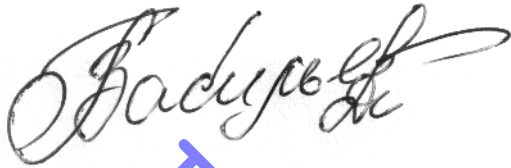


Національна академія наук України
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова

ВАСИЛЬЄВ ДМИТРО ЛЕОНІДОВИЧ



УДК [622.02:539.2/.8]:622.831.325(043.5)

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ
РОЗВАНТАЖЕННЯ ПРИВИБІЙНОЇ ЧАСТИНИ ГАЗОНОСНИХ
ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ

05.15.09 – «Геотехнічна і гірнична механіка»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро – 2019 р.

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова (ІГТМ НАН України)

Науковий консультант – **Булат Анатолій Федорович**, академік НАН України, директор ІГТМ НАН України

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор, **Садовенко Іван Олександрович**, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» МОН України, професор кафедри гідрогеології та інженерної геології;

доктор технічних наук, професор, **Петренко Володимир Дмитрович**, ДВНЗ «Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна» МОН України, професор кафедри основ і фундаментів;

доктор технічних наук, професор, **Несмашний Євген Олександрович**, ДВНЗ «Криворізький національний університет» МОН України, завідувач кафедри фізики.

Захист відбудеться « 20 » вересня 2019 р. о 13³⁰ години на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.188.01 при Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України за адресою: вул. Сімферопольська 2а, м. Дніпро, 49005.

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

Автореферат розісланий 20 серпня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор



В.Г. Шевченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Більше, ніж сто років при підземній розробці вугільних родовищ гостро стоїть проблема запобігання раптовим викидам вугілля, породи та газу. Для запобігання цим явищам розроблено близько десяти локальних способів. Один з найбільш поширених є спосіб гідророзпушування. При реалізації цього способу для розрахунку глибини герметизації свердловини, щоб виключити небезпечний гідровіджим, потрібно розрахувати величину зони розвантаження привибійної частини вугільного пласта. Числові методи, що застосовуються для цієї мети, є достатньо трудомісткими, вимагають залучення великої кількості експериментальних даних, що не завжди застосовне на гірничих підприємствах. Для оцінки ефективності гідророзпушування проф. А. А. Борисенко запропонував критерій: найбільший ступінь розвантаження при гідророзпушуванні досягається, коли вертикальне напруження у гирлі фільтраційної порожнини свердловини знижується до величини цього напруження на кромці пласта. Проте цей важливий критерій не знайшов застосування, оскільки відсутні аналітичні методи визначення цих вертикальних напружень та зміни несучої здатності привибійної частини пласта при його гідророзпушуванні. Крім того, існуючі аналітичні методи розрахунку параметрів розвантаження привибійної частини мають низьку достовірність. Аналітичні методи розрахунку напружень, що засновані на межі міцності і залишкової міцності порідних і вугільних зразків, вимагають трудомісткого обліку масштабного ефекту від геометричних розмірів.

Крім цього, жодна відома аналітична формула, необхідна для розрахунку параметрів керування напружено – деформованим станом (НДС) масивів гірських порід з їх множини, не описує експериментальну епюру вертикальних напружень опорного гірського тиску на вугільні пласти з початковим значенням, яке не дорівнює нулю. У зв'язку з цим відомі аналітичні методи розрахунку НДС масивів гірських порід не дозволяють розкрити механізм розвитку під дією гірського тиску, тиску в них газу і тиску рідини локального внутрішнього процесу утворення тріщин, за рахунок яких частина площі пластів виходить з-під навантаження, що приводить до зниження їх несучої здатності, тобто до їх розвантаження. Особливо актуальні ці методи при розробці нових локальних способів запобігання раптовим викидам вугілля і газу для визначення їх ефективності. Так, у зв'язку з розробкою Інститутом геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (ІГТМ НАН України) нового способу і пристрою імпульсного гідророзпушування, в якій брав участь автор, виникла потреба аналітичного встановлення технологічних і витратно-напірних параметрів взаємодії пристрою з вугільним масивом.

Проте, є можливість істотного підвищення достовірності цих методів на підставі встановлення закономірностей впливу домінуючих чинників на процеси розвантаження привибійної частини газоносних вугільних пластів при їх гідророзпушуванні. Тому розвиток наукових основ визначення параметрів розвантаження привибійної частини газоносних вугільних пластів з урахуванням закономірностей локального утворення і розвитку тріщин в гірських породах, фо-

рмування опуклої епюри опорного гірського тиску, зміни несучої здатності та величин зони розвантаження привибійної частини пласта від тиску газу, його потужності, глибини залягання і показників фізико-механічних властивостей вугілля, встановлення на цій основі раціональних технологічних і витратно-напірних параметрів статичного (нормативного) і імпульсного способу і пристрою гідророзпушування викидонебезпечних вугільних пластів є актуальною **науково-прикладною проблемою** в області підземного видобутку вугілля, яка має важливе значення для підвищення швидкості проведення підготовчих виробок.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Приведені в дисертації дослідження виконані в рамках держбюджетних тем ІГТМ НАН України «Наукові основи керування руйнуванням корисних копалин за рахунок зміни їх фрикційних властивостей при різних видах механічної дії – 2009» (№ ДР 0108U001985), «Виконати обґрунтування і розробити спосіб гідроімпульсної дії, який забезпечує підвищення безпеки праці при проведенні підготовчих виробок – 2011» (№ ДР 0107U002004), «Наукове обґрунтування, розробка і випробування в промислових умовах удосконалених засобів підвищення ефективності видобутку вугілля, шахтного метану і способів підготовки, переробки і транспортування мінеральної сировини 2012» (№ ДР 0111U009992), «Відпрацювати параметри пристрою гідроімпульсної дії на вугільний пласт при проведенні підготовчих виробок комбайнами в умовах шахт ВАТ «Краснодонвугілля» – 2011» (№ ДР 0110U007817); «Розвиток теорії та методів керування станом геотехнологічних систем для забезпечення інтенсифікації роботи гірничодобувних підприємств» (№ ДР 01151U002534), а також 7 тем за господарською тематикою з ПАТ «Краснодонвугілля», по яких автор був виконавцем, а по темі «Наукові засади ризик-орієнтованого керування геотехнічними системами при розробці родовищ твердих корисних копалин» (№ ДР 0119U001349) автор є відповідальним виконавцем.

Ідея роботи полягає у використанні встановлених закономірностей впливу домінуючих чинників на процеси зниження несучої здатності викидонебезпечних вугільних пластів для визначення раціональних параметрів статичного (нормативного) і імпульсного способу та пристрою їх гідророзпушування, що забезпечують запобігання раптовим викидам вугілля, породи та газу та збільшення швидкості проведення підготовчих виробок.

Мета і задачі досліджень.

Мета роботи: встановлення закономірностей впливу домінуючих чинників на процеси зниження несучої здатності викидонебезпечних вугільних пластів для визначення раціональних параметрів статичного (нормативного) і імпульсного способу та пристрою їх гідророзпушування, що забезпечують запобігання раптовим викидам вугілля, породи та газу та збільшення швидкості проведення підготовчих виробок

Для досягнення мети вирішені наступні **задачі досліджень:**

1. Обґрунтувати закономірності розподілу контактних і внутрішніх напружень зразків і масивів гірських порід з урахуванням їх геометричних розмірів.

2. Розробити методи розрахунку параметрів руйнування в локальній області гірських порід з урахуванням їх внутрішнього і контактного тертя.

3. Розробити аналітичні методи та методики розрахунку межі міцності зразків гірських порід при стисненні і встановити їх достовірність за експериментальними даними.

4. Розкрити механізм привантаження від гірського тиску і розробити метод розрахунку несучої здатності привибійної частини газоносних вугільних пластів з урахуванням тиску газу.

5. Розробити методи, впровадити методики для визначення раціональних параметрів нормативного і імпульсного способу та пристрою гідророзпушування привибійної частини газоносних вугільних пластів і обґрунтувати шляхи подальших досліджень.

Об'єкт досліджень – геомеханічні процеси руйнування і розвантаження привибійної частини газоносних вугільних пластів при їх гідророзпушуванні.

Предмет досліджень – закономірності зміни несучої здатності і розвантаження привибійної частини газоносних вугільних пластів при їх гідророзпушуванні.

Методи дослідження. В роботі використано комплексний метод узагальнення попередніх досліджень; методи механіки тіла, що деформується; закономірності ліній ковзання пластичності; теоретичний опис та експериментальне підтвердження закономірностей розподілу контактних, внутрішніх нормальних та дотичних напружень в гірських породах; зіставлення теоретичних позамежних кривих міцності зразків гірських порід з експериментальними діаграмами «нормальні напруження – поздовжня деформація»; узагальнення теоретичних і експериментальних закономірностей формування опорного гірського тиску; зіставлення теоретичних результатів розрахунку зон розвантаження привибійної частини вугільних пластів з експериментальними вимірами цих зон при статичному та імпульсному гідророзпушуванні; методи статистичної оцінки аналітичних результатів та їх відповідність експериментальним даним; стандартні методи вимірювання параметрів.

Наукові положення, які виносяться на захист.

1. Утворення і розвиток тріщин в гірських породах відбувається шляхом їх локального руйнування від граничних ефективних дотичних напружень, що формуються згідно критерію міцності Кулона, який доповнений урахуванням параметрів контактної тертя від 0,5 до 0, та ефективних дотичних напружень, що не досягають межі міцності зсуву порід в точках виходу їх траєкторій на граничну поверхню, при цьому закономірності ефективних дотичних напружень на граничних поверхнях описуються зростаючою експоненціальною функцією.

2. Привантаження привибійної частини вугільного пласта формується дотичними напруженнями від контактної тертя між пластом і бічними породами, які лінійно загасають від 0,5 до 0 від кромки вибою у глибину масиву, у вигляді опорного гірського тиску, епюра якого описується опуклою квадратичною функцією, початкове значення якої дорівнює нормальному напруженню у вер-

шині привибійної тріщини, а кінцеве – гірському тиску в зоні незайманого масиву.

3. Несуча здатність привибійної частини газоносного вугільного пласта визначається значенням межі зсуву вугілля, тиску в ньому газу, горизонтальних стискаючих напружень бічного підпору, що виникають від контактного тертя між пластом і вміщуючими породами, і частини пласта, яка не вийшла з-під навантаження унаслідок утворення тріщин, і описується зростаючою експоненціальною функцією в межах від значення міцності вугілля на стиснення до 40,0 – 55,0 МПа в залежності від показників фізико-механічних властивостей вугілля, потужності і глибини залягання пласта.

4. Зміна величин зони розвантаження вугільного пласта описується ірраціональною функцією: зростаючою від 1,0 до 7,0 м у залежності від потужності та глибини залягання пласта і спадаючою – від 7,0 до 1,0 м у залежності від показників фізико-механічних властивостей вугілля.

5. Розвантаження привибійної частини газоносного вугільного пласта при гідророзпушуванні відбувається за рахунок виходу частини пласта з-під навантаження при розвитку однієї привибійної тріщини віджиму і 3-6 похилих тріщин, що по черзі розвиваються, та зниження несучої здатності цієї частини пласта при імпульсному гідророзпушуванні в порівнянні із статичним за рахунок зниження внутрішнього тертя в вершинах тріщин і контактного тертя між пластом і вміщуючими породами від динамічної дії рідини, що нагнітається в пласт.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Вперше розроблено математичну модель, аналітичні методи, методики розрахунку і встановлено закономірності межі міцності на стиск та побудови діаграм «нормальне напруження – подовжня деформація» зразків гірських порід для чотирьох форм їх руйнування (усічено-клинової, клинової, діагональної, повздожньої) з використанням чотирьох показників властивостей гірських порід (k_n – межа міцності зсуву вугілля, f_k – коефіцієнт контактного тертя, μ – коефіцієнт внутрішнього тертя, E – модуль пружності Юнга) на підставі значень граничних нормальних напружень у вершинах тріщин, що враховують у критерії міцності Кулона контактне тертя і значення ефективних дотичних напружень, які не досягають межі міцності зсуву порід в точках виходу траєкторій на граничну поверхню, що дозволило встановити межу міцності вугілля простими способами в умовах шахт.

2. Вперше запропоновано механізм формування привантаження привибійної частини вугільного пласта, який полягає у лінійному загасанні від кромки вибою у глибину масиву дотичних напружень від контактного тертя між пластом і вміщуючими породами та розроблено математичну модель, аналітичний метод розрахунку, і встановлено закономірності гірського тиску, епюра якого описується опуклою квадратичною функцією, та несучої здатності привибійної частини вугільних пластів, що дозволило описати епюру гірського тиску, відповідну експериментальній.

3. Вперше розроблено метод розрахунку напружень у вершині тріщини в будь-якій точці привибійної частини газоносного вугільного пласта, що полягає

в урахуванні значень опорного гірського тиску, горизонтальних стискаючих напружень бічного підпору, і тиску в ній газу, що дозволило пояснити зниження міцності вугілля за наявності в ньому газу під тиском і визначити параметри тріщин в привибійної частини вугільного пласту.

4. Вперше встановлені закономірності зміни величин зони розвантаження вугільного пласту, які описується функцією, що зростає в залежності від потужності та глибини залягання пластів і спадає в залежності від показників фізико-механічних властивостей вугілля, що дозволило обґрунтувати мінімально допустиму глибину герметизації, яка виключає небезпечний гідровіджим.

5. Вперше розроблено математичну модель, аналітичні методи і методіку та встановлено закономірності параметрів розвантаження привибійної частини вугільного пласта при гідророзпушуванні за рахунок виходу його частини з-під навантаження при розвитку однієї привибійної тріщини віджиму і 3-6 похилих тріщин, що по черзі розвиваються, та зниження несучої здатності цієї частини пласта при імпульсному гідророзпушуванні в порівнянні із статичним за рахунок зниження внутрішнього тертя в вершинах тріщин і контактного тертя між пластом і бічними породами від динамічної дії рідини, що нагнітається в пласт.

6. Вперше розроблено математичну модель, аналітичний метод розрахунку і встановлені закономірності зміни значень тиску рідини у межах від 0 до 20 МПа, необхідних для розвитку тріщин гідророзпушування, від ординати їх вершин, при цьому перевищення значень цього тиску забезпечується максимальним імпульсним тиском, що розвивається кавітаційним генератором пристрою з керуванням підпірного тиску – гідроопору вугілля при витраті рідини, рівної $0,00092 \text{ м}^3/\text{с}$ (55 л/хв), що нагнітається в пласт, в умовах відношення підпірного тиску до тиску нагнітання у діапазоні 0,1 – 0,25, при цьому для виключення небезпечного гідровіджиму витрата рідини не повинна перевищувати $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ (60 л/хв), що дозволяє підвищити безпечну зону безперервної виїмки вугілля з 3.0 м до 6 – 7 м і швидкість проведення виробок у 2-2,3 рази.

Наукове значення роботи полягає у встановленні закономірностей локального утворення і розвитку тріщин в гірських породах, формування опорного гірського тиску, зменшення несучої здатності пласта із збільшенням тиску газу, зміни величин зон розвантаження від потужності пласта, глибини його залягання і показників фізико-механічних властивостей вугілля, розвантаження газонесних вугільних пластів при їх гідророзпушуванні, удосконаленні методів розрахунку параметрів розвантаження цих пластів на базі критерію міцності Кулона з урахуванням їх контактної тертя і тиску в них газу.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці:

1. Обґрунтованих і експериментально підтверджених методик розрахунку межі міцності на стиск та побудови діаграм «нормальне напруження – подовження деформація» зразків гірських порід з використанням чотирьох їх показників (межі опору матеріалу зсуву, коефіцієнтів внутрішнього і зовнішнього тертя і модуля пружності) гірської породи, які дозволяють визначити межу міцності вугілля і порід.

2. Методики розрахунку параметрів розвантаження викидонебезпечних вугільних пластів при їх гідророзпушуванні, яка дозволяє визначити величину зони розвантаження.

3. Методики проведення гірничо-експериментальних робіт по випробуванню пристрою гідроімпульсної дії для дегазації пласта через довгі свердловини, яка дозволяє визначити ефективність дегазації.

4. Методики проведення гірничо-експериментальних робіт, яка дає рекомендації при гідроімпульсному розпушуванні вугільних пластів для безпечного проведення підготовчих виробок.

5. Методики лабораторних досліджень параметрів пристрою гідроімпульсного дії на викидонебезпечні вугільні пласти, яка дозволяє визначити раціональні параметри роботи пристрою.

6. Методичних рекомендацій по гідроімпульсному розпушування вугільних пластів при проведенні підготовчих виробок комбайнами.

7. Методики експериментального визначення межі міцності зсуву і кута внутрішнього тертя гірських порід, яка дозволяє визначити показники фізико-механічних властивостей вугілля.

8. «Технічного завдання на дослідно-конструкторську роботу «Пристрій для гідроімпульсної дії на вугільний пласт» для промислового освоєння, в якому обґрунтовані параметри пристрою.

9. Методики обґрунтування значення максимальної витрати рідини, що нагнітається в пласт, $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ (60 л/хв), що дозволяє виключити небезпечний гідровіджим, який часто провокує виникнення раптових викидів вугілля і газу при високих витратах рідини.

Реалізація результатів роботи:

1. «Методика розрахунку параметрів діаграм «нормальне напруження – поздовжня деформація», затверджена ПАТ «Краснодонвугілля» і використовується на СП «Ш/у «Молодогвардійське» ПАТ «Краснодонвугілля» від 6 січня 2014 р. (Акт впровадження від 2 березня 2014 р.).

2. «Методика розрахунку параметрів розвантаження газоносних вугільних пластів при їх гідророзпушуванні», затверджена ПАТ «Краснодонвугілля» і використовується на СП «Ш/у «Молодогвардійське» ПАТ «Краснодонвугілля» від 12 січня 2014 р. (Акт впровадження від 12 вересня 2014 р.).

3. «Методика... від 3 березня 2010 р.» і «Доповнення до «Паспорту проведення гірничо-експериментальних робіт» з випробування пристрою гідроімпульсної дії для дегазації пласта через довгі свердловини на СП «Шахта ім. Баранова» ПАТ «Краснодонвугілля» від 14 серпня 2011 р.

4. «Доповнення до «Паспорту східної похилої лави № 24 пл. i_3^1 гор. 915 м при проведенні 25 -го східного штреку» СП «Ш/у «Суходільське-Східне» ПАТ «Краснодонвугілля» від 15 серпня 2010 р. (Протокол приймання результатів випробувань... від 20 січня 2011р. і акт впровадження від 6 липня 2014 р.).

5. «Методика... від 6 січня 2011 р.» і «Доповнення до «Технологічної проектної документації ...» при проведенні 33-го східного ходка пл. k_2^H гор. 617 м

«Ш/у «Молодогвардійське» від 4 травня 2011 р. (Протокол приймання результатів випробувань... від 26 січня 2012 р. і акт впровадження від 6 липня 2014 р.).

6. «Доповнення до «Технологічної проектної документації проведення 25-го західного штреку» СП «Ш/у «Суходільське-Східне» від 14 серпня 2012 р. (Акт впровадження від 6 липня 2014 р.).

7. «Доповнення до «Технологічної проектної документації 3-х підготовчих виробок комбайнами в умовах пластів i_3^I і k_2^H «Ш/у «Молодогвардійське» ПАТ «Краснодонвугілля» від 25 грудня 2012 р., від 1 серпня 2013 р., від 14 січня 2014 р. (Акт впровадження від 6 липня 2014 р.).

8. «Технічне завдання на дослідно-конструкторську роботу «Пристрій для гідроімпульсної дії на вугільний пласт», що розроблено ІГТМ НАН України спільно з ТОВ «Теплогірській завод гідрообладнання» для промислового освоєння від 29 липня 2014 р.

9. Економічний ефект, що очікується від впровадження імпульсного гідророзпушування газоносних викидонебезпечних вугільних пластів при проведенні підготовчих пластових виробок комбайном на шахтах ПАТ «Краснодонвугілля» складає до 0,7 млрд грн/рік в цінах 2014 р. («Розрахунок очікуваної економічної ефективності від вживання імпульсного гідророзпушування вугільних пластів при проведенні виробок комбайнами на шахтах ПАТ «Краснодонвугілля» - Краснодон, 2014 р., затверджений генеральним директором товариства 14 08 20014 р).

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується коректністю постановки задач; використанням випробуваних законів механіки тіла, що деформується; високим ступенем збіжності результатів, які отримані за розробленими методами розрахунку параметрів діаграм «нормальне напруження – повздовжня деформація» при одноосьовому стискуванні зразків гірських порід з відносною похибкою розрахунку в межах 0,14-0,21, коефіцієнтом варіації – в межах 0,147-0,22 при надійності результатів в межах 93-99%; розкриттям особливостей формування позамежних кривих руйнування зразків гірських порід при їх роздавленні залежно від показників їх властивостей; збігом аналітичної епюри гірського тиску у вигляді квадратичної функції з експериментальною; підтвердженням методу розрахунку параметрів розвантаження пластів при відносній похибці в 0,15-0,25 розрахункових величин розвантаження з експериментальними даними Макіївського науково-дослідного інституту (МакНДІ); встановленням зниження несучої здатності газоносних вугільних пластів при їх імпульсному гідророзпушуванні у порівнянні зі статичним; результатами гірничо-експериментальних робіт з гідророзпушування газоносних вугільних пластів, що підтвердили теоретично передбачене збільшення в 1,3-1,5 рази зони розвантаження пластів при їх гідроімпульсній обробці у порівнянні зі статичною і підвищення добової швидкості проведення пластових підготовчих виробок з 3,0 до 6,0 – 7,0 м у викидонебезпечних вугільних пластах; використанням стандартних приладів, типової апаратури і методів вимірювань.

Особистий внесок автора. Автором самостійно сформульована наукова проблема, мета роботи і задачі досліджень, наукові положення, висновки й рекомендації з їх практичної реалізації; розроблено математичні моделі формування напружень у вершинах тріщин; методи і методики розрахунку межі міцності на стиск та побудови діаграм «нормальне напруження – подовжня деформація» об'єктів гірських порід. Розроблено аналітичні методи розрахунку епюри опорного гірського тиску і несучої здатності привибійної частини вугільних пластів. Розроблено методи розрахунку параметрів розвантаження привибійної частини газонесних вугільних пластів при статичному та імпульсному гідророзпусуванні. Автор брав безпосередню участь в проведенні гірничо-експериментальних робіт на шахтах ПАТ «Краснодонвугілля» разом із співробітниками ІГТМ НАН України, МакНДІ і технічного персоналу шахт ПАТ «Краснодонвугілля». Текст дисертації і автореферату викладено автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертації доповідалися на Міжнародних конференціях і наукових школах, зокрема Міжнародній науковій конференції «Гірська геологія, геомеханіка і маркшейдерія» (м. Донецьк, 11–15.10.2004), Міжнародній науковій школі «Деформація і руйнування матеріалів з дефектами і динамічні явища в гірських породах і виробках» (м. Сімферополь: Тавріч. нац. ун-т, 21-27.09.2009 р., 20-26.09.2010 р., 19-25.09.2011 р., 17-23.09.2012 р., 23-29.09.2013 р., 21-27.09.2015 р.), на засіданнях Центральної комісії із питань вентиляції і боротьби з газодинамічними явищами в шахтах (м. Макіївка, від 22.12.2010 р., від 10.07.2012 р.), Придніпровському науковому семінарі «Обробка металів тиском» (м. Дніпропетровськ, 03.03.2014 р.), науковому семінарі «Актуальні проблеми механіки деформованих тіл і конструкцій» (м. Дніпро, Нац. унів-т, 21.09.2016 р.), Міжнародній науково-технічній конф. "Форум гірників" (м. Дніпро, НГУ, 5-8.10.2016 р., 4-7.10.2017 р., 10-13.10.2018 р.), International Conference Essays of Mining Science and Practice (Dnipro, Ukraine, June 25-27, 2019).

Публікації. Основний зміст роботи опубліковано в 59 наукових працях, з яких в одній монографії, 23 в спеціальних виданнях України і 6 у виданнях, що входять в міжнародні наукометричні бази, 4 в спеціальних виданнях за кордоном України. Одержано 5 патентів України. 9 робіт опубліковано без співавторів.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел з 202 найменувань на 24 сторінках, містить 373 сторінки машинописного тексту, включає 11 таблиць, 91 рисунка (основна частина 260 сторінок), 26 додатків на 53 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі проаналізовані дослідження в області розв'язання проблем керування напружено-деформованим станом (НДС) масивів гірських порід і оцінки їх несучої здатності в процесі руйнування поблизу виробок. Керування НДС масивів гірських порід в процесі деформації направлено на

розв'язання двох протилежних проблем: на підвищення стійкості підземних виробок і зниження несучої здатності – розвантаження привибійної частини вугільних пластів з метою запобігання раптовим викидам вугілля і газу у вироблений простір. Найбільший внесок в розв'язання проблем запобігання раптовим викидам внесли вчені Франції, України, Росії, Китаю, Польщі та ін. країн. Провідні позиції на Україні в питаннях безпеки гірських робіт займають Макіївський науково-дослідний інститут (МакНДІ), ІГТМ і ІФГП НАН України, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Донецький технічний університет МОН України та ін. Ними розроблено більше десяти локальних способів запобігання раптовим викидам, серед яких найпоширенішим є спосіб гідророзпушування. Всі локальні способи засновані на розвантаженні пластів від гірського тиску.

Проте дотепер не розроблені аналітичні методи, що дозволяють з високим ступенем достовірністю забезпечити розрахунок параметрів розвантаження і оцінити рівень її ефективності. Особливо актуальні ці методи при розробці нових локальних способів запобігання раптовим викидам вугілля і газу для визначення їх ефективності. Методи розрахунку параметрів розвантаження газонесних вугільних пластів повинні бути розроблені на реальному механізмі гідророзпушування. Проте відомі описи механізмів недостатньо глибоко відображають внутрішні процеси гідророзпушування. Так, по А.А. Борисенку при гідророзпушуванні руйнування пласта як таке не відбувається. Співробітники МакНДІ, навпаки, вважають, що механізм гідророзпушування полягає в руйнуванні вугілля усередині масиву і деформації його у бік виробки під впливом високонапірного нагнітання води і гірського тиску з утворенням тріщинного колектора, що викликає зниження несучої здатності (розвантаження) і дегазацію привибійної частини пласта. Цей опис механізму, на наш погляд, ближче до реального. Але він не підкріплений математичною моделлю, заснованою на достовірному критерії міцності порід, що дозволяє розкрити процес формування внутрішнього локального утворення в пластах тріщин і визначити несучу здатність привибійної частини цих пластів.

Аналіз літературних джерел показав, що найефективнішою базою для вдосконалення методів розрахунку параметрів розвантаження вугільних пластів є заснований на межі міцності вугілля зсуву, яка не залежить від масштабного ефекту, критерій міцності Кулона, доповнений урахуванням контактної тертя між пластом і бічними породами і тиску газу. На підставі проведеного аналізу сформульована проблема, мета і поставлені задачі, які були розв'язані в процесі виконання дисертаційної роботи.

У *другому розділі* обґрунтовані закономірності розподілу контактних і внутрішніх напружень тіла, що деформується і руйнується, з урахуванням його геометричних розмірів і показників внутрішнього і контактної тертя. Перш, ніж перейти до розробки методу побудови поза межних кривих руйнування зразків і розрахунку несучої здатності (межі міцності) масивів гірських порід при їх стисненні, вивчимо закономірності розподілу в них контактних і внутрішніх нормальних і дотичних напружень. Для визначення напружень у вершинах

тріщин потрібне знання функцій контактних нормальних $\sigma_y(x)$ і дотичних $\tau_k(x)$ напружень, конкретної закономірності розподілу нормальних і дотичних напружень в будь-якій точці тіла. Є.П. Унксовим отримано, що на контактній поверхні нормальні напруження σ_{y_i} описується рівнянням (рис. 1)

$$\sigma_{y_i} = \sigma_{y_0} \exp\left(\frac{2f_k \cdot x}{h_1}\right), \text{ Па,} \quad (1)$$

де σ_{y_0} – нормальне напруження в кутовій точці тіла, що деформується, Па; f_k – коефіцієнт контактного тертя; h_1 – висота тіла, що деформується, м; x – абсциса точки на контактній поверхні, м.

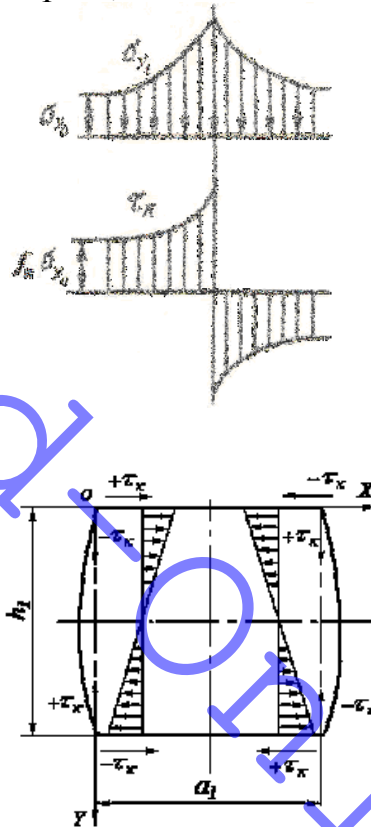


Рисунок 1 – Епюри контактних нормальних σ_y і внутрішніх дотичних τ_k напружень при $\tau_k = f_k \cdot \sigma_{y_i}$ за Є.П. Унксовим

Тоді питоме контактне зусилля за довжиною зразку

$$p = \sigma_{y_0} \frac{h_1}{f_k a_1} \left(\exp\left(\frac{f_k a_1}{h_1}\right) - 1 \right). \quad (2)$$

Другу закономірність розподілу контактних напружень (рис. 2) запропонував Л. Прандтль: дотичні напруження приймаються постійними, нормальні – лінійними згідно формулі

$$\sigma_{y_i} = \sigma_{y_0} \left(1 + \frac{2f_k \cdot x}{h} \right). \quad (3)$$

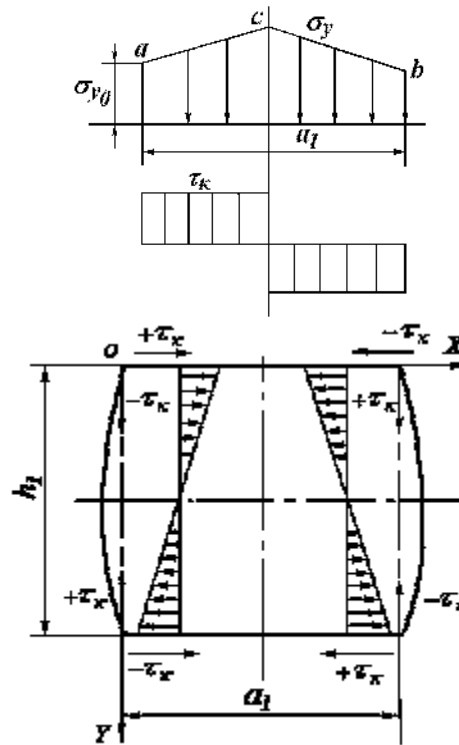


Рисунок 2 – Епюри контактних нормальних σ_y і дотичних τ_k напружень за Л. Прандтлем

Тоді питоме контактне зусилля за довжиною зразку

$$p = \sigma_{y0} \left(1 + \frac{f_k \cdot a_1}{2 \cdot h_1} \right). \quad (4)$$

В галузі прикладної механіки деформівного твердого тіла напруження τ_k приймаються рівними k_n . В області обробки металів тиском, наприклад, цього достатньо, оскільки автори обмежують своє розв'язання визначенням максимально можливого питомого тиску деформації. Проте напруження τ_k , як правило, не рівні k_n . Тим більше ці напруження не рівні k_n стосовно гірських порід. Автори у галузі прикладної механіки деформівного твердого тіла замість σ_{y0} приймають експериментальну межу плину σ_s . Ми прийматимемо в якості σ_{y0} мінімальне нормальне напруження σ_{ξ} , при якому утворюється тріщина. Перед нами стоїть задача оцінити ступінь руйнування зразка і масиву гірських порід, побудувати епюри напружень на поверхні і визначити напруження всередині їх, що дуже важливо для побудови діаграм «напруження-деформація».

Особливістю пружного стану тіла, об'єм якого передбачається постійним, є те, що загасання контактних зсувних напружень від місць докладання навантажень відбувається згідно принципу Сен-Венана. Контактне дотичне напруження $\tau_k = \tau_{xy}$ у міру віддалення від кожної з контактних поверхонь по абсолютній величині зменшуватиметься і при $y = 0,5 h_1$ досягне нуля (рис. 1) і (рис. 2).

Тоді дотичне напруження уздовж подовжньої вісі тіла

$$\tau_{xy} = \tau_k \left(1 - \frac{2y}{h_1} \right). \quad (5)$$

Контактне дотичне напруження згідно закону Кулона-Амонтона

$$\tau_k = f_k \cdot \sigma_y. \quad (6)$$

Тому з припущення, що загасання контактних дотичних напружень від тертя уздовж подовжньої вісі відбувається по лінійному закону, на підставі виразу (1) з використанням рівнянь (5) і (6) можемо за Є.П. Унксовим записати, що внутрішні дотичні напруження визначаються за формулою,

$$\tau_{xy} = \tau_k \left(1 - \frac{2y}{h_1}\right) = f_k \sigma_{y\xi} \left(1 - \frac{2y}{h_1}\right) \exp\left(\frac{2f_k \cdot x}{h_1}\right), \quad (7)$$

а за Л. Прандтлем на підставі виразу (3) з використанням рівнянь (5) і (6) – за формулою

$$\tau_{xy} = \tau_k \left(1 - \frac{2y}{h_1}\right) = f_k \sigma_{y0} \left(1 - \frac{2y}{h_1}\right) \left(1 + \frac{2f_k \cdot x}{h_1}\right). \quad (8)$$

Важливо відзначити, що приведені рівняння (1) - (8) містять геометричні розміри досліджуваних об'єктів, що дозволяє переносити результати розрахунку параметрів зразка гірської породи відповідно до закономірностей на привибійну частину вугільних пластів будь-яких розмірів, виключивши вплив масштабного геометричного ефекту.

В кутовій точці по осі ординат виникає дотримання закону парності дотичних напружень через випуклість вільних (внаслідок бочкоутворення) поверхонь. Є.М. Макушок із цього приводу пише, що одиничний зміщений об'єм для чверті перетину вибучує вільну поверхню, яка утворює "бочку" з кутом φ_δ між дотичною до бочки і початковою вільною поверхнею, і бочка при деформації утворюється завжди.

У *третьому розділі* розроблений метод розрахунку параметрів граничного стану матеріалу в локальній області крихкого тіла з урахуванням внутрішнього і контактного тертя в процесі його поза межного деформування на підставі критерію міцності Кулона

$$\tau_e = |\tau_\alpha| - \mu \sigma_\alpha, \quad (9)$$

де τ_e – ефективне дотичне напруження на траєкторії максимальних ефективних дотичних напружень (ТМЕДН), Па; τ_α і σ_α – активні дотичне і нормальне напруження на ТМЕДН з урахуванням контактного (зовнішнього) тертя і з використанням системи рівнянь на косих майданчиках, Па.

ТМЕДН – це лінія, яка в кожній своїй точці доторкається майданчика максимального дотичного напруження. На наш погляд, в процесі деформації пластичних і крихких матеріалів лежить єдиний послідовний процес, заснований на критерії ефективних дотичних напружень, який, зрештою, веде до механічного руйнування унаслідок концентрації напружень в тілі. Теоретичну основу цього підходу складає теорія ліній ковзання, що базується на використанні макромеханізму розвитку зсуву по ТМЕДН. Перш ніж підійти до визначення несучої здатності масивів гірських порід, були розроблені методи розрахунку межі міцності і залишкової міцності чотирьох відомих форм руйнування зразків гірських порід, які були перевірені на достовірність по наших і численних експериментальних даних по кадастру фізичних властивостей порід і результатам ба-

$$\sigma_{y\xi(\eta)} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{k_n \cdot \left(1 + \sin \rho \sqrt{1 - b_{\xi(\eta)}^2}\right) \cdot \exp(2\mu(\beta_{\xi(\eta)} + \beta_{b(d)}))}{1 - \sin \rho \sqrt{1 - b_{b(d)}^2}} - k_{b(d)} \right), \quad (12)$$

$$k_{b(d)} = \frac{k_n \cdot \left(1 - \sin \rho \sqrt{1 - b_{\xi(\eta)}^2}\right)}{\left(\left(1 + \sin \rho \sqrt{1 - b_{b(d)}^2}\right) \exp(4\mu\beta_{b(d)})\right)}, \quad (13)$$

де згідно розподілу контактних нормальних напружень за Л. Прандтлем

$$b_{\xi(\eta)} = \pm \frac{f_{\kappa} \cdot \left(1 - \frac{2y}{h}\right) \cdot \sigma_{y\xi(\eta)} \cdot \left(1 + \frac{2f_{\kappa}}{h} x_{\xi(\eta)}\right)}{k_n + \mu \cdot \sigma_{y\xi(\eta)}}; \quad (14)$$

$$b_{b(d)} = - \frac{f_{\kappa} \cdot \sigma_{y\xi(\eta)} \cdot \left(1 + \frac{2f_{\kappa}}{h} x_{b(d)}\right)}{k_{b(d)} + \mu \cdot \sigma_{y\xi(\eta)}}; \quad (15)$$

$$\beta_{\xi(\eta)} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{b_{\xi(\eta)} \cos \rho}{\sin \rho - \sqrt{1 - b_{\xi(\eta)}^2}}; \quad (16)$$

$$\beta_{b(d)} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{b_{b(d)} \cos \rho}{\sin \rho - \sqrt{1 - b_{b(d)}^2}}. \quad (17)$$

Кут нахилу лівої ТМЕДН ξ_l

$$\alpha_{\xi} = \frac{\pi}{4} + \rho/2 + \beta_{\xi}; \quad (18)$$

лівої ТМЕДН η_l

$$\alpha_{\eta} = \frac{7\pi}{4} - \rho/2 - \beta_{\eta}, \quad (19)$$

де $\beta_{\xi(\eta)}$ і $\beta_{b(d)}$ – кут повороту від контактної тертя на ТМЕДН ξ або η і в точці b (або d), рад. Верхні знаки у формулах (12)-(15) відносяться до ТМЕДН ξ , нижні – до ТМЕДН η .

Для розрахунку σ_y ми маємо систему рівнянь при 12 параметрах, з яких три експериментальні характеристики породи (k_n , μ , f_{κ}) і два вимірювані геометричні параметри зразку (a_l , h_l). Значення дотичного напруження $k_{b(d)}$ визначається за умови розвитку ТМЕДН ξ з точки b в точку a (або з точки d в точку c). Ця умова забезпечує локальність руйнування матеріалу у вершині тріщини, тобто $k_{b(d)} < k_n$ у точці $b(d)$. У локальній області, наприклад в точці a або c , ефективні дотичні напруження $\tau_e \geq k_n$, де k_n – межа опору матеріалу зсуву. В інших точках на ТМЕДН матеріал знаходиться в пружному стані, тобто $k_{b(d)} = k < k_n$. У момент приходу тріщини в точку b (або d) ефективне дотичне напруження $k_{b(d)}$ стає рівним k_n .

Розв'язання системи рівнянь дозволяє затверджувати, що утворення і розвиток тріщин в гірських породах відбувається шляхом їх локального руйнуван-

ня від граничних ефективних дотичних напружень, що формуються згідно критерію міцності Кулона, який доповнений урахуванням параметрів контактної тертя від 0,5 -0,55 до 0, та ефективних дотичних напружень, що не досягають межі міцності зсуву порід в точках виходу їх траєкторій на граничну поверхню, що буде в подальшому підтверджено на підставі збіжності теорії з експериментальними даними руйнування зразків гірських порід. Попутно відзначимо, що висловлена система рівнянь заснована на розв'язанні рівності (11). З цього виходить, що представляється можливим розробити методи розрахунку руйнування зразків гірських порід за різних конкретних умов їх стискання, що полягають в урахуванні значень опору матеріалу зсуву у вершині тріщини і ефективного дотичного напруження, що не досягає цього значення в зоні оборотних деформацій матеріалу, і кутів повороту ТМЕДН, що виникають за рахунок дії контактної тертя. Вперше розроблено методи розрахунку параметрів траєкторій тріщин, що розвиваються в гірських породах, і значень граничних нормальних напружень в їх вершинах Система рівнянь з урахуванням закономірностей розподілу контактних і внутрішніх напружень тіла, що деформується, в четвертому розділі доведена до практичного використання в гірничій справі.

У четвертому розділі розроблена математична модель діаграм «нормальне напруження – подовжня деформація» і методи визначення несучої здатності зразків гірських порід, засновані на визначенні локальних напружень у вершинах тріщин і розрахунку параметрів частини площі зразків, що виходить з-під навантаження у міру розвитку цих тріщин по ТМЕДН. Початковими параметрами моделі є k_n, μ, f_k, E – модуль пружності матеріалу. Побудова діаграм «нормальне напруження – подовжня деформація» зразків гірських порід здійснюється за системою рівнянь

$$\varepsilon = \frac{p}{E}, \quad (20)$$

$$\sigma_c = p \cdot S, \quad (21)$$

де ε – подовжня деформація; $p = 2\sigma_y \int_0^{(0,5a_1-x)} \frac{\sigma(x)dx}{a_i}$ – питоме зусилля,

Па; де $\sigma(x)$ – функція розподілу контактних нормальних напружень, Па; $S = \frac{a_i}{a_1}$;

a_i – поточне значення довжини несучої частини, м.

Нормальні напруження σ_y у вершині тріщини при розвитку її по ТМЕДН ξ для усічено-клинової форми руйнування зразків (рис. 1) визначаються за формулами (11)-(17).

У окремому даному випадку приймаємо $a_1 = h_1$. Питома зусилля за Л. Прандтлем при розвитку двох тріщин по ТМЕДН ξ_l и ξ_n

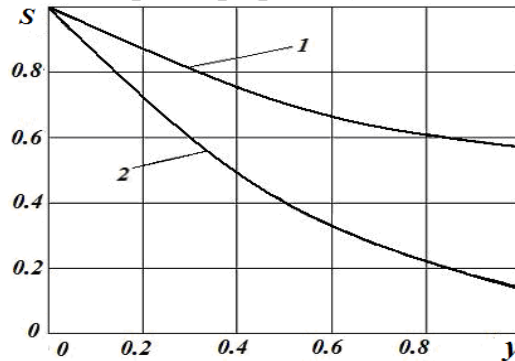
$$p = \frac{2\sigma_{y\xi}}{a_1 - 2x_\xi} \left(\int_0^{t_x} \left(1 + \frac{2f_k \cdot t_x}{h_1} \right) dt_x \right) = \frac{\sigma_{y\xi}}{a_1 - 2x_\xi} \left(1 + \frac{f_k(a_1 - 2x_\xi)}{h_1} \right), \quad (22)$$

де $t_x = (0,5a_1 - x_\xi)$ – поточні значення абсциси вершини тріщини на ТМЕДН ξ , м; x_ξ – абсциса вершини тріщини, м.

Відносне значення одиничної площі несучого майданчика для двох тріщин

$$S = \frac{a_1 - 2x_\xi}{a_1}, \quad (23)$$

Тепер будемо залежності відносного несучого майданчика для ТМЕДН ξ від ординати (рис. 4) при $k_n=10$ МПа і $\mu=1,0$ для однієї ТМЕДН ξ і двох ТМЕДН ξ . Залежності мають спадаючий характер (рис. 4).



1 – для однієї ТМЕДН ξ , 2 – для двох ТМЕДН ξ

Рисунок 4 – Залежності відносного несучого майданчика від ординати при постійному контактному напруженні τ_k і його лінійному загасанні всередині зразка

Будемо за формулами (12) – (22) залежності вертикальних, горизонтальних, дотичних напружень, питомого зусилля від ординати (рис. 5). Залежності мають зростаючий характер.

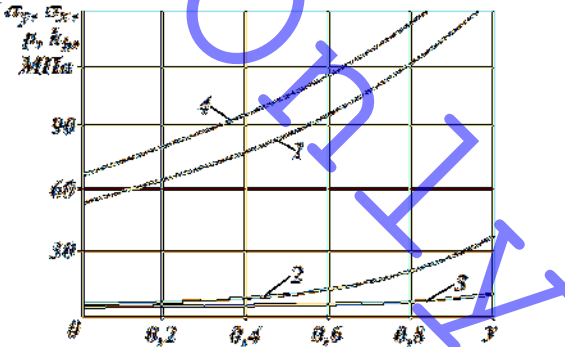


Рисунок 5 – Залежності вертикальних (1), горизонтальних (2), дотичних напружень (3), питомого зусилля (4) від ординати y при постійному контактному напруженні τ_k і його лінійному загасанні всередині зразка

Разом з цим приведена залежність ефективного дотичного напруження, підрахована за формулою (13). Ця залежність має зростаючий характер до тих пір, поки k_b не порівняється з k_n . Використовуючи (20) - (23) на підставі системи рівнянь (10) – (18) будемо поза межні діаграми. Для підтвердження достовірності розрахунку поза межних кривих були взяті для ілюстрації з книги А.М. Ставрогіна та А.Г. Протосені чотири експериментальні діаграми «напруження

– поздовжня деформація» (рис. 6). Так встановлено, що експериментальна діаграма 1 апроксимується з розрахунковою діаграмою 2 при $k_n = 60$ МПа, $\mu = 1,0$, $f_k = 0,02$, $E = 5,1 \cdot 10^4$ МПа, експериментальна діаграма 3 – з розрахунковою діаграмою 4 при $k_n = 69$ МПа, $\mu = 1,0$, $f_k = 0,02$, $E = 5,8 \cdot 10^3$ МПа; експериментальна діаграма 5 – з розрахунковою діаграмою 6 при $k_n = 59$ МПа, $\mu = 1,0$, $f_k = 0,02$, $E = 5,9 \cdot 10^3$ МПа, експериментальна діаграма 7 – з розрахунковою діаграмою 8 при $k_n = 15$ МПа, $\mu = 1,0$, $f_k = 0,35$, $E = 3,5 \cdot 10^3$ МПа.

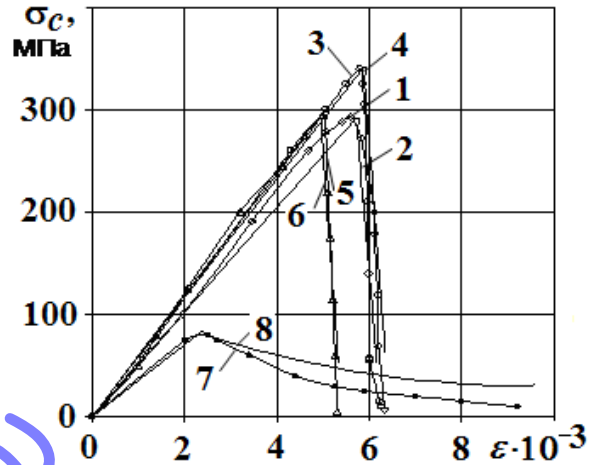
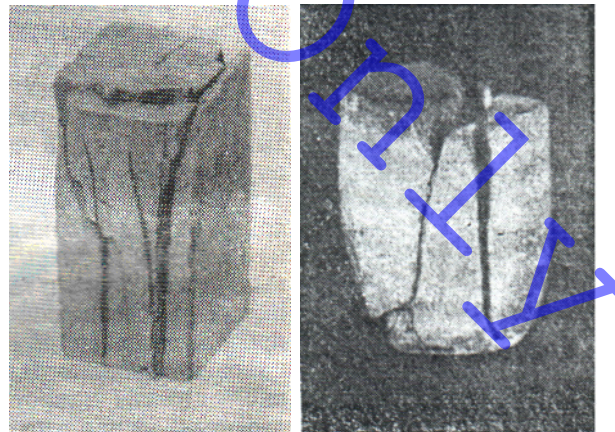


Рисунок 6 – Діаграми «напруження – поздовжня деформація»

Як видно, збіжність вища, ніж задовільна.

На закінчення приведемо експериментальні спостереження (рис. 7) формування усіченого клину для візуального зіставлення.



а)

б)

а) – за А.Н. Зориним; б) – за Л.І. Бароном

Рисунок 7 – Експериментальна усічено - клинова форма руйнування

На підставі розробленого методу розкритий механізм утворення чотирьох форм (усічено-клинова, клинова, діагональна, поздовжня) руйнування зразків гірських порід, що полягає у взаємозв'язку параметрів контактних нормальних і дотичних напружень на ТМЕДН і геометрії виходу цих траєкторій на вертикальну вісь симетрії зразків. Зіставлення розрахункових даних з експерименталь-

ними проводилося по даним, запозиченими з кадастру гірських порід.

Усічено-клинова форма руйнування утворюється при високих значеннях кутів внутрішнього тертя ($\rho > 40^\circ$) і невисоких значеннях зовнішнього тертя ($f_k < 0,35$). Поза межні криві усічено-клинової форми діаграм «напруження – подовжня деформація» мають, в основному, низхідний характер. Відносна погрішність розрахунку рівна 0,177, коефіцієнт варіації – 0,162 при надійності результатів для 22 дослідів у 99 %, що свідчить про хорошу збіжність для гірських порід.

Клинова форма утворюється при невисоких значеннях внутрішнього ($\rho \leq 39^\circ$) і зовнішнього ($0,2 < f_k < 0,35$) тертя. Поза межні криві клинової форми руйнування мають висхідний характер з подальшим зниженням міцності. Відносна похибка розрахунку дорівнює 0,14, коефіцієнт варіації – 0,147 при надійності результатів для 17 дослідів у 98%.

Діагональна форма руйнування утворюється при малих значеннях коефіцієнтів внутрішнього ($\rho \leq 20^\circ$) і зовнішнього ($f_k < 0,17$) тертя по механізми клинової форми руйнування. Відносна похибка розрахунку рівна 0,21, коефіцієнт варіації – 0,22 при надійності результатів для 13 дослідів у 99%.

Подовжня форма руйнування зразків гірських порід утворюється за рахунок дотичних напружень унаслідок сумарної дії внутрішнього і зовнішнього тертя порід при куті нахилу ТМЕКН, що перевищує $\frac{\pi}{2}$. Відносна погрішність розрахунку рівна 0,161, коефіцієнт варіації – 0,149 при надійності результатів для 7 дослідів близько 93%.

У *п'ятому розділі* методи визначення несучої здатності зразків гірських порід перенесені на масиви вугільних пластів. Перенесення забезпечується урахуванням геометричних параметрів тіла, що деформується, у формулах (1), (2), (9)-(18).

З усіх форм руйнування зразків до вугільного пласту найбільш застосовна усічено-клинова форма руйнування зразка при розвитку однієї привибійної тріщини. Врахуємо при цьому відому в механіці тіла, що деформується, лінійну закономірність загасання контактних дотичних напружень у міру віддалення від місць їх концентрації за Сен-Венаном і підтверджену Г.І. Грицком і Б.В. Власенком стосовно вугільного пласта на підставі експериментальних профільних зсувів покрівлі пластів. Апроксимуємо прямою лінією залежність контактних дотичних напружень між пластом та бічними породами згідно (3)

$$\tau_k = f_k (1 - t_l \cdot l) \cdot \sigma_{y_i}, \quad (24)$$

де t_l – коефіцієнт загасання контактних дотичних напружень уздовж кромки вугільного пласта в напрямі від вибою до зони незайманого масиву; l – віддалення точки, яку досліджуємо, від вибою, м; σ_{y_i} – поточне значення контактних нормальних напружень, Па.

Приймемо, що $t_l = \frac{1}{l_m} = 0,1$, де $l_m = 10,0$ м – довжина опорної зони.

Значення t_l приймається за умови $\tau_k = 0$ в зоні незайманого масиву. Тоді згідно за Л. Прандтлем

$$\sigma_{y_i} = \sigma_{y_\xi} \left(1 + f_k \frac{(1 - t_l l) l}{h} \right), \quad (25)$$

де h – потужність пласта, м.

У зоні незайманого масиву приймається, що $\sigma_{y_i} = \gamma H$, де γ – питома вага вище розміщених порід, Н/м^3 ; H – висота стовпа порід, м.

Запропоновано механізм формування привантаження привибійної частини вугільного пласта, який полягає у лінійному загасанні від кромки вибою у глибину масиву дотичних напружень від контактної тертя від 0,5 - 0,55 до 0 між пластом і вміщуючими породами, що дозволило описати експериментальну епюру гірського тиску, яка описується опуклою квадратичною функцією, початкове значення якої дорівнює нормальному напруженню σ_{y_ξ} у вершині привибійної тріщини, а кінцеве – гірському тиску γH в зоні незайманого масиву на відстані від вибою l_m .

Проводилися виміри коефіцієнтів зовнішнього тертя f_k для пари вугілля – піскуватий сланець покрівлі із вибоїв пластів i_3^l і k_2^H ПАТ «Краснодонвугілля», які дорівнюють 0,5-0,55. Значення коефіцієнта і кута внутрішнього тертя проб вугілля з пласта i_3^l по нашаруванню і перпендикулярно нашаруванню складають $\mu = 0,98$ і $1,0$ та $\rho = 42^\circ$ і 45° відповідно, межа опору вугілля зсуву по нашаруванню складає $k_n = 0,6-0,7$ МПа, перпендикулярно нашаруванню $k_n = 1,5-1,85$ МПа. Значення коефіцієнта і кута внутрішнього тертя проб вугілля пласта k_2^H складають перпендикулярно нашаруванню $\mu = 0,80$ і $\rho = 39^\circ$. Межа опору зсуву перпендикулярно нашаруванню $k_n = 1,27-1,4$ МПа. Для порівняння аналітичної епюри опорного гірського тиску з експериментальною запозичимо останню з книги А.А. Борисова (рис. 8).

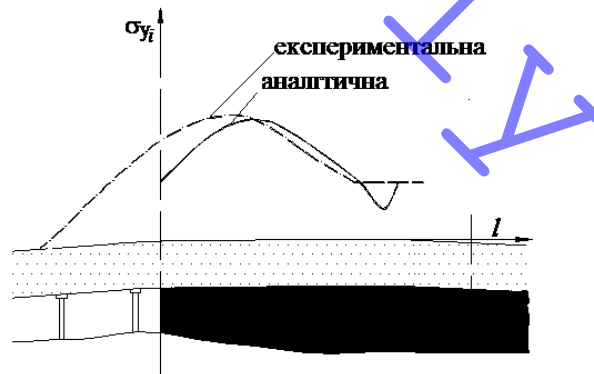
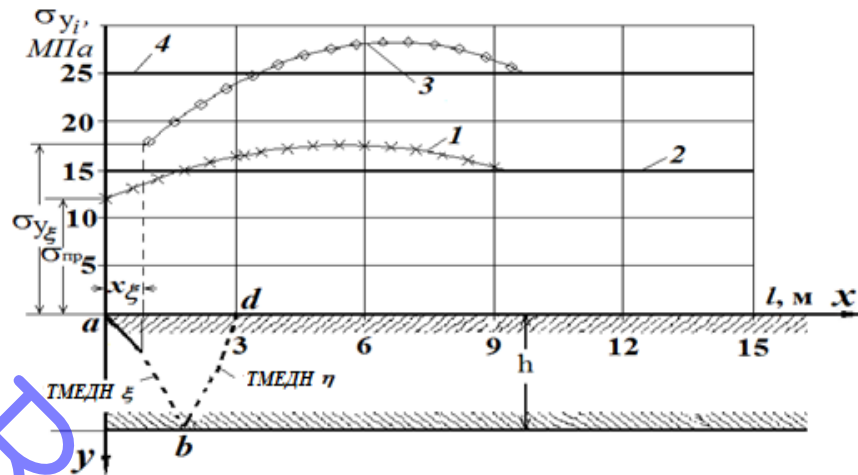


Рисунок 8 – Порівняння аналітичної епюри гірського тиску з експериментальною по А.А. Борисову

На рис. 9 приведені орієнтовні епюри опорного гірського тиску на вугільний пласт для прохідницьких вибоїв СП «Ш/у «Молодогвардійське» ($\gamma H = 15,0$ МПа) і «Ш/у «Суходільське-Східне» ($\gamma H = 25,0$ МПа) ПАТ «Красно-

донвугілля» при високих значеннях показників властивостей вугілля для пласта i_3^I ($k_n = 1,50$ МПа, $\rho = 43^\circ$, $f_k = 0,5$) і потужністю $h = 1,50$.



1 – «Ш/у «Молодогвардійське»; 2 – $\gamma H = 15$ МПа;
3 – «Ш/у «Суходільське-Східне»; 4 – $\gamma H = 25$ МПа

Рисунок 9 – Розрахункові залежності значення гірського тиску від відстані від вибою для шахт ПАТ «Краснодонвугілля»

У загальному вигляді епора перетинає горизонтальну лінію γH у двох точках (рис. 9). Близня точка визначає величину зони розвантаження, про що детально буде розглянуто в шостому розділі. Дальня точка перетину епюри з горизонтальною лінією γH визначає її довжину. По ТМЕДН ξ утворюється привибійна тріщина віджиму. Епюра опорного тиску зміщується в глибину масиву вугілля на величину абсциси x_ξ вершини тріщини в процесі її розвитку.

Тоді формула (25) має вигляд

$$\sigma_{y_i} = \sigma_{y_\xi} \left(1 + f_k \frac{(1 - t_l(l - x_\xi)) (l - x_\xi)}{h} \right) \quad (26)$$

Параметри для ТМЕДН ξ підраховуються відповідно формул (12)-(26). Визначимо довжину привантаженої зони – довжину епюри по відстані від вибою до дальньої точки перетину епюри з горизонтальною лінією γH . З перетворення формули (26) одержуємо формулу для розрахунку довжини епюри

$$l_m = \frac{1}{2t_l} + x_\xi + \frac{\sqrt{2x_\xi t_l - \frac{4t_l \cdot h}{f_k} \left(\frac{\gamma H}{\sigma_{y_\xi}} - 1 \right)}}{2t_l} \quad (27)$$

Для пласта з показниками вугілля $k_n = 1,5$ МПа, $\rho = 45^\circ$, $h = 2,0$ м, $f_k = 0,5$ довжина епюри для глибини залягання пласта в 600 м «Ш/у «Молодогвардійське» при $\gamma H = 15,0$ МПа (рис.8, пряма 2) дорівнює 8,8 м, для глибини залягання пласта в 1000 м «Ш/у «Суходільське-Східне» при $\gamma H = 25,0$ МПа (рис. 8, пряма

4) дорівнює 9,50 м. При утворенні тріщини по ТМЕДН ξ утворюється консоль завдовжки x_ξ оскільки привибійна частина пласта на цю довжину вийшла з-під навантаження. Тоді несуча здатність привибійної частини пласта з урахуванням консолі x_ξ визначається за формулою

$$\sigma_c = \sigma_{y_\xi} \left(1 + \frac{f_k \cdot (l_m - x_\xi)}{2h} - \frac{f_k \cdot t_l \cdot (l_m - x_\xi)^2}{3h} \right) \frac{(l_m - x_\xi)}{l_m}. \quad (28)$$

Привибійна тріщина по ТМЕДН ξ (рис. 9) розвиватиметься до тих пір, поки несуча здатність, що визначена за формулою (28), не стане рівною γH . На рис. 10 приведені залежності несучої здатності від ординати привибійної тріщини, що розвивається.

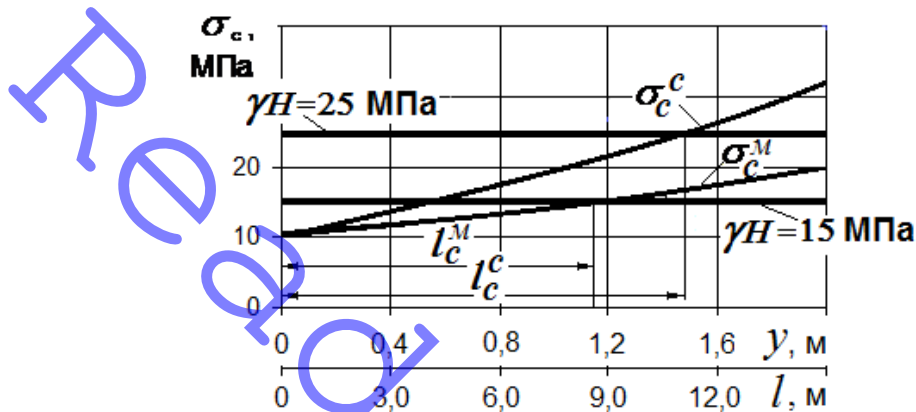


Рисунок 10 – Залежності несучої здатності вугільного пласта потужністю $h = 1,80$ м від ординати вершини тріщини

Тут же показані точки перетину з цими кривими ліній гірського тиску для згаданих шахтоуправлінь. Значення величини $\sigma_c = f(y)$, що перевищують значення $\gamma H = 25,0$ МПа, свідчать про запас несучої здатності пласта до умови, коли привибійна тріщина вийде на ґрунт пласту. Це означає, що при високих значеннях показників властивостей вугілля тріщина не дійде до ґрунту пласта навіть для глибини в 1000 м. Інші умови виникають, коли пласт має низькі значення показників властивостей вугілля. В дисертації для прикладу розглянутий цей випадок.

Більшість дослідників вважає, що основна причина раптових викидів вугілля і газу є наявність в пласту газу під тиском. Крім того, з практики відомо, що газонасичення вугілля знижує його міцність. Але останнє явище аналітично не описано. Спробуємо заповнити цей пропуск. Тому в системі рівнянь (12) і (13) для розрахунку σ_{y_ξ} врахуємо зміну тиску газу відповідно за експериментальною формулою

$$\sigma_g = 1,0885 + 1,03l. \quad (29)$$

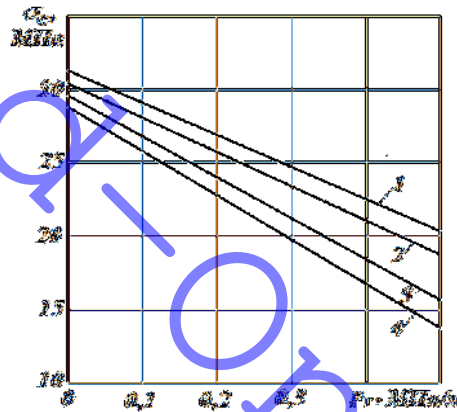
В горизонтальному напрямі тиск газу створює у вершині тріщини розтягуючі напруження. За методами, висловленими раніше, на підставі системи рівнянь (12, 13) виведемо нову систему рівнянь, що враховують тиск газу

$$\sigma_{y\xi} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\left((k_n - \mu\sigma_g) \left(1 + \sin\rho\sqrt{1-b_\xi^2} \right) - A \right) \exp(2\mu(\beta_\xi + \beta_b))}{1 - \sin\rho\sqrt{1-b_b^2}} - \left(k_b - \mu\sigma_g - \frac{A}{1 - \sin\rho\sqrt{1-b_b^2}} \right) \right]; \quad (30)$$

$$k_b = \left[\frac{\left((k_n - \mu\sigma_g + \mu\sigma_y) \left(1 - \sin\rho\sqrt{1-b_\xi^2} \right) - A \right)}{\left(1 + \sin\rho\sqrt{1-b_b^2} \right) \exp(4\mu\beta_b)} + \mu\sigma_g + \frac{A}{1 + \sin\rho\sqrt{1-b_b^2}} \right], \quad (31)$$

де $A = 0,5 \sigma_g \sin \rho \cos \rho$.

Розрахунок за формулами (29) – (31) з використанням формул (14) – (19) показує, що тиск газу в пласті значно знижує його несучу здатність привибійної частини (рис. 11).



Потужність пласта: 1 – 1,35 м; 2 – 1,5 м; 3 – 1,8 м; 4 – 2,0 м

Рисунок 11 – Залежності межі міцності привибійної частини газонесних вугільних пластів при $k_n=1,5$ МПа, $\rho=45^\circ$; $f_k=0,5$ від градієнта тиску газу

З цього виходить, що несуча здатність газонесного вугільного пласта визначається значенням межі зсуву вугілля, тиску в ньому газу від нуля до 5,0 МПа, горизонтальних стискаючих напружень бічного підпору, що виникають від контактної тертя між пластом і вміщуючими породами, і частини пласта, яка не вийшла з-під навантаження унаслідок утворення тріщин, і описується зростаючою експоненціальною функцією в межах від значення міцності вугілля на стиснення до 40,0 – 55,0 МПа. у залежності от показників фізико-механічних властивостей вугілля, потужності і глибини залягання пласта. Ця теза дозволяє пояснити явище підвищення міцності вугілля після його дегазації і зниженні міцності при його газонасиченні.

У шостому розділі висловлені теоретичні основи розрахунку параметрів розвантаження привибійної частини викидонебезпечних вугільних пластів при

гідророзпушуванні. Одним з головних параметрів способу гідророзпушування є глибина герметизації свердловини. Глибина герметизації, яку застосовують, складає 3-6 м. Мінімальна глибина герметизації, що допускається з умов виключення небезпечного гідровіджима, складає 3 м. В першу чергу для розрахунку глибини герметизації свердловин, що виключає небезпечний гідровіджим при реалізації способу, треба розрахувати величину зони розвантаження привибійної частини вугільних пластів від гірського тиску. Величина зони розвантаження від гірського тиску є величина зони, в якій вертикальні напруження від ваги порід перевищують значення епюри гірського тиску привибійної частини пласта. Визначається вона по відстані від забою до ближньої точки перетину епюри гірського тиску з лінією γH (рис. 12).

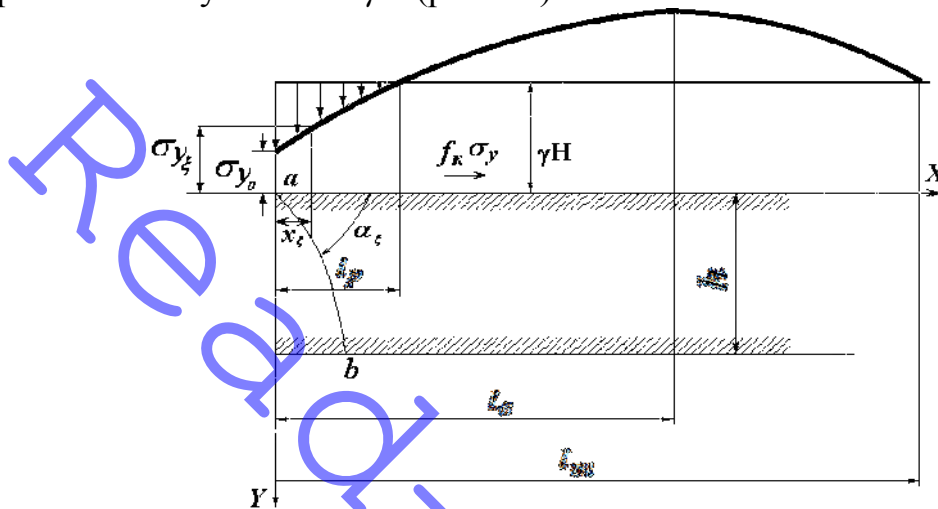


Рисунок 12 – Схема формування зони розвантаження привибійної частини пласта від гірського тиску

Сукупність формул (12) – (26) є методом розрахунку величини зони розвантаження привибійної частини від гірського тиску. Величина зони розвантаження на підставі виразу (26)

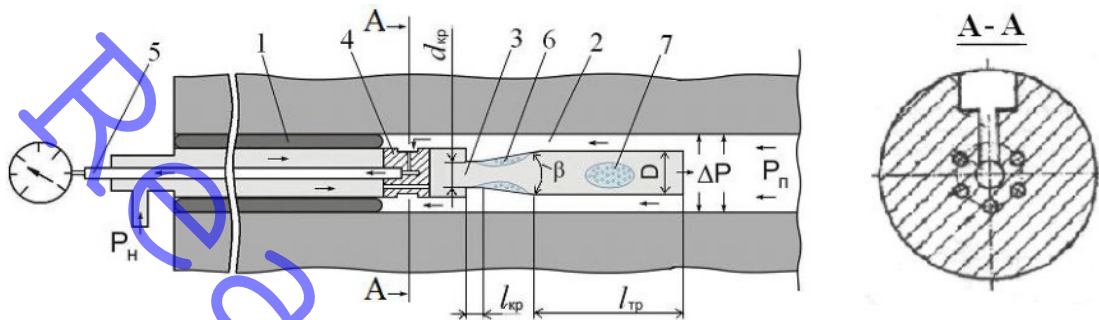
$$l_p = \frac{1}{2t_l} + x_{\xi} - \frac{\sqrt{2x_{\xi}t_l - \frac{4t_l \cdot h}{f_k} \left(\frac{\gamma H}{\sigma_{y_{\xi}}} - 1 \right)}}{2t_l} \quad (32)$$

З формули (32) витікає, що закономірності зміни величин зони розвантаження вугільного пласта описуються ірраціональною функцією: зростаючою від 1,0 до 7,0 м у залежності від потужності та глибини залягання і спадаючою – від 7,0 до 1,0 м у залежності від показників фізико-механічних властивостей вугілля пласта.

Використовуючи експериментальні дані МакНДІ ми провели оцінку рівня достовірності розроблених методів. МакНДІ розроблений метод граничного стану для визначення чисельних значень показників пластів: опору вугілля зсуву і коефіцієнта контактної тертя при знанні експериментальних значень величини зони розвантаження під дією гірського тиску, глибини залягання і потужності пласта. Порівняння результатів розрахунку показує, що середня похи-

бка розрахунку по запропонованому методу параметра k_n складає 16,8 %, по методу МакНДІ – 90 %.

У зв'язку із створенням з участю автора нового пристрою імпульсного гідророзпушування виникла необхідність на підставі запропонованого метода розрахунку несучої здатності вугільних пластів з урахуванням виразів (30)-(32) розробки математичної моделі розвантаження їх привибійної частини при нормативному і розробленому новому способу – імпульсному гідророзпушуванню з контролем і керуванням його режиму. Спосіб імпульсного гідророзпушування був реалізований занурювальним у вугільний пласт пристроєм (рис.13), що заснований на принципі періодично-зривної кавітації в перетинах трубопроводу типу трубки Вентурі і перетворює статичне нагнітання рідини в імпульсне.



1 – герметизатор скважини; 2 – фільтраційна частина свердловини; 3 – генератор кавітації; 4 – роздільник потоку рідини; 5 – зворотній канал для виміру тиску підпору рідини; 6 – кавітаційна каверна; 7 – частка каверни, яка відірвалася.

Рисунок 13 – Пристрій імпульсного гідророзпушування вугільних пластів, який розташований у свердловині

Численними дослідженнями інститутів ІТМ НАН України, Гірничої справи ім. О.О. Скочинського, Всеросійського науково-дослідного маршейдерського інституту і інш. встановлено, що міцність зразків гірських порід за рахунок вібродії знижується в 2,5-2,8 рази. На підставі розрахунку по висловлених раніше методах ми дійшли висновку, що для пласта i_3^1 внутрішнє тертя знижується з $\rho = 45^\circ$ до $\rho = 30-35^\circ$, а коефіцієнт контактного тертя f_k – з 0,5 до 0,35.

При гідророзпушуванні розвантаження переважно здійснюється за рахунок утворення тріщин. Умови розвитку тріщин формуються поєднанням значень компонент зовнішніх стискаючих напружень (гірського тиску і горизонтального напруження бічного підпору) і розтягуючого напруження від дії рідини.

В механіці гірських порід вугільний пласт представляється у вигляді тонкого шару завтовшки h в умовах плоскої деформації (рис.14). Пласт підданий дії вертикального гірського тиску. По контактних площинах між пластом і бічними породами діють сили тертя, направлені проти поперечної деформації. Вони створюють горизонтальні напруження підпору. Помістимо початок координат у верхньому лівому кутку. Як правило, свердловини (одна або дві) для гідророзпушування проводяться по середині вугільного пласта.

За нашими уявленнями спочатку розвиваються привибійна тріщина віджиму і у гирлі фільтраційної порожнини, а потім по черзі в загерметизованій ділянці в напрямку виробленого простору (рис. 14). Позначимо довжину свердловини через l_c , глибину герметизації – через l_r .

Тепер належить знайти несучу здатність привибійної частини пласта в процесі розвитку привибійної тріщини і тріщин гідророзпушування. Для цього використовуємо формули (26) - (31), які дозволяють визначати вертикальне напруження у вершині привибійної тріщини в будь-якій точці привибійної частини газоносного пласта.

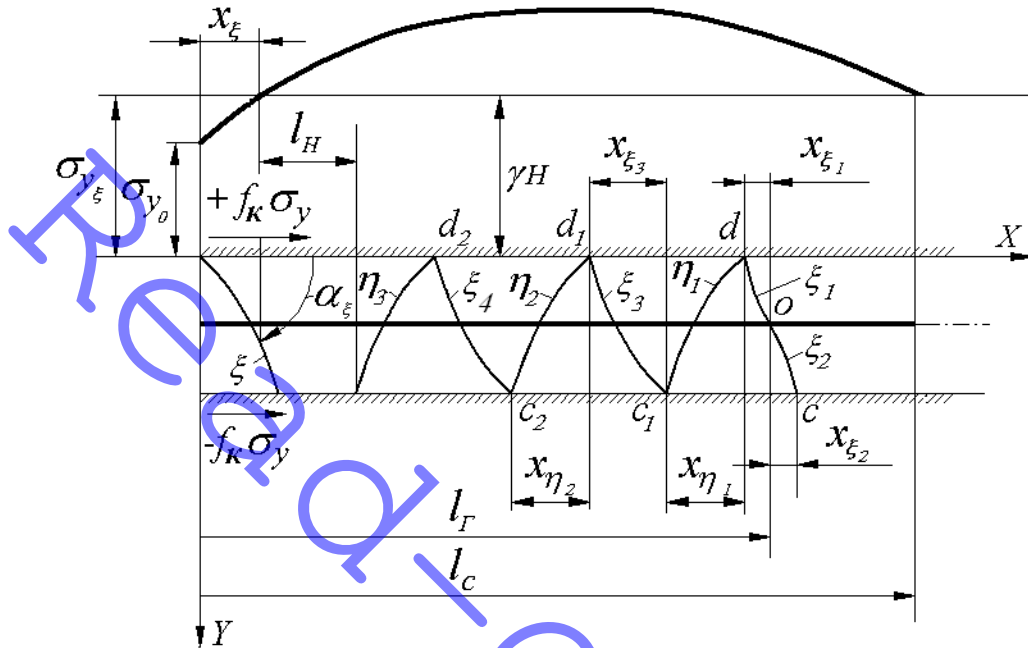


Рисунок 14 – Схема визначення параметрів розвантаження пласта при розвитку тріщин привибійної частини вугільного пласта

Ще важливо врахувати, що контактні дотичні напруження загасають у міру видалення від зони концентрації у вигляді формули (5). На рис. 14 показано лініями утворення тріщини віджиму по ТМЕДН ξ в привибійній області та утворення тріщини у гирлі фільтраційної порожнини по ТМЕДН $\xi_1^c(\xi_1^i)$. Розвиток тріщини по ТМЕДН $\xi_2^c(\xi_2^i)$ збільшує довжину несучої частини. Тому вона не розвивається. Тріщина віджиму по ТМЕДН ξ розвивається вниз згідно формулі (18), тріщини по ТМЕДН $\xi_1^c(\xi_1^i)$ – вгору згідно тієї ж формулі (18). Для тріщин у гирлі фільтраційної порожнини введемо абсцису x відносно l_r на відстані, рівному відмітці герметизації свердловини в гирлі фільтраційної зони. Тріщина по ТМЕДН $\xi_1^c(\xi_1^i)$ розвивається з точки o в точку $d'(d'')$ щодо вибою на відстані $(l_r - x_{\xi_1^c}(x_{\xi_1^i}))$. Тепер належить знайти несучу здатність привибійної частини пласта в процесі розвитку однієї привибійної тріщини і однієї тріщини гідророзпушування. Отже частина пласта, що виходить з-під навантаження, дорівнює сумі проєкцій берегів спарених тріщин, тобто сумі абсцис x_ξ і $x_{\xi_1^c}(x_{\xi_1^i})$. Уявимо собі, що тріщини по ТМЕДН ξ і ТМЕДН $\xi_1^c(\xi_1^i)$ розвиваються сумісно (рис. 14). Тоді поточне значення довжини несучої частини плас-

та при сумісному розвитку тріщин по ТМЕДН ξ і ТМЕДН $\xi_1^c(\xi_1^i)$ в верхній половині дорівнює $(l_\Gamma - x_\xi - x_{\xi_1^c}^c(x_{\xi_1^i}^i))$. Опорний тиск згідно формулі (5.2) при розвитку тріщин визначається за формулою

$$\sigma_{y_i} = \sigma_{y_\xi} \left(1 + f_\kappa \cdot \left(\frac{1 - t_l \times (l_\Gamma - x_\xi - x_{\xi_1^c}^c(x_{\xi_1^i}^i) - x_\eta^c - \dots)}{l_\Gamma - x_\xi - x_{\xi_1^c}^c(x_{\xi_1^i}^i) - x_\eta^c - \dots} \right) \right), \quad (33)$$

Тоді питоме зусилля при розвитку тріщин визначається за формулою

$$p = \sigma_{y_\xi} \left(1 + \frac{f_\kappa}{2h} (l_\Gamma - x_\xi - x_{\xi_1^c}^c(x_{\xi_1^i}^i) - x_\eta^c - \dots) - \frac{f_\kappa t_l}{3h} (l_\Gamma - x_\xi - x_{\xi_1^c}^c(x_{\xi_1^i}^i) - x_\eta^c - \dots)^2 \right). \quad (34)$$

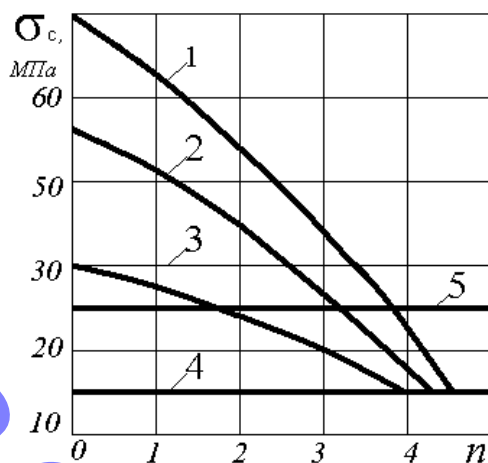
Несуча здатність привибійної частини пласта в процесі розвиток тріщин по ТМЕДН ξ і ТМЕДН $\xi_1^c(\xi_1^i)$ визначається за формулою

$$\sigma_c = \frac{p(l_\Gamma - x_\xi - x_{\xi_1^c}^c(x_{\xi_1^i}^i) - x_\eta^c - \dots)}{l_\Gamma}, \quad (35)$$

Після розвитку тріщини по ТМЕДН $\xi_1^c(\xi_1^i)$ з абсцисою $x_{\xi_1^c}^c(x_{\xi_1^i}^i)$ рідина виходить на контактну площину між покрівлею і пластом. Рідина частинно розповсюджується по щілині між покрівлею і пластом, а залишкова частина їде на утворення нової тріщини по ТМЕДН η с абсцисою $x_\eta^c(x_\eta^i)$, яка розвивається вниз. Наступна тріщина розвивається по ТМЕДН $\xi_3^c(\xi_3^i)$ з абсцисою $x_{\xi_3^c}^c(x_{\xi_3^i}^i)$ вгору. Так по черзі розвивається система тріщин (рис.14) до тих пір, поки межа несучої здатності привибійної частини не зрівняється з γH , поки не почне падати тиск нагнітання: згідно правилам після зниження тиску рідини, що нагнітається, не менше, ніж на 30% від максимального, який зареєстрований в процесі нагнітання, та виходу рідини, яка нагнітається, на вибій виробки, що свідчить про завершення процесу гідророзпушування, нагнітання зупиняють. Кожного разу у формулах (34 і (35) слід враховувати значення абсциси вершини нових тріщин. Слід зазначити, що при розвитку всіх тріщин при статичному гідророзпушуванні внутрішнє і контактне тертя зберігаються постійними. При імпульсному гідророзпушуванні внутрішнє тертя зменшується. Зменшується і контактне тертя від дії вібрації, коли рідина виходить на контактну площину. Треба сказати, що вода є відмінним провідником хвильової дії. Так, В.С. Ямщиков пише, що загасання пружної енергії при розповсюдженні хвилі у воді несуттєво: коефіцієнт загасання пружної енергії створює подвійне ослаблення амплітуди ультразвукової хвилі на відстані 28 м. Отже величина розмаху імпульсів тиску практично зберігатиметься при русі рідини по щілині між покрівлею і пластом, оскільки довжина шляху руху рідини значно менше 28 м.

Тепер визначимо межу несучої здатність за формулами (33) –(35) у міру розвитку тріщин. Розрахунок несучої здатності привибійної частини пласта з використанням рівнянь (25)-(32) розв'язувався методом ітерацій.

Зрозуміло, що привибійна тріщина при гідророзпушуванні розвиватиметься до тих пір, поки межа значення несучої здатності пласта не зрівняється з величиною гірського тиску γH . З цього витікає критерій: розвантаження вважається повним, коли межа несучої здатності не зрівняється з γH . На рис.15 приведені залежності межі несучої здатності від кількості тріщин.



4 - $\gamma H = 15$ МПа, 5 - $\gamma H = 25$ МПа

Рисунок 15 – Залежності межі несучої здатності привибійної частини негазоносного (1) і газоносного (2) пластів при статичному гідророзпушуванні та газоносного пласта (3) при імпульсному гідророзпушуванні від кількості тріщин

Як видно, кількість тріщин при імпульсному гідророзпушуванні зменшується. Це свідчить про те, що є можливість збільшення глибини герметизації і величини безперервного проведення виробки. Треба сказати, що глибина герметизації в 6,5 м в даний час є максимально досяжною, виходячи із довжини свердловини, що максимально пробурюється трьома 3-х метровими штангами в 8,5 м (довжина зони фільтрації по нормативних документах повинна складати 2,0 м). Для реалізації переваг цього способу необхідне використання верстака, розробленого з участю автора згідно патенту 72037 України «Спосіб проведення підготовчих пластових виробок в газонасичених вікидонебезпечних вугільних пластах», що забезпечує механізоване буріння свердловин діаметром 45 мм і завглибшки 12-15 м. З цього виходить, що імпульсне гідророзпушування пластів за рахунок збільшення глибини герметизації за наявності устаткування для буріння свердловин на 10-12 м відкриває можливості збільшення добової проведення підготовчих виробок, особливо по пластах малої потужності.

Оскільки при імпульсному гідророзпушуванні відбувається більш ефективне розвантаження привибійної частини пласта, то слід чекати разом із збільшенням довжини зони розвантаження різке скорочення часу гідрообробки. Імпульсне гідророзпушування в порівнянні зі статичним (нормативним) гідро-

розпушуванням дозволяє підвищити глибину герметизації, що дає можливість збільшити зону розвантаження в 1,3-1,5 рази. Це, у свою чергу, дозволяє збільшити швидкість проведення виробок. На основі досліджень була розроблена «Методика розрахунку параметрів розвантаження вугільних пластів при їх гідророзпушуванні», яка використовувалася при розробці «Доповнень до «Паспортів проведення гірничо-експериментальних робіт».

Гірничо-дослідницькі роботи з порівняльного випробування способів були проведені по методикам, узгодженим Центральною комісією з питань вентиляції, дегазації і боротьби з ГДЯ, на СП «Ш/у «Суходільське-Східне» і «Ш/у «Молодогвардійське» ПАТ «Краснодонвугілля». Спосіб імпульсного гідророзпушування був реалізований пристроєм без механізму керування підпірного тиску (рис. 13). Слід зазначити, що спочатку нагнітання води в пласт в режимі гідророзпушування на СП «Ш/у «Суходільське-Східне» проводилося насосною установкою УГН з витратою рідини 90 л/хв. Спостерігалось сильне віджимання пласта. Для запобігання небезпечного гідровіджиму і стабілізації гідророзпушування пласта автором дисертації була теоретично обґрунтована і рекомендована максимально допустима витрата рідини 60 л/хв. Подальші випробування проводилися насосною установкою УНІ-01 з витратою 55 л/хв.

Дослідження параметрів гідророзпушування в імпульсному і статичному режимах в умовах СП «Ш/у «Суходільське-Східне» проведено в забоях 24-го і 25-го Східних конвеєрних штреків пласта i_3^1 гориз. 915 м. Зіставлення статичного і імпульсного режимів гідророзпушування показало, що при гідроімпульсній дії тривалість нагнітання рідини до завершення активного процесу гідрообробки пласта знижується більш ніж на 50%, а витрата рідини – до 60%. Зона розвантаження привибійної частини пласта зростає з 3,5-4,0 м до 6,0 м, що дозволило збільшити глибину виїмки з 3,0 м до 6,0 - 7,0 м, що підтверджує достовірність нашої математичної моделі розвантаження привибійної частини вугільного пласта і висловлені теоретичні висновки.

Подальші випробування імпульсного гідророзпушування проводилися в умовах СП «Ш/у «Молодогвардійське». Гірничо-експериментальні роботи виконані в 3-х вибоях підготовчих виробок пласта k_2^H гориз. 617 м и в одному вибою пласта i_3^1 Орловської ділянки шахтного поля. Були підтверджені наші висновки по скороченню часу і зниженню витрати рідини. Встановлено, що при імпульсному гідророзпушуванні в порівнянні із статичним режимом об'єм рідині, закачаний в пласт через одну свердловину знижується на 40%. За даними вимірів системою ЗУА-98 зона розвантаження збільшується з 3,5 – 4,0 до 7,0 м, що дозволяє при імпульсному гідророзпушуванні в порівнянні із статичним збільшити швидкість проходки і безпеку гірських робіт.

Результати науково-дослідних робіт оформлені актами використання результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських і технологічних робіт з участю автора у вигляді методик, методичних рекомендацій і технологічної проектної документації для СП «Шахтоуправління «Суходільське - Східне», СП «Шахтоуправління «Молодогвардійське» і шахти ім. М.П. Баракова ПАТ «Краснодонвугілля». ІГТМ НАН України спільно з ТОВ «Теплогірський завод

гідрообладнання» з участю автора розроблено технічне завдання на проектування пристрою гідроімпульсної дії на вугільний пласт.

При гідророзпушуванні повинна бути дотримана важлива умова необхідності перевищення значення тиску рідини, що розвивається насосом, над значенням тиску, необхідним для розвитку тріщин.

Тому виникає необхідність визначення значень гідравлічного тиску, необхідних для розвитку тріщин. Для визначення значення тиску P_{Γ} необхідний відповідний метод його розрахунку. При розробці методу скористаємося формулою (9) Кулона. Тоді тиск P_{Γ} рідини, необхідний для розвитку тріщин, визначається за формулами

$$P_{\Gamma} = \frac{k_n}{\mu} + \frac{1}{\mu} \left(\frac{\sigma_{x_i} - \sigma_{y_i}}{2} \sin 2\alpha_{\eta} + f_i \sigma_{y_i} \left(1 - \frac{2y}{h} \right) \cos 2\alpha_{\eta} \right) + \left(\frac{\sigma_{y_i} + \sigma_{x_i}}{2} - \frac{\sigma_{x_i} - \sigma_{y_i}}{2} \cos 2\alpha_{\eta} - f_i \sigma_{y_i} \left(1 - \frac{2y}{h} \right) \sin 2\alpha_{\eta} \right); \text{ Па,} \quad (36)$$

Значення σ_{y_i} визначаються за формулою (26) Значення σ_{x_i} визначаються за формулою у вигляді

$$\sigma_{x_i} = \frac{2(k_n + \mu\sigma_{y_i})}{\cos \rho} \left(\sin \rho - \sqrt{1 - b^2} \right) + \sigma_{y_i}, \text{ Па,} \quad (37)$$

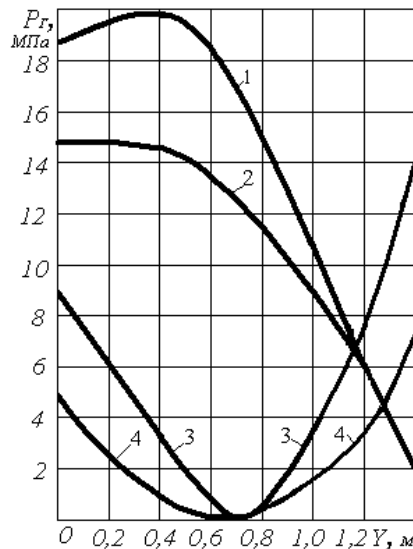
$$\text{де } b = -\frac{f_i}{k_n + \mu\sigma_{y_i}} \left(1 - \frac{2y}{h} \right), \text{ де } f_i = f_k (1 - t_l \cdot l).$$

Кути нахилу тріщин визначаються за формулами (18) и (19).

На рис.16 приведені закономірності двох видів зміни значення тиску рідини, необхідного для розвитку тріщини, від відстані від кривлі їх вершин для свердловини в 5,0 м. Відзначимо, що криві 1 і 3 відносяться до тріщин при статичному гідророзпушуванні, 2 и 4 – до тріщин при імпульсному гідророзпушуванні.

Сукупність виразів (26) –(37) є математичної моделлю, на підставі якої сформульовано висновок: закономірності значень тиску рідини у межах від 0 до 20 МПа, необхідних для розвитку тріщин при гідророзпушуванні вугільних пластів, описуються трансцендентними функціями від ординати їх вершин: опуклими для низхідних і увігнутими для висхідних тріщин. при цьому для виключення небезпечного гідровіджиму витрата рідини не повинна перевищувати $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ (60 л/хв).

Дуже важливо, щоб тиск рідини перевищував тиск, необхідний для розвитку тріщини. Що стосується статичного гідророзпушування, то умови перевищення тиску рідини над тиском, необхідним для розвитку тріщин, легко можуть бути реалізовані установкою положенням запобіжного клапана на максимальне значення тиску, що допускається міцністю конструкції насоса.



1 і 2 – для нізхідних опуклих тріщин; 3 і 4 – висхідних увігнутих
Рисунок 16 – Залежності тиску рідини, необхідного для розвитку тріщин гідророзпушування привибійної частини вугільного пласта потужністю 1,4 м від ординати вершин тріщин

При роботі пристрою імпульсного гідророзпушування ця умова здійснюється при визначених значеннях підпірного тиску на кавітаційному генераторі. Для з'ясування раціональних режимних параметрів пристрою імпульсної дії за критерієм тиску підпору представимо результати експериментальних досліджень амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) генератора пружних коливань (рис. 17), що одержані нами на стенді ІГТМ. З порівняння значень підпірного тиску P_n видно, що розмах коливань тиску рідини, що нагнітається, не завжди перевершує тиск 15 МПа, необхідний для розвитку тріщини.

На рисунку 17 видно, як важливо, щоб значення тиску гідроопору пласта у гирлі фільтраційної порожнини знаходилося в діапазоні підпірного тиску генератора у межах 1,0-5,0 МПа, при яких пристрій забезпечує найбільші значення розмахів коливань імпульсів гідравлічного тиску, які перевищують значення P_f , необхідного для розвитку тріщини. Пристрій (рис.13), який розроблений автором спільно з О.А. Ангеловським і В.В. Зберовським, не має можливості керування підпірним тиском в гирлі фільтраційної порожнини свердловини. Можна припустити, що при певних значеннях цього тиску максимальне значення кавітаційних імпульсів тиску не перевищують значень, необхідних для розвитку тріщин.

О.А. Ангеловським разом із В.В. Зберовським на «Ш/у «Молодогвардійське» проведені виміри підпірного тиску у фільтруючій зоні за допомогою спеціального трубопроводу, вбудованого в шланговий герметизатор (рис. 13). За наслідками по кадрового розбиття відео нагляду вимірів підпірного тиску на інтервали 0,25 секунди встановлений характер зміни тиску на виході генератора в фільтраційній порожнині свердловини. На початковій стадії, при заповненні гідравлічної системи водою, тиск на виході генератора в частині фільтрації свердловини протягом 50...60 секунд стабілізується.

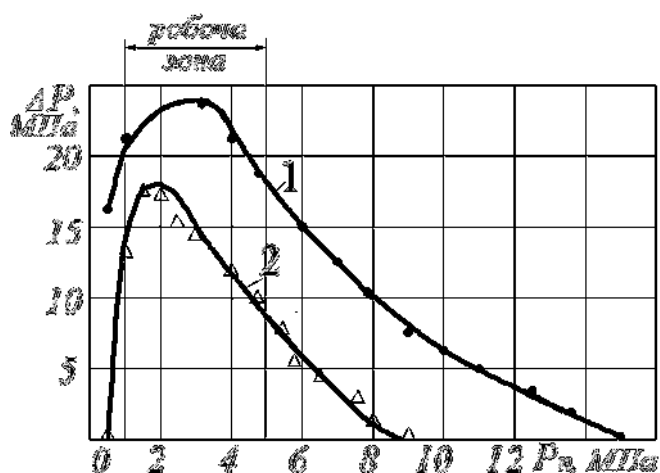


Рисунок 17 – Експериментальні залежності розмаху коливань ΔP_1 від тиску підпора P_n при $Q = 0,00092 \text{ м}^3/\text{с}$ (1) і $Q = 0,00066 \text{ м}^3/\text{с}$

Далі, при сталому тиску на вході в пристрій гідроімпульсного розпушування ($P_n = \text{const}$), в частині фільтрації свердловини спостерігаються коливання тиску рідини в діапазоні від 1,8 до 7,5 МПа. Цей проміжок часу є до певної міри стадією гідроімпульсного розпушування. Як пишуть автори експерименту, через певний проміжок часу (в нашому випадку приблизно через 6 хвилин) активний процес тріщиноутворення припиняється, розмах коливань тиску звужується до діапазону від 4,0 до 4,8 МПа і стабілізується. Таким чином встановлено, що процес гідроімпульсного розпушування при режимі $P_n = 11 \text{ МПа}$ і $Q = 40 \text{ л/хв}$ в активній стадії процесу складає близько 6 хвилин в початковий період. З порівняння значень підпірного тиску P_n з рис. 17 видно, що значення тиску у гирлі фільтраційної порожнини не забезпечують найефективніший режим роботи пристрою по розмаху коливань тиску рідини, що нагнітається. Це дозволяє вважати, що встановлюється процес фільтрації нагнітання, при якому розвиток різнопохилих тріщин не відбувається. Розрахунок показав, що значення тиску P_T , необхідного для розвитку тріщин, не забезпечується. Це свідчить про малий час роботи пристрою в раціональному режимі. Потім, на нашу думку, пристрій працює в режимі звичного дроселя, не створюючи кавітаційне коливання імпульсів тиску. З цього робимо висновок, що пристрій в імпульсному режимі розвиває тріщини не повністю. Тріщина в імпульсному режимі розвивається тільки тоді, коли значення підпірного тиску на виході з генератора забезпечує перевищення розмаху ΔP коливань імпульсів над тиском P_T . Ця умова забезпечується при певних значеннях підпірного тиску, коли значення підпірного тиску при витраті рідини, що нагнітається в пласт, насосною установкою УНІ-01 знаходиться в межах 1,0 – 5,0 МПа (рис. 17), а точніше при відношенні підпірного тиску до тиску нагнітання в межах 0,1 - 0,25. Технічно це реалізується шляхом перепуску рідини з фільтраційної порожнини у всмоктувальну магістраль установки УНІ-01. При значному опорі фільтрації виникає необхідність зниження цього підпірного тиску. З цього напрошується висновок про необхідність керування підпірним тиском. Для керування підпірним тиском генератора на його базі з участю автора були запропоновані на рівні патентів України спосіб і при-

стрій імпульсного гідророзпушення вугільних пластів (рис.18), оснащений засобами контролю і керування тиском у фільтраційній порожнині – тиском підпору.

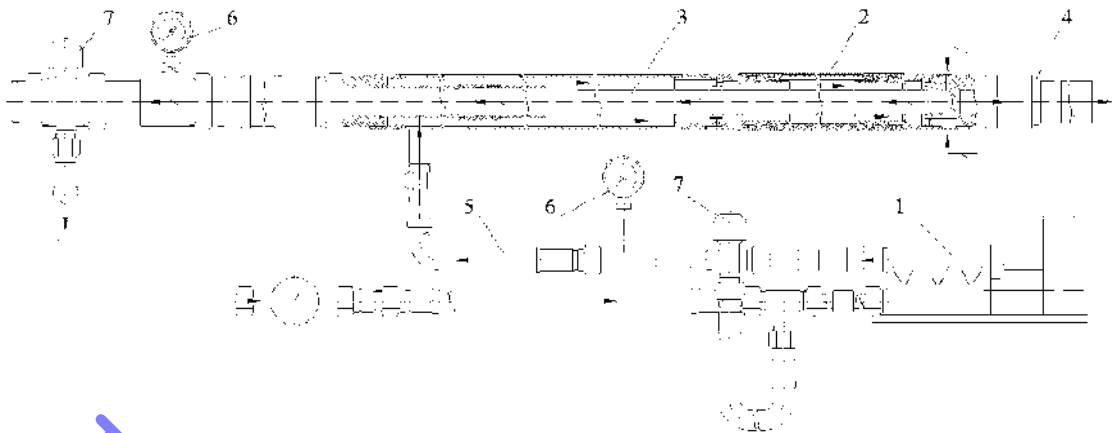


Рисунок 18 – Схема пристрою імпульсного гідророзпушення з керуванням підпірного тиску

Пристрій з керуванням гідравлічного тиску забезпечує необхідні значення розмахів імпульсів гідравлічного тиску. Пристрій працює наступним чином. Рідину нагнітають у вугільний пласт під тиском 20,0 -25,0 МПа від насосної установки 1 через герметизатор 2 свердловини та генератор пружних коливань (ГК) 4 у свердловину. Для керування режимом роботи ГК у пристрої передбачено механізм керування підпірним тиском рідини після ГК, який включає канал 3 зворотного потоку рідини через кран 7 регулювання підпірним тиском. В залежності від опору фільтрації рідини у вугільний пласт регулюють підпірний тиск рідини краном 7 або переливним клапаном.

За період проведення гірничо-дослідницькі робіт була впроваджена партія кавітаційного пристрою, з них один з можливістю виміру тиску (рис.13) і інший з можливістю виміру і з керуванням тиском - підпірним гідроопором пласта в фільтраційній порожнині свердловини (рис.18). Одночасно з цим були проведені промислові випробування кавітаційного пристрою з керуванням підпірного тиску в умовах шахти ім. М.П. Баракова в 11 штреку 11 лави для дегазації пласта через довгі свердловини по методиці, узгодженої Центральною комісією. Було встановлено, що пристрій з ручним керуванням підпірного тиску задовільно забезпечує необхідні параметри гідрообробки. За результатами випробувань зроблений висновок, що ручне керування режимами підпірного тиску доцільне замінити переливним клапаном, що забезпечує автоматичну підтримку режимів гідроімпульсної обробки пласта Пристрій з керуванням підпірного тиску в фільтраційній частині порожнини свердловини придатний для експлуатації в любых гірничо-геологічних умовах. Приведений пристрій забезпечує керування тиском підпору рідини, що нагнітається в пласт, який відрізняється від пристрою, описаного в дисертаціях О.А. Ангеловського і В.В. Зберовського, в яких це керування не передбачено.

Згідно розрахунку, який виконаний економічною службою і затверджений керівництвом ПАТ «Краснодонвугілля», очікуваний економічний ефект від

впровадження імпульсного гідророзпушування викидонебезпечних вугільних пластів при проведенні підготовчих виробок комбайнами на шахтах товариства складає до 0,7 млрд грн/рік в цінах 2014 р. Дольова участь автора складає до 30 млн. грн за рік.

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науковою роботою, в якій розв'язана актуальна в області геотехнічної і гірничої механіки науково-прикладна проблема, яка полягає у встановленні закономірностей локального утворення і розвитку тріщин в гірських породах, формування опуклої епюри опорного гірського тиску, зменшення несучої здатності пласта із збільшенням тиску газу, зміни величин розвантаження від потужності пласта, глибини його залягання і фізико-механічних показників вугілля і розвантаження газонесних вугільних пластів при їх гідророзпушуванні, що дозволило розвинути наукові основи визначення параметрів розвантаження привибійної частини цих пластів на базі критерію міцності Кулона з урахуванням їх контактної тертя і тиску в них газу та обґрунтувати на цій основі технологічні і витратно – напірні параметри статичного (нормативного) та імпульсного способу та пристрою гідророзпушування, які були використані при підготовці рекомендацій в проекти проведення підготовчих виробок при проведенні виробок комбайнами на шахтах, що має суттєве значення для підвищення безпеки та збільшення швидкості проведення підготовчих виробок на викидонебезпечних пластах та дозволило отримати від впровадження імпульсного гідророзпушування на шахтах ПАТ «Краснодонвугілля» очікуваний економічний ефект в сумі до 0,7 млрд грн на рік в цінах 2014р.

Основні наукові і практичні результати роботи і висновки полягають у наступному:

1. Аналіз відомих існуючих аналітичних методів розрахунку параметрів НДС масивів гірських порід показав, що вони мають низьку достовірність. Тому розвиток наукових основ визначення параметрів розвантаження привибійної частини газонесних вугільних пластів з урахуванням закономірностей впливу домінуючих чинників пов'язано з розробкою нових методів та встановлення на цій основі раціональних технологічних і витратно-напірних параметрів статичного (нормативного) та імпульсного способу і пристрою гідророзпушування викидонебезпечних вугільних пластів.

2. Даний розвиток теорії граничного стану матеріалів, який полягає у виведенні і розв'язанні диференціального рівняння рівноваги взаємозв'язаних силових параметрів і розробці на його основі методу розрахунку значень граничних нормальних напружень на траєкторії ефективних дотичних напружень на підставі критерію міцності Кулона, який доповнений урахуванням контактної тертя.

3. Вперше розроблено математична модель, аналітичні методи, методики розрахунку і встановлено закономірності межі міцності на стиск та побудови діаграм «нормальне напруження – поздовжня деформація» зразків гірських по-

рід для чотирьох форм їх руйнування (усічено-клинової, клинової, діагональної, поздовжньої) з використанням чотирьох показників властивостей гірських порід (k_n – межа міцності зсуву вугілля, f_k – коефіцієнт контактного тертя, μ – коефіцієнт внутрішнього тертя, E – модуль пружності Юнга) на підставі значень граничних нормальних напружень у вершинах тріщин, що враховують у критерії міцності Кулона контактне тертя і значення ефективних дотичних напружень, які не досягають межі міцності зсуву порід в точках виходу траєкторій на граничну поверхню, що дозволило встановити межу міцності вугілля простими способами в умовах шахт.

4. Вперше запропоновано механізм формування привантаження привибійної частини вугільного пласта, який полягає у лінійному загасанні від кромки вибою у глибину масиву дотичних напружень від контактного тертя між пластом і вміщуючими породами; розроблено математичну модель, аналітичний метод розрахунку, і встановлено закономірності гірського тиску, епюра якого описується опуклою квадратичною функцією, та несучої здатності привибійної частини вугільних пластів, що дозволило описати епюру гірського тиску, відповідну експериментальній.

5. Вперше розроблено метод розрахунку напружень у вершині тріщини в будь-якій точці привибійної частини газоносного вугільного пласта, що полягає в урахуванні значень опорного гірського тиску, горизонтальних стискаючих напружень бічного підпору, і тиску в ній газу, що дозволило пояснити зниження міцності вугілля за наявності в ньому газу під тиском і визначити параметри тріщин в привибійній частині вугільного пласта.

6. Вперше встановлені закономірності зміни величин зони розвантаження вугільного пласта, які описується функцією, що зростає в залежності від потужності та глибини залягання пластів і спадає в залежності від показників фізико-механічних властивостей вугілля, що дозволило обґрунтувати мінімально допустиму глибину герметизації для виключення небезпечного гідровіджиму.

7. Вперше розроблено математичну модель, аналітичні методи і методику та встановлено закономірності параметрів розвантаження привибійної частини вугільного пласта при гідророзпушуванні за рахунок тиску газу уздовж його залягання і виходу його частини з-під навантаження при розвитку однієї привибійної тріщини віджиму і 3-6 похилих тріщин, що по черзі розвиваються, та зниження несучої здатності цієї частини пласта при імпульсному гідророзпушуванні в порівнянні із статичним за рахунок зниження внутрішнього тертя в вершинах тріщин і контактного тертя між пластом і вміщуючими породами від динамічної дії рідини, що нагнітається в пласт.

8. Вперше розроблено математичну модель, аналітичний метод розрахунку і встановлені закономірності зміни значень тиску рідини у межах від 0 до 20 МПа, необхідних для розвитку тріщин гідророзпушування, від ординати їх вершин, при цьому перевищення значень цього тиску забезпечується максимальним імпульсним тиском, що розвивається кавітаційним генератором пристрою з керуванням підпірного тиску – гідроопору вугілля при витраті рідини, рівної $0,00092 \text{ м}^3/\text{с}$ (55 л/хв), що нагнітається в пласт, в умовах відношення підпірного

тиску до тиску нагнітання у діапазоні 0,1 – 0,25, при цьому для виключення небезпечного гідровіджиму витрата рідини не повинна перевищувати 0,001 м³/с (60 л/хв), що дозволяє підвищити безпечну зону безперервної виїмки вугілля з 3,0 м до 6 – 7 м і швидкість проведення виробок у 2-2,3 рази.

9. На зіставленні значень тиску зсуву в привибійної частини вугільного пласта з величинами розмахів тиску, які створювались пристроєм без керування тиском підпору, встановлено, що в період розвитку тріщин у привибійної частини вугільного пласта пристрій не завжди працює в режимі найвищих розмахів імпульсного тиску. Для забезпечення роботи пристрою в режимі найвищих розмахів імпульсного тиску з участю автора були запропоновані на рівні патентів України спосіб і пристрій імпульсного гідророзпушування вугільних пластів, оснащений засобами контролю і керування тиском у фільтраційній порожнині – тиском підпору.

10. Удосконалено метод граничного стану, що використовується МакНДІ, з урахуванням опорного гірського тиску у вигляді квадратичної функції і виходу частини площі пласта з-під навантаження при розвитку привибійної тріщини від гірського тиску. Відносна похибка розрахунку межі міцності матеріалу зсуву k_n була зменшена з 90 % по методу граничного стану до 16,8 %, що дозволило удосконалити методи розрахунку параметрів розвантаження привибійної частини газоносних вугільних пластів при їх нормативному (статичному) та імпульсному гідророзпушуванні.

11. Розроблено методики на проведення гірничо-експериментальних робіт і рекомендації в доповнення до технологічної проектної документації проведення і кріплення підготовчих виробок СП «Ш/у Суходільське-Східне» і «Ш/у «Молодогвардійське» ПАТ «Краснодонвугілля», і в «Технічне завдання «Пристрій для гідроімпульсної дії на вугільний пласт», яке розроблено ІГТМ НАН України спільно з ТОВ «Теплогірський завод гідрообладнання».

12. Порівняння ефективності використання статичного і імпульсного гідророзпушування в однакових умовах «Ш/у «Суходільське-Східне» і «Ш/у «Молодогвардійське» ПАТ «Краснодонвугілля» при проведенні підготовчих виробок свідчить, що при імпульсному гідророзпушуванні через свердловини діаметром 43 мм завдовжки від 6 до 7 м з глибиною герметизації від 4,0 до 5,0 м за критерієм системи контролю АПСС «активний процес завершений» і сейсмічного контролю ЗУА-98 за величиною зони розвантаження встановлено зниження викидонебезпечності вугільних пластів в порівнянні зі статичним розпушуванням, що, в цілому, підтверджує зроблені автором теоретичні висновки.

13. Згідно розрахунку економічного ефекту, що очікується внаслідок використання імпульсного гідророзпушування вугільних пластів при проведенні підготовчих пластових виробок в умовах ПАТ «Краснодонвугілля», які виконані економічною службою і затверджені керівництвом товариства, результати роботи ІГТМ НАН України та ПАТ «Краснодонвугілля» в 2010-2014 р.р. по впровадженню імпульсного гідророзпушування дозволяють збільшити комбайнове проведення виробок до 70-75 % від загального об'єму. Це забезпечить прибуток, який може скласти до 0,7 млрд грн за рік в цінах 2014 р. Дольова участь автора складає до 30 млн грн за рік.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ
ОПУБЛІКОВАНІ В НАСТУПНИХ РОБОТАХ:

Монографія

1. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Малич Н.Г. Механика образования форм разрушения образцов горных пород при их сжатии. Монографія. Дніпро: ИМА-пресс, 2018. 174 с.

Статті у наукових фахових виданнях

2. Васильев Л.М., Васильев Д.Л. Дифференциальное уравнение предельного состояния деформируемого твердого материала с учетом внутреннего и внешнего трения / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2003. Вип. 41. С. 145-152.

3. Васильев Л.М., Васильев Д.Л. Метод расчета предела прочности горных пород на одноосное сжатие при линейной связи между контактными напряжениями / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2003. Вип. 42. С. 73-80.

4. Васильев Д.Л. Метод расчета распределения нормальных контактных напряжений в образцах горных пород при постоянном значении контактного трения / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2003. Вип. 44. С. 37-44.

5. Васильев Д.Л. Расчет предела прочности образцов горных пород при их разрушении в виде усеченных пирамид / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2003. Вип. 47. С. 91-98.

6. Васильев Д.Л. Концепция разрушения образцов горных пород вдоль одноосной сжимающей нагрузки / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2004. Вип. 49. С. 79-87.

7. Васильев Д.Л. Расчет предела прочности образцов слабых горных пород при одноосном сжатии / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2004. Вип. 50. С. 81-87.

8. Васильев Д.Л. Механизм разрушения образцов горных пород вдоль одноосной сжимающей нагрузки / Наук, вісник Націон. гірн. ун.- ту. Дніпропетровськ: НГУ України, 2004. №5. С. 51-57.

9. Васильев Д.Л. Метод расчета предела прочности на сжатие образцов горных пород при постоянстве контактного касательного напряжения / Збірн. наук. пр. Дніпропетровськ: НГУ України, 2009. № 33. т. 1. С 111–117.

10. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Цепков К.В., Пазынич А.В. Анализ связи между контактными напряжениями при сжатии горных пород / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2009. Вип. 81. С. 217-226.

11. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Наривский Р.Н. Метод расчета предела прочности при трехосном сжатии образцов горных пород и постоянном значении контактных касательных напряжений / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2009. Вип. 82. С. 9-18.

12. Костандов Ю.А., Васильев Д.Л., Локшина Л.Я. Расчёт предела прочности хрупких материалов с учётом внутреннего трения / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2009. Вип. 82. С. 199-206.

13. Васильев Д.Л., Костандов Ю.А., Локшина Л.Я. Устойчивость трещины при одноосном сжатии с учётом внутреннего трения / Наук, вісник Націон. гірн. ун.- ту. Дніпропетровськ: НГУ України, 2010. №4. С. 7-10.

14. Васильев Д.Л., Ус Ю.М., Потапенко А.А. Расчет предела прочности образцов горных пород при их разрушении в виде усеченных пирамид с учетом контактной зоны прилипания / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2010. Вип. 90. С. 16-24.

15. Васильев Д.Л., Ус Ю.М., Костандов Ю.А. Обоснование методов расчета контактных напряжений при сжатии горных пород / Наук. вісник Націон. гірн. ун.- ту. Дніпропетровськ: НГУ України, 2010. № 9-10. С. 56-60.

16. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Потапенко А.А. Расчет с учетом уравнений равновесия предела прочности образцов горных пород при их разрушении в виде усеченных пирамид / Сб. научн. тр. Днепропетровск: НГУ Украины, 2010. № 35. Том 1. С. 32-38.

17. Сницер А.Р., Васильев Д.Л., Зберовский В.В. Исследование радиальных напряжений вокруг скважины при гидроимпульсном рыхлении угольных пластов / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2011. Вип. 95. С. 43-53.

18. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Ус Ю.М. Метод расчёта предела прочности образцов горных пород при трёхосном сжатии / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2012. Вип. 98. С. 246-254.

19. Жулай Ю.А. Васильев Д.Л., Ангеловский А.А. Теоретическое обоснование динамических параметров импульсного нагнетания жидкости в угольных пласт / Наук, вісник Націон. гірн. ун.-ту. Дніпропетровськ: НГУ України, 2012. № 3. С. 26-30.

20. Васильев Л.М. Васильев Д.Л., Ангеловский А.А. Метод расчёта давления гидрорасчленения угольного пласта при его гидрорыхлении / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2012. Вип. 106. С. 154-160.

21. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Зберовский В.В. Гидроимпульсное воздействие на выбросоопасный угольный пласт / Сб. наук. пр. Дніпропетровськ: НГУ України, 2012. № 37. С. 47-54.

22. Васильев Д.Л. Совершенствование метода расчёта предела прочности горных пород при одноосном сжатии / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2013. Вип. 108. С. 154-160.

23. Жулай Ю.А., Васильев Д.Л., Ангеловский А.А. Обоснование рабочего давления нагнетания воды при импульсном гидрорыхлении угольных пластов / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2013. Вип. 108. С. 174-178.

24. Васильев Д.Л., Костандов Ю.А., Локшина Л.Я. Метод расчёта предела прочности при сжатии усеченно- конусных образцов горных пород при постоянном контактном касательном напряжении / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2013. Вип. 108. С. 206-213.

25. Васильев, Л.М., Васильев Д.Л., Потапенко А.А. Совершенствование метода расчёта распределения контактных нормальных напряжений при сжатии

образцов горных пород / Наук, вісник Націон. гірн. ун.-ту. Дніпропетровськ: НГУ України, 2013. № 4. С. 42-47.

26. Васильев, Д. Л. Математическая модель расчета пригрузок опорного давления на призабойную часть угольных пластов / Зб. наук. пр. / НГУ України. Дніпропетровськ, 2014. № 45. С. 189-195.

27. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Зберовский В.В., Жулай Ю.А. Кавитационное устройство импульсного гидрорыхления угольных пластов / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ, 2014. Вип. 114. С. 162-169.

28. Васильев Л.М. Васильев Д.Л., Малич Н.Г. Аналитический метод расчета предела прочности образцов горных пород / Metallургическая и горнорудная промышленность. 2017. № 6. С. 65-70.

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

29. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Потапенко А.А. Ус Ю.М. Расчет предела прочности при трехосном сжатии образцов горных пород и постоянном значении контактных касательных напряжений / Горный информационно-аналитический бюллетень. М: Горная книга, 2012. № 9. С. 70-76. (Росія. *Наукометрична база даних РИНЦ*).

30. Васильев Л.М., Васильев Д.Л. Теоретическое обоснование формирования горизонтальных нормальных напряжений в массивах горных пород / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013. №2. С. 81-90. (Росія. *Наукометрична база даних Scopus*).

31. Vasilyev L.M., Vasilyev D .L. Theoretical ground for origination of normal horizontal stresses in rock masses / Journal of Mining Science. USA, 2013. Vol 49. №2. Pp 240-247. (США. *Наукометрична база даних Scopus*).

32. Васильев Л.М., Васильев Д.Л. Аналитический метод построения диаграмм «напряжение-деформация» образцов горных пород при их клиновидной форме разрушения / Известия ВУЗов. Горный журнал. 2013. № 7. С 80 – 87. (Россия. *Наукометрична база даних РИНЦ*).

33. Vasilyev D., Polyakov Y., Potapenko A. Method of calculation of the minimum pressure of hydro breaking of the coal layer / Mining of Mineral Deposits. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema. 2013. P. 177-179. (*Наук. період. вид. іни. держави*).

34. Васильев Л. М., Васильев Д.Л., Потапенко А.А. Метод расчёта предела прочности одноосносжимаемых образцов горных пород при их разрушении в виде пирамид / Горный информационно-аналитический бюллетень. М: Горная книга, 2013. № 3. С. 223-231. (г. Москва. *Наукометрична база даних РИНЦ*).

35. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Усов О.А. Аналитическое построение диаграмм «напряжение – деформация» образцов горных пород при их усечённо – клиновидной форме разрушения / Metallургическая и горнорудная промышленность. 2013. № 6. С 81 – 84. (*Наукометрична база даних Index Copernicus*).

36. Васильев Л.М., Васильев Д.Л. Учет контактного трения в задаче о разрушении горных пород сжатием/ Физико-технические проблемы разработки

полезных ископаемых. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2015. №3. С. 48-56. (Россия. *Наукометрична база даних Scopus*).

37. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Наривский Р. Н. Обусловленность горизонтальных нормальных напряжений контактным трением между слоями горных пород / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. № 4. С. 71-76. (*Наукометрична база даних Index Copernicus*).

38. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Малич Н.Г. Аналитический метод расчета предела прочности образцов горных пород при их клиновидной форме разрушения / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. № 6. С. 65-70. (*Наукометрична база даних Index Copernicus*).

39. Vasiliev L.M., Vasiliev D.L., Malich M.G., Anhelovskyi O. O. Analytical method for calculating and charting “stress-deformation” provided longitudinal form of destruction of rock samples / *Наук. вісник Націон. ун-ту України*. Дніпро: НГУ України, 2017. № 3. С. 74-80. (*Наукометрична база даних Scopus*).

Тезиси доповідей і матеріали конференцій

40. Васильев Л.М., Васильев Д.Л. Математическая модель продольного разрушения образцов горных пород / *Горная геология, геомеханика и маркшейдерия: Сб. научн. докл. Междунар. научн.-технч. конф.* Донецк: УкрНИМИ НАН Украины, 2004. С. 304-309.

41. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Цепков К.В., Холявченко Л.Т. Механика продольного разрушения образцов горных пород / *Матер. XVI Межд. научн. школы «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках»*. Симферополь: Таврич. нац. ун-т., 2006. С. 58-60.

42. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Костандов Ю.А., Локшина Л.Я. Уравнение состояния материала с учетом внутреннего трения / *Матер. XIX межд. научн. школы «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках»*. Симферополь: Таврич. нац. ун-т., 2009. С. 198-203.

43. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Уколова Т.М. Теория формирования диаграммы «напряжение-продольная деформация» усеченно-пирамидальной формы разрушения образцов горных пород / *Матер. XIX Межд. научн. школы «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках»*. Симферополь: Таврич. нац. ун-т., 2009. С. 62-64.

44. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Ус Ю.М. Метод расчёта предела прочности при трёхосном сжатии образцов горных пород и постоянном значении контактных касательных напряжений / *Матер. XX Межд. научн. школы «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках»*. Симферополь: Таврич. нац. ун-т., 2010. С. 78-80.

45. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Сницер А.Р. Передача кавитационных автоколебаний в углепородный массив при гидроимпульсном воздействии / *Ма-*

тер. XXI Межд. научн. школы «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». Симферополь: Таврич. нац. ун-т., 2011. С. 229-231.

46. Васильев Л.М., Васильев Д.Л. Метод построения диаграмм «напряжение–продольная деформация» при одноосном сжатии образцов горных пород / Матер. XXII Межд. научн. школы «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». Симферополь: Таврич. нац. ун-т., 2012. С. 78-80.

47. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Поляков Ю.Е. Условия формирования самоподдерживающего разрушения призабойной зоны угольного пласта / Матер. XXIII Межд. научн. школы «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». – Симферополь: Таврич. нац. ун-т., 2013. С. 64-67.

48. Васильев Л.М., Зберовский В.В., Васильев Д.Л. Механизм возникновения внезапных выбросов угля и газа / Матер. XXV Межд. научн. школы «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». Симферополь: Таврич. нац. ун-т., 2015. С. 41–44.

49. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Малич Н. Г. К вопросу расчета и построения диаграммы «напряжение – продольная деформация» при продольной форме разрушения образцов горных пород/ Матер. міжнар. наук.-технічн. конф. "Форум гірників". Дніпро: НГУ України., 2016. С. 157-162.

50. Васильев Д.Л., Ангеловский А. А., Чугунков И. Ф. Метод расчета опорного горного давления на призабойную часть угольного пласта/ Матер. міжнар. наук.-технічн. конф. "Форум гірників". Дніпро: НГУ України., 2016. С. 151-162.

51. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Ангеловский А.А. Аналитический метод расчета диаграмм раздавливания призматических образцов горных пород при их клиновой форме разрушения / Матер. міжнар. наук.- технічн. конф. "Форум гірників". Дніпро: НГУ України., 2017. С. 170-176.

52. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Малич Н.Г. Определение горизонтальных напряжений с учетом контактного трения / Матер. міжнар. наук.- технічн. конф. "Форум гірників". Дніпро: НГУ України., 2018. С. 95-101.

53. Vasyliiev D., Malich M., Katan V. and Chuhunkov I. Method of calculating the parameters of the mountain pressure epure / International Conference Essays of Mining Science and Practice. Vol. 109. 2019. Published online: 09 July 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900055>.

54. Vasyliiev D. Parameters of interaction of a hydro impulse device with a coalseam during its loosening / International Conference Essays of Mining Science and Practice. Vol. 109. 2019. Published online: 09 July 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900110>.

Патенти України

55. Спосіб управління гідроімпульсною дією на вугільний пласт: пат. 67767 Україна / Васильєв Л.М., Потапенко О.О., Ангеловський О.А., Васильєв Д.Л., Усов О.О., Трохимець М.Я. № у 201108104; заявл. 29.06.11; опубл. 12.03.12, Бюл. № 5 (кн.1). С 5.85.

56. Пристрій управління гідроімпульсною дією на вугільний пласт: пат. 68355 Україна / Васильєв Л.М., Потапенко О.О., Ангеловський О.А., Васильєв Д.Л., Усов О.О., Трохимець М.Я. № у 201109864; заявл. 08.08.11; опубл. 26.03.12, Бюл. № 6 (кн.1). С 5.78.

57. Пристрій управління гідроімпульсною дією на вугільний пласт: пат. 68478 Україна / Васильєв Д.Л., Потапенко О.О., Ангеловський О.А., Поляков Ю.Є., Усов О.О., Трохимець М.Я. № у 201111042; заявл. 15.09.11; опубл. 26.03.12, Бюл. № 6 (кн.1). С 5.78.

58. Спосіб проведення підготовчих пластових виробок в газонасичених вікидонебезпечних вугільних пластах: пат. 72037 Україна/ Ангеловський О.А., Васильєв Д.Л., Усов О.О., Вялушкин Є.О. № у 201114375; заявл. 05.12.2011; опубл. 10.08.12, Бюл. № 15 (кн.1). С 5.71.

59. Спосіб гідроімпульсного розпушування вугільних пластів: пат. 73023 Україна / Зберовський В.В., Жулай Ю.О., Васильєв Д.Л., Никифоров О.В., Колчин Г.И., Ангеловський О.А., Чугунков І.Ф., Ніскевич О.Н. №у 201201719; заявл. 16.02.12; опубл. 10.09.12, Бюл. № 17 (кн.1). С 5.62.

Особистий внесок автора в роботах, опублікованих в співавторстві, полягає в наступному: [1] – написано другий та третій розділи в монографії; [2, 3, 10-16, 18, 20, 22, 28-39, 40-44, 46-54] – розвиток теорії руйнування гірських порід, розробка концепції розвитку тріщин і методів розрахунку межі міцності, аналіз результатів досліджень, формування висновків; [17, 19, 21, 23,45] – постановка задач, участь в розробки методик і доповнень до проектної документації, аналіз результатів досліджень; [27] – участь в лабораторних дослідженнях, аналіз їх результатів, підготовка статті; [24, 36] – висновок вихідної формули і побудова векторних діаграм горизонтальних напружень; [34] – опис конструкції і режимів роботи пристрою, проведення експериментальних робіт, аналіз їх результатів; [55 -59] – ідея способів, обґрунтування новизни рішень, формування відзнак і формул винаходів.

Анотація

Васильєв Д.Л. Розвиток наукових основ визначення параметрів розвантаження привибійної частини газоносних вугільних пластів. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.09 – «Геотехнічна і гірнична механіка». Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, 2019.

У дисертації висловлений розвиток теорії локального руйнування крихких матеріалів. Виведено і розв'язано диференціальне рівняння зв'язку між нормальними і дотичними напруженнями в руйнованому тілі. Розроблені методи розрахунку межі міцності зразків і масивів гірських порід. Розкритий механізм привантаження привибійної частини вугільного пласта, що формується загасаючими від кромки забою углиб масиву дотичними напруженнями от контактного тертя між пластом і бічними породами у вигляді опорного гірського тиску, епюра якого описується опуклою квадратичною функцією. Представлені розроблені математичні моделі і методи розрахунку параметрів розвантаження привибійної частини газоносних вугільних пластів при статичному і імпульсному гідророзпушуванні. Описаний механізм збільшення зони розвантаження з 3,5-4,0 до 6,0 м при імпульсному гідророзпушуванні привибійної частини вугільних пластів в порівнянні із статичним забезпечує підвищення швидкості і безпеки проходки виробок по викидонебезпечних пластах.

Розроблені наукові результати і рекомендації використані в доповненнях до технологічної проектної документації проведення і кріплення підготовчих виробок на СП «Ш/у «Суходільське – Східне» і «Ш/у «Молодогвардійське» ПАТ «Краснодонвугілля» в період проведення гірничо-експериментальних робіт за способом і пристроєм імпульсного гідророзпушування газоносних вугільних пластів для запобігання раптовим викидам вугілля і газу на цих шахтах.

Результатами гірничо-експериментальних робіт підтверджено скорочення в 1,5-2 рази часу і збільшення в 1,3-1,5 рази зони розвантаження пластів при їх гідроімпульсній обробці в порівнянні із статичною і підвищення швидкості проходки підготовчих виробок по викидонебезпечних вугільних пластах.

На підставі проведених досліджень ІТМ НАН України спільно з ТОВ «Теплогірській завод гідрообладнання» розроблено «Технічне завдання на дослідно-конструкторську роботу «Пристрій для гідроімпульсної дії на вугільний пласт» для промислового освоєння.

Згідно розрахунку ПАТ «Краснодонвугілля» економічного ефекту, що очікується, прибуток від упровадження способу і пристрою імпульсного гідророзпушування викидонебезпечних пластів на шахтах ПАО складає до 0,7 млрд грн за рік в цінах 2014 р. Згідно довідці розподілу економічного ефекту серед учасників роботи пайова участь автора за рік складає до 30 млн грн за рік.

Ключові слова: гірська порода, зразок, напруження, діаграма, деформація, вугільний пласт, несуча здатність, руйнування, раптові викиди, статичне і імпульсне гідророзпушування.

Анотація

Васильев Д.Л. Развитие научных основ определения параметров разгрузки призабойной части газоносных угольных пластов.– На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.15.09 – «Геотехническая и горная механика». Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепр, 2019.

В диссертации изложено развитие теории локального разрушения хрупких материалов. Выведено и дано решение дифференциального уравнения связи между нормальными и касательными напряжениями в разрушаемом теле. Разработаны методы расчета предела прочности образцов горных пород. Раскрыт механизм пригрузки призабойной части угольного пласта, формирующийся затухающим от кромки забоя вглубь массива касательными напряжениями от контактного трения между пластом и боковыми породами в виде опорного горного давления, эпюра которого описывается выпуклой квадратичной функцией. Представлены разработанные математические модели и методы расчета параметров разгрузки призабойной части газоносных угольных пластов при статическом и импульсном гидрорыхлении. Описан механизм увеличения зоны разгрузки с 3,5-4,0 до 6,0 м при импульсном гидрорыхлении по сравнению со статическим призабойной части угольных пластов, обеспечивающей повышение скорости и безопасности проходки по выбросоопасным пластам.

Разработанные научные результаты и рекомендации использованы в методиках и дополнениях к технологической проектной документации проведения и крепления подготовительных выработок на СП «Ш/у «Суходольское – Восточное» и «Ш/у «Молодогвардейское» ПАО «Краснодонуголь» в период проведения горно-экспериментальных работ по способу и устройству импульсного гидрорыхления газоносных угольных пластов для предотвращения внезапных выбросов угля и газа на этих шахтах. Результатами горно-экспериментальных работ подтверждено сокращение в 1,5 – 2 раза времени и увеличение в 1,3-1,5 раза зоны разгрузки пластов при их гидроимпульсной обработке по сравнению со статической и повышение скорости проходки подготовительных выработок по выбросоопасным угольным пластам.

На основании проведенных исследований ИГТМ НАН Украины совместно с ООО «Теплогорский завод гидрооборудования» разработано «Техническое задание на опытно-конструкторскую работу «Устройство для гидроимпульсного воздействия на угольный пласт» для промышленного освоения.

Согласно расчету ПАО «Краснодонуголь» экономического эффекта ожидаемая прибыль от внедрения способа и устройства импульсного гидрорыхления выбросоопасных пластов на шахтах ПАО составляет до 0,7 млрд грн за год в ценах 2014 г. Согласно справке распределения экономического эффекта среди участников работы долевое участие автора за год составляет до 30 млн грн.

Ключевые слова: горная порода, образец, деформация, диаграмма, прочность, разрушение, газоносный угольный пласт, статическое и импульсное гидрорыхление.

Abstract

Vasyliiev D.L. "Development of scientific foundations for determining the discharge parameters of the hollow section of gas-bearing coal seams." – Qualification scientific work on the rights manuscripts.

Dissertation for a Doctor degree of technical Sciences. Specialty 05.15.09 - "Geotechnical and mining mechanics". Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2019.

The dissertation is devoted to the development of the theory of local destruction of fragile materials. The differential equation of relation between normal and tangential stresses in a destroyed body is derived and solved. The methods of calculating the strength limit of samples and rock massifs are developed. The mechanism of loading of the hollow section of the coal formation formed by the damping of the edge of the sink into the solid of the tangent by contacting tensions from the contact friction between the formation and lateral rocks in the form of supporting mountain pressure, the diagram of which is described by a convex quadratic function, is developed. The developed mathematical models and methods of calculating the discharge parameters of the hollow section of gas-bearing coal seams with static and impulse hydraulic dispersion are presented. The mechanism of increasing the discharge zone from 3.5-4.0 to 6.0 m is described with impulse hydraulic expansion compared to the static hollow section of the coal seams, which ensures an increase in the speed and safety of excavation of excavations in the hazardous layers.

The developed scientific results and recommendations are used in addition to the technological design documentation for holding and fixing preparatory work on the mine control "Sukhodilske - Shidne" and mine control "Molodogvardiysk" of Krasnodonvuhillya OJSC during the period of conducting mining and experimental works in a manner and a device for impulse hydraulic dispersion of gas-bearing coal seams to prevent the sudden ejection of coal and gas in these mines.

The results of mining and experimental work confirmed the reduction of time in 1,5 - 2 times and an increase in 1,3-1,5 times the zone of discharge of layers during their hydropulse treatment in comparison with the static and increase the speed of the passage of preparatory developments on the release of coal seams.

On the basis of the research conducted by the IGTM NAS of Ukraine, together with LLC "Teplogorsky hydroelectric plant" developed "Technical task for research and development work" Device for hydraulic impulse action on a coal bed "for industrial development.

According to PJSC Krasnodonvuhillya's calculation of the expected economic effect, the profit from the introduction of the method and the device for pulsed hydrodistribution of hazardous layers at the mines is up to UAH 0.7 bln per year in 2014 prices. According to the information on the distribution of the economic effect among the participants of the work, the share participation of the author per year amounts to 30 million UAH.

Key words: mountain rock, sample, stress, diagram, deformation, coal seam, bearing capacity, destruction, sudden emissions, static and impulsive hydropulse loosening.

Васильєв Дмитро Леонідович

Розвиток наукових основ визначення параметрів розвантаження привибій-
ної частини газоносних вугільних пластів

(Автореферат)

РЕЗЕРВ-ОНЛІН

Підписано до друку
Гарнітура Times. Друк різнографічний.
Папір офсетний. 1,9 умов. друк. арк.
Тираж 100 прим. Зам № 509
Друк ТОВ «БАРВИКС»
Свідоцтво про внесення до державного реєстру
№24 від 25.07.2000 р.
49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 21