідження і встановлені нові параметри контролю гідроімпульсної дії: за падінням тиску рідини у фільтраційній частині свердловини не менше ніж на 30 % від максимально зареєстрованого; за початковою швидкістю газовиділення встановлено її зниження в обробленій зоні до значення «сліди»; за збільшенням величини низькочастотної складової акустичного сигналу у покрівлі на віддаленні більш ніж 10 м від вугільного пласта, попереду вибою виробки на глибину буріння технологічних свердловин і не менше ніж на 3,5 м в боки проектного контуру виробки; за параметрами контролю АЕ та її



спектром, який містить високочастотні компоненти з високим рівнем енергії в частотному діапазоні роботи генератора 1,6...2,4 кГц і їх відсутністю в розвантаженої зоні.

8. Ефективність гідроімпульсної дії, по відношенню до статичного нагнітання рідини, підтверджено зниженням тривалості процесу гідророзпушування більше ніж в два рази і витрати рідини на 50-60 %. При цьому більше ніж на 70 % збільшується величина низькочастотної складової спектру акустичного сигналу, що призводить до зменшення напруженості масиву ( $K_0$ ) більше ніж на 25 % і збільшення безпечної зони попереду вибою виробки до глибини буріння технологічних свердловин.

9. Вперше встановлено, що гідроімпульсне розпушування викидонебезпечного вугільного пласта через свердловину діаметром 42...46 мм, глибиною буріння 6...8 метрів під тиском нагнітання рідини від 10 до 23 МПа, який лінійно залежить від глибини герметизації свердловини, призводить до прояву прогнозованих складних взаємопов'язаних послідовно виникаючих в масиві процесів, що включають зміну напружено-деформованого стану крайової частини пласта і його дегазацію внаслідок тріщиноутворення та інтенсивної фільтрації метану, які дозволяють попереду вибою завчасно, до глибини буріння свердловин, створити безпечну зону і збільшити швидкість проведення виробки в 2-3 рази.

10. Розроблено технічне завдання стандарту СГУ-П «Правила ведення гідроімпульсного розпушування викидонебезпечних вугільних пластів при проведенні виробок комбайнами» в умовах ПАТ «Краснодонвугілля».

11. Розроблено методику проведення приймальних (промислових) випробувань способу гідроімпульсного розпушування викидонебезпечних вугільних пластів крутого падіння при буропідливному способі проведення виробок. Випробування виконані в умовах пласта  $l_6$  – «Ізвестнячка-захід» у вибої відкатного штреку гор. 1146 м ВП «Шахта Центральна» ДП «Торецьквугілля». При проведенні досліджень на протязі 100 м проходження виробки встановлено, що після 10 хв. гідроімпульсної дії швидкість газовиділення з контрольних шпурів на глибині до 3,5 м знижується до показника «сліди». Після проведення БПР в зоні впливу гідроімпульсної дії – впродовж 6-7 метрів, що відповідає 3-м циклам БПР, ознаки ГДЯ відсутні.

12. Розроблений спосіб гідроімпульсного розпушування викидонебезпечних вугільних пластів і технологічні схеми проведення підготовчих виробок комбайнами на похилих пластах і пластах крутого падіння при буропідливному способі проведення виробок.

13. Розроблена перша редакція стандарту СГУ-П «Правила ведення гідроімпульсного розпушування викидонебезпечних вугільних пластів при проведенні виробок комбайнами в умовах ПАТ «Краснодонвугілля». Економічна ефективність, що очікується при використанні гідроімпульсної дії у вибоях підготовчих виробок встановлена за результатами гірничо-експериментальних робіт на підставі діагностики фінансової діяльності шахт і техніко-економічних показників способів проведення виробок по викидонебезпечних вугільних пластах. Встановлено зниження витрат на

обладнання, електроенергію і вибухові речовини, зниження часу на проведення гідророзпушування і збільшення об'єму проведення гірничих виробок. Встановлено, що очікуваний економічний ефект складає 1,3 млн. грн. в рік на один комбайн.

## ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В РОБОТАХ:

### Монографії

1. Соболев В.В., Поляшов А.С., Зберовский В.В., Ангеловский А.А., Чугунков И.Ф. Система уголь-газ в углеводородах угольного генезиса. Монография. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2013. 248 с.
2. Соболев В.В., Чернай А.В., Зберовский В.В., Поляшов А.С., Филиппов А.О. Физическая механика выбросоопасных углей. Монография. Запорожье: ПРИВОЗ ПРИНТ, 2014. 304 с.

### Статті у фахових виданнях

3. Зберовский В.В. Особенности газодинамического саморазрушения углегазового вещества при гидродинамическом воздействии через скважины / Сб. научн. тр. НГА Украины. Днепропетровск: РИК НГА, 2000. №10. С. 49-53.
4. Зберовский В.В. Управление газодинамическим разрушением в системе «уголь-газ» на больших глубинах / Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.; ИГТМ НАНУ. Днепропетровск: ИГТМ, 2002. №36. С. 28-32.
5. Зберовский В.В. К вопросу состояния системы «уголь-газ» в условиях больших глубин / Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.; ИГТМ НАНУ. Днепропетровск: ИГТМ, 2003. №41. С. 59-67.
6. Зберовский В.В., Поляшов А.С. Механизм массопереноса подвижных фаз в высокоградиентных зонах угольных пластов / Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.; ИГТМ НАНУ. Днепропетровск: ИГТМ, 2006. № 67. С. 266-271.
7. Зберовский В.В. Технологическая схема проведения мероприятий по борьбе с газовым, пылевым и температурным факторами средствами активного воздействия / Сб. научн. трудов НГА Украины. Днепропетровск: РИК НГА, 2007. № 27. С.74-79.
8. Зберовский В.В. Результаты исследований средств импульсного нагнетания жидкости при гидрорыхлении угольных пластов в забоях подготовительных выработок / Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.; ИГТМ НАНУ. Днепропетровск: ИГТМ, 2007. № 68. С.109-118.
9. Ангеловский А.А., Чугунков И.Ф., Зберовский В.В., Наривский Р.Н. Исследование параметров высоконапорного нагнетания жидкости в выбросоопасные угольные пласты при проведении подготовительных выработок / Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.; ИГТМ НАНУ. Днепропетровск: ИГТМ, 2008. № 77. С.82-91.

10. Зберовский В.В. Повышение уровня охраны труда и безопасности горных работ гидроимпульсным воздействием на угольные пласты / Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.; ИГТМ НАНУ. Днепропетровск: ИГТМ, 2008. № 74. С.112-117.

11. Зберовский В.В., Жулай Ю.А., Ангеловский А.А., Чугунков И.Ф. Стендовая установка для моделирования работы кавитационного генератора в скважине / Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.; ИГТМ НАНУ. Днепропетровск: ИГТМ, 2009. № 82. С.190-198.

12. Жулай Ю.А., Зберовский В.В. Решение концептуальных задач гидроимпульсного рыхления выбросоопасных угольных пластов в режиме периодически срывной кавитации / Сб. научн. трудов НГА Украины. Днепропетровск: РИК НГА: НГУ, 2010. № 35, Том 2. С. 246-253.

13. Зберовский В.В., Пазыныч А.В., Поляков Ю.Е., Потапенко А.А., Ангеловский А.А. Оценка эффективности гидроимпульсного воздействия по газовому фактору в забоях подготовительных выработок / Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.; ИГТМ НАНУ. Днепропетровск: ИГТМ, 2010. № 89. С. 126-133.

14. Зберовский В.В., Поляков Ю.Е., Пазыныч А.В., Потапенко А.А., Ангеловский А.А. Модель предельного состояния угольного пласта при нагнетании жидкости / Сб. научн. трудов НГА Украины. Днепропетровск: РИК НГА, 2011. № 36, Том № 1. С. 194-199.

15. Зберовский В.В., Костандов Ю.А. Предельное состояние выбросоопасных угольных пластов при их гидрорыхлении с учетом сопротивляемости угля сдвигу / Сб. научн. трудов НГА Украины. Днепропетровск: РИК НГА, 2011. № 36, Том № 2. С. 194-199.

16. Зберовский В.В. Активные способы гидровоздействия на углегазовый массив / Сб. научн. трудов НГА Украины. Днепропетровск: РИК НГА, 2012. № 37. С. 40-47.

17. Булат А.Ф., Круковская В.В., Круковский А.П., Зберовский В.В. Численное моделирование гидроимпульсного воздействия на выбросоопасные угольные пласты / Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.; ИГТМ НАНУ. Днепропетровск: ИГТМ, 2012. № 105. С. 14-25.

18. Булат А.Ф., Круковская В.В., Зберовский В.В. Сравнение параметров связанных процессов изменения НДС и фильтрации жидкости и газа при различных режимах нагнетания воды в угольный пласт / Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.; ИГТМ НАНУ. Днепропетровск: ИГТМ, 2013. № 108. С.197-205.

19. Круковская В.В., Зберовский В.В. Расчет параметров связанных процессов изменения напряженного состояния массива и двухфазной фильтрации жидкости и газа при нагнетании воды в угольный пласт / Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.; ИГТМ НАНУ. Днепропетровск: ИГТМ, 2015. № 123. С. 11-25.

20. Зберовский В.В. Исследование динамических параметров генератора упругих колебаний при различных углах раскрытия диффузора /

Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.; ИГТМ НАНУ. Днепропетровск: ИГТМ, 2014. № 117. С. 96-102.

21. Зберовский В.В., Пазынич А.В., Поляков Ю.Е. Определение максимальных значений давления жидкости при её импульсном нагнетании в угольный пласт / Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.; ИГТМ НАНУ. Днепропетровск: ИГТМ, 2014. № 118. С. 19-25.

22. Зберовский В.В., Поляков Ю.Е., Наривский Р.Н. Исследование динамических параметров, реализуемых генератором упругих колебаний при зарождении и затухании кавитационного течения жидкости / Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр.; ИГТМ НАНУ. Днепропетровск: ИГТМ, 2015. № 124. С. 57-72.

23. Зберовский В.В. Развитие инженерного метода расчета динамических параметров гидроимпульсного воздействия / Геотехнічна механіка. Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАНУ. Дніпропетровськ: ІГТМ, 2015. № 125. С. 41-56.

24. Сницер А.Р., Зберовский В.В. Распределение напряжений вокруг скважины в угольном пласте при импульсном нагнетании жидкости / Зб. наук. праць НГУ України. Дніпропетровськ: Літограф, 2015. № 48. С. 107-119.

25. Зберовский В.В. Оценка эффективности гидроимпульсного воздействия на угольный пласт методами акустического контроля / Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць; ІГТМ НАНУ. Днепр: ІГТМ, 2017. № 132. С. 74-84.

#### **Статті в зарубіжних виданнях і у виданнях України, що входять в міжнародні наукометричні бази**

26. Зберовский В.В., Андрощук Е.В. О дегазации и сдвигении геологической толщи при освоении месторождений на больших глубинах / Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ. 2002. №6. С. 70-72. (г. Москва. Россия).

27. Зберовский В.В. Новые принципы дегазации крутопадающих углегазовых месторождений / Уголь, 2002. № 7. С. 51-55. (г. Москва. Россия).

28. Зберовский В.В. К вопросу трансформации твердых углеводородов и системы «уголь-газ» / Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ, 2004. №8. С. 188-192. (г. Москва. Россия).

29. Жулай Ю.А., Васильев Л.М., Зберовский В.В., Моисенко П.Ю., Трохимец Н.Я. Интенсификация газовыделения из угольного массива нагнетанием в него жидкости с применением генератора кавитации / Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ, 2007. №13. С. 251-259 (г. Москва. Россия).

30. Zhulay Y., Zberovskiy V., Angelovskiy A., Chugunkov I. Hydrodynamic cavitation in energy-saving technological processes of mining sector / Geomechanical processes during underground mining. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema, 2012. P. 51-56.

31. Зберовский В.В., Васильев Л.М., Ангеловский А.А., Чугунков И.Ф. Механизм гидроимпульсного разрушения выбросоопасных угольных пластов / «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при обработке

месторождений полезных ископаемых на больших глубинах». Сборник трудов ИГД СО РАН, 2012. №4. С. 156-161. (г. Новосибирск, Россия).

### **Тези доповідей і матеріали конференцій**

32. Поляшов А.С., Зберовский В.В. Структурно-текстурные изменения в углях при воздействии природных и техногенных факторов / Матеріали Міжнародної конференції «Форум гірників-2006». Дніпропетровськ: НГУ, 2006. С. 229-239.

33. Зберовский В.В., Цепков К.В., Наривский Р.Н., Потапенко А.А., Ангеловский А.А., Чугунков И.Ф. Взаимосвязи параметров кавитационных генераторов и характеристик насосных установок для гидрорыхления угольных пластов / Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Материалы XIX Межд. научн. школы. Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2009. С. 121-123.

34. Зберовский В.В., Жулай Ю.А., Ворошилов А.С. Теоретическая оценка величины импульса давления при схлопывании каверны в потоке жидкости / Дисперсные системы: Материалы XXIV научной конференции стран. Одесса, «Астропринт», 2010. С. 121-122.

35. Зберовский В.В. Комплекс мер по предотвращению газодинамических явлений при освоении углегазовых месторождений средствами активного воздействия / Сборник научных трудов Двадцатого Международного Симпозиума по планированию горных работ и выбору оборудования MPES 2011. Алматы, 2011. С. 1466-1475.

36. Жулай Ю.А., Зберовский В.В., Ангеловский А.А., Чугунков И.Ф. Гидродинамическая кавитация в технологических процессах горнодобывающей отрасли / Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: Материалы 9 Межд. научн. школы мол. ученых и специалистов. Москва: ИПКОН РАН. 2012. С. 70-74.

37. Круковская В.В., Круковский А.П., Зберовский В.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния и двухфазной фильтрации воды и метана при нагнетании жидкости в угольный пласт / Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках; Материалы XIX Межд. научн. школы. Симферополь: Таврич. нац. Университет. 2013. С. 168-171.

38. Зберовский В.В., Бубнова Е.А., Бабий Е.В. К вопросу расчета давления нагнетания жидкости в угольные пласты с учетом особенностей сдвижения горных пород / Тези доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції «Школа підземної розробки». Бердянськ 4-8 вересня 2018 р. Дніпро: «ЛізуновПрес». 2018. С 39-40.

### **Патенти на винаходи**

39. Патент 87038 Україна, МПК E21F5/02. Пристрій для гідроімпульсного впливу на вугільний пласт / Л.М. Васильєв, Ю.О. Жулай, В.В. Зберовський, П.Ю. Моїсеєнко, М.Я. Трохимец. А 200710209; заявлено 13.09.2007; опубл. 10.06.2009. Бюл. №11. 4 с.



40. Патент 73023 Україна, МПК E21B 43/26. Спосіб гідроімпульсного розпушування вугільних пластів / В.В. Зберовський, Ю.О. Жулай, Д.Л. Васильєв, А.В. Нікіфоров, Г.І. Колчин, О.А. Ангеловський, І.Ф. Чугунков, О.М. Ніскевич. №73023; заявлено 16.02.2012; опубл. 10.09.12. Бюл. №17. 6 с.

41. Патент 125179 Україна, МПК E21F 5/00. Спосіб контролю стану вугільного пласта при гідроімпульсній дії / В.Г. Шевченко, В.В. Зберовський. U 2018 00527; заявлено 18.01.2018; опубл. 25.04.2018. Бюл. №8. 4 с.

42. Патент 125180 Україна, МПК E21B 43/26 E21F 7/00. Спосіб контролю і управління гідроімпульсною дією на вугільний пласт / В.В. Зберовський. U 201800528; заявлено 18.01.2018; опубл. 25.04.2018. Бюл. №8. 4 с.

Особистий внесок автора в роботах, опублікованих в співавторстві, полягає в наступному: [1, 2] – проведення експериментальних робіт і аналіз їх результатів, дослідження відзнак руйнування вугілля і газовиділення при фізико-механічних діях; [6, 33] – постановка задач досліджень, аналіз газовиділення з вугілля, розробка моделі макромолекули вугільної речовини; [9, 13, 28, 30, 31, 34, 36] – розробка методик і доповнень до проектної документації, проведення гірничо-експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів, формування висновків; [11, 12, 21, 22, 35] – постановка задач досліджень, розробка методики і проведення стендових випробувань генератора, проведення розрахунків динамічних параметрів і аналіз отриманих результатів, формування висновків; [14] – постановка задачі, розробка моделі крайової частини вугільного пласта, аналіз результатів розрахунку тиску нагнітання рідини; [15] – проведення лабораторних досліджень; [17-19, 36] – постановка задачі, аналіз результатів чисельного моделювання і гірничо-експериментальних досліджень, формування висновків; [24] – постановка задачі, аналіз результатів розрахунку і формування висновків; [26, 32, 38] – постановка задачі, розробка моделі зсуву гірських порід, аналіз результатів розрахунку параметрів нагнітання рідини, формування висновків; [39-41] – проведення патентних досліджень, формування відзнак і формул винаходів, обґрунтування новизни рішень.

## АНОТАЦІЯ

Зберовський В.В. «Розвиток науково-технічних основ гідроімпульсної дії на викидонебезпечні вугільні пласти». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за фахом: 05.15.02 – «Підземна розробка родовищ корисних копалин». - Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, 2018.

Дисертація присвячена дослідженню процесів зміни стану системи вугілля-газ викидонебезпечних вугільних пластів при їх гідроімпульсному розпушуванні у вибоях підготовчих виробок, обґрунтуванню параметрів імпульсного нагнітання рідини і методів його контролю з метою підвищення безпеки ведення гірничих робіт.



Запропоновано модель структурних перетворень макромолекули вугілля, яка пояснює виділення метану з вугільного пласта, об'єми якого перевищують розрахункові значення.

Встановлено, що гідроімпульсне розпушування викидонебезпечного вугільного пласта через свердловину діаметром 42...46 мм, глибиною буріння 6...8 метрів під тиском нагнітання рідини від 10 до 23 МПа, який лінійно залежить від глибини герметизації свердловини  $P_n = 4,1 l_r + 11,5$ , призводить до прояву прогнозованих складних взаємопов'язаних послідовно виникаючих в масиві процесів, що включають зміну напружено-деформованого стану крайової частини пласта і його дегазацію внаслідок тріщиноутворення та інтенсивної фільтрації метану, які дозволяють попереду вибою завчасно, до глибини буріння свердловин, створити безпечну зону і збільшити швидкість проведення виробки в 2-3 рази.

Теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено, що керування станом системи вугілля-газ в крайовій частині викидонебезпечного вугільного пласта забезпечується зміною тиску автоколиваний рідини, які лінійно залежать від тиску підпору рідини в свердловині  $\Delta P_{\max} = 8,41 P_n + 2,68$ , а тиск нагнітання лінійно залежить від максимальних значень розмаху автоколиваний  $P_{n,\max} = 1,03 \Delta P_{\max} - 7,01$ , при цьому зміна тиску підпору рідини в свердловині призводить до розвитку активної стадії гідророзпушування, завершення якої є критерієм контролю ефективності гідроімпульсної дії.

Методами контролю параметрів гідроімпульсної дії системою АПСС-1, апаратурою ЗУА-98 і контролю газодинамічного стану вугільного пласта за початковою швидкістю газовиділення з контрольних шпурів встановлено розвиток деформацій в покрівлі на видаленні від вугільного пласта більш ніж 10 м, що забезпечує рівномірний розвиток деформацій на видаленні від вибою виробки на глибину буріння технологічних свердловин і не менше ніж 3,5 метрів в боки проектного контуру виробки.

Ключові слова: система вугілля-газ, гідроімпульсна дія, генератор кавітації, частота і розмах автоколиваний, тиск рідини, безпека праці.

## АННОТАЦИЯ

Зберовский В.В. «Развитие научно-технических основ гидроимпульсного воздействия на выбросоопасные угольные пласты». – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности: 05.15.02 – «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых». – Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепр, 2018.

Диссертация посвящена исследованию процессов изменения состояния системы уголь-газ выбросоопасных угольных пластов при их гидроимпульсном рыхлении в забоях подготовительных выработок, обоснованию параметров импульсного нагнетания жидкости и методов его контроля с целью повышения безопасности ведения горных работ.

Предложена модель структурных преобразований в макромолекуле угля, которая поясняет выделение метана из угольного пласта, объемы которого превышают его расчетные значения.

Установлено, что гидроимпульсное рыхление выбросоопасного угольного пласта через скважину диаметром 42...46 мм, глубиной бурения 6...8 метров под давлением нагнетания жидкости от 10 до 23 МПа, которое линейно зависит от глубины герметизации скважины  $P_n = 4,1 l_r + 11,5$ , приводит к проявлению прогнозируемых сложных взаимосвязанных последовательно возникающих в массиве процессов, которые включают изменение напряженно-деформированного состояния краевой части пласта и его дегазацию вследствие трещинообразования и интенсивной фильтрации метана, что позволяют впереди забоя выработки заблаговременно, до глубины бурения скважины, создать безопасную зону и увеличить скорость проведения выработки в 2-3 раза.

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что управление состоянием системы уголь-газ в краевой части выбросоопасного угольного пласта обеспечивается изменением давления автоколебаний жидкости, которые линейно зависят от давления подпора жидкости в скважине  $\Delta P_{\max} = 8,41 P_n + 2,68$ , а давление нагнетания линейно зависит от максимальных значений размаха автоколебаний  $P_{n,\max} = 1,03 \Delta P_{\max} - 7,01$ , при этом изменение давления подпора жидкости в скважине приводит к развитию активной стадии гидрорыхления, окончание которой является критерием контроля эффективности гидроимпульсного воздействия.

Методами контроля параметров гидроимпульсного воздействия системой АПСС-1, аппаратурой ЗУА-98 и контроля газодинамического состояния угольного пласта по начальной скорости газовыделения из контрольных шпуров установлено развитие деформаций в кровле на удалении от угольного пласта более 10 м, что обеспечивает равномерное развитие деформаций на удалении от забоя выработки на глубину бурения технологических скважин и не менее 3,5 метров в стороны проектного контура выработки.

Ключевые слова: система уголь-газ, гидроимпульсное воздействие, генератор кавитации, частота и размах автоколебаний, давление жидкости, безопасность труда.

## ANNOTATION

Zberovskiy V. V. Development of scientific and technical bases of hydroimpulsive influence on outburst coal layers. – Qualification scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for a Doctor degree of technical Sciences. Specialty: 05.15.02 – “Underground mining of mineral deposits”, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2018.

The thesis is devoted to study of processes of change in the system state coal-gas outburst-hazardous coal seams at their hydroimpulsive loosening in the faces of development workings, the rationale, the parameters of the pulse injection fluid and

its methods of control in order to improve the mining safety.

This further development of the hypothesis the state of the outburst coal seams in coal-gas, which in the disequilibrium of forces of self-destruction of its components with the generation of up to 14 molecules of methane.

It has been established and experimentally confirmed that the hydraulic loosening on hazardous outburst coal seams through a well with a diameter of 42...46 mm, a depth of drilling 6...8 meters under pressure of injection of a liquid from 10 to 23 MPa, which is linearly dependent from the depth of hermetic sealing. This leads to the manifestation of the complicated interconnections that successively arisen in the coal array processes, which include the change of the stress-strain state of the edge of the coal formation and intense methane filtration. It allows creating a safe zone ahead of the development in advance to the depth of borehole drilling and increasing the speed of its carrying out of work in 2-3 times.

The model and algorithm of calculation of liquid pulsed injection parameters during hydroimpulsive loosening of hazardous outburst coal seams are developed. It is determined that control of the state of the coal-gas system in the boundary of the hazardous outburst coal seam is provided change of pressure which is linearly dependent on the backwater pressure of the support of the liquid in the well. The injection pressure is linearly dependent on the maximum values of the magnitude of self-oscillations. The change in the pressure of the support of the liquid in the well leads to the development of the active stage of hydraulic loosening, the completion of which is controlling criterion for the effectiveness of the hydropulse action.

Methods of control parameters hydroimpulsive loosening system APSS-1, equipment, VCA-98 and control of gas-dynamic condition of coal seam in starting speed of outgassing from the control holes the development of deformations is established in the roof from a coal seam more than 10 m, which ensures uniform development of deformation away from the slaughter production Institute the depth of drilling production wells and at least 3.5 meters in the project loop generation.

Keywords: coal-gas system, of hydroimpulsive influence, cavitations generator, the frequency and magnitude oscillation, the discharge pressure, safety of works.

Зберовський Василь Владиславович

Розвиток науково-технічних основ гідроімпульсної дії  
на викидонебезпечні вугільні пласти

(Автореферат)

РЕФЕРАТ

Підписано до друку 12.02.2019 р.  
Гарнітура Times. Друк різнографічний.  
Папір офсетний. 1,9 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