

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



СМОЛАНОВ СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 622.82:622.454.2 (043:5)

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ЛІКВІДАЦІЇ СКЛАДНИХ ПІДЗЕМНИХ  
ПОЖЕЖ У ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ МЕТОДАМИ  
ВЕНТИЛЯЦІЙНОГО ВПЛИВУ

Спеціальність 05.26.01 – «Охорона праці»

АВТОРЕФЕРАТ  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дніпро - 2019 р.

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України та в Центральному штабі Державної воєнізованої гірничорятувальної служби у вугільній промисловості Міненерговугілля України.

Науковий консультант:

академік НАН України, доктор технічних наук, професор **Булат Анатолій Федорович**, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, директор.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Костенко Віктор Климентійович**, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» МОН України, завідувач кафедри природоохоронної діяльності;

доктор технічних наук, професор **Лапшин Олександр Олександрович**, ДВНЗ «Криворізький національний університет» МОН України, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки;

доктор технічних наук, професор **Чеберячко Сергій Іванович**, НТУ «Дніпровська політехніка» МОН України, професор кафедри аерології та охорони праці.

Захист дисертації відбудеться “15” лютого 2019 р. о 13<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.188.01 при Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, 49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 2А.

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

Автореферат розісланий “11” січня 2019 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
доктор технічних наук, професор



В.Г. Шевченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### **Актуальність теми.**

Вугільна промисловість України є основною галуззю, що забезпечує країну енергоносіями і сировиною для металургійної промисловості. Умови праці на вугільних шахтах характеризуються великою кількістю небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які істотно впливають на життя і здоров'я працюючих і обумовлюють високий рівень аварійності, травматизму та профзахворювань у галузі. На підприємствах вугільної галузі щорічно відбувається значна кількість аварій, основними з них є: підземні пожежі, обвалення порід, вибухи газу і вугільного пилу, раптові викиди вугілля та газу. До найнебезпечніших видів аварій, які супроводжуються численними жертвами і приводять до значних матеріальних збитків, на вугільних шахтах відносяться підземні пожежі, що обумовлено їхньою високою пожежонебезпекою.

Проблема підвищення ефективності боротьби з підземними пожежами набуває особливу актуальність у Донбасі у зв'язку з ускладненими гірничо-геологічними і гірничотехнічними умовами шахт, веденням очисних і підготовчих робіт на глибоких горизонтах. Значне збільшення газовиділення, гірського тиску, швидкості вентиляційного струменя і температури ускладнили роботи з гасіння пожеж.

Особливу складність представляє процес гасіння розвинених пожеж, які не вдалося ліквідувати на початковій стадії безпосереднім впливом на вогнище пожежі вогнегасячими засобами. Гасіння таких пожеж здійснюється ізоляцією або комбінованим способом, причому тривалість гасіння може досягати декількох місяців, а іноді років. Питома вага складних розвинених пожеж становить приблизно 10-15 %. Однак ці пожежі дають до 70-80 % всіх збитків від аварій. Тому, проблема підвищення ефективності гасіння підземних пожеж зводиться, у першу чергу, до підвищення ефективності гасіння розвинених пожеж.

Відомі методи гасіння складних розвинених пожеж, які застосовують на практиці, часто виявляються малоефективними або не відповідають умовам безпеки. Однією з причин цього є недостатня вивченість закономірностей аеродинамічних і теплових процесів, які протікають в ізольованих пожежних дільницях, що перешкоджає розробці та використанню нових сучасних методів гасіння пожеж, зокрема шляхом вентиляційного впливу на вогнище пожежі.

Тому, встановлення закономірностей теплових та аерогазодинамічних процесів, що протікають в ізольованих пожежних дільницях шахти при гасінні пожеж, розробка методів вентиляційного впливу, та розвиток на цій базі наукових основ ліквідації складних підземних пожеж у вугільних шахтах є **актуальною науково-прикладною проблемою**, що має суттєве значення для зниження аварійності та підвищення рівня безпеки праці у вуглевидобувній галузі.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами.**

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до Національної програми стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища на 2001-2005 рр., затвердженою постановою Кабінету Міністрів України від 10.10.01 р. № 1320, і відповідає планам науково-дослідних робіт Інституту геотехнічної механіки ім.

М.С. Полякова НАН України по темі «Дослідження особливостей геомеханіки газонасиченого вуглепородного масиву при веденні гірничих робіт в небезпечних умовах на великих глибинах» (№ держ. реєстрації 0115U002533), в рамках якої автор був відповідальним виконавцем розділу.

**Ідея роботи** полягає у використанні встановлених закономірностей теплових та аерогазодинамічних процесів, що протікають в ізольованих пожежних дільницях, при гасінні пожеж для розробки методів ліквідації складних пожеж у вугільних шахтах вентиляційною дією.

#### **Мета і завдання досліджень.**

Мета роботи - встановлення закономірностей теплових та аерогазодинамічних процесів, що протікають в ізольованих пожежних дільницях шахти при гасінні пожеж та розробка методів вентиляційного впливу для підвищення ефективності ліквідації складних підземних пожеж.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- виконати математичне моделювання теплофізичних процесів при пожежах у гірничих виробках;
- встановити закономірності процесів взаємодії різних джерел тяги (теплова депресія, природна тяга, депресія вентилятора головного провітрювання (ВГП) на аварійній дільниці при рециркуляції продуктів горіння;
- встановити закономірності перехідних аеродинамічних процесів, що виникають на аварійній дільниці при багаторазовому реверсуванні струменя, та розробити заходи щодо скорочення їх тривалості;
- встановити закономірності впливу аварійних вентиляційних режимів на ефективність гасіння пожежі методом рециркуляції і багаторазового реверсування;
- розробити методи контролю процесу гасіння пожеж в ізольованій дільниці (включаючи експрес-методи);
- визначити область застосування нових методів гасіння складних пожеж та здійснити їх апробацію безпосередньо в аварійних умовах.

**Об'єкт дослідження** - процеси ліквідації складних підземних пожеж у вугільних шахтах методами вентиляційного впливу.

**Предмет дослідження** - закономірності теплових та аерогазодинамічних процесів, що протікають в ізольованих пожежних дільницях шахти при гасінні пожеж методами вентиляційного впливу.

#### **Методи дослідження.**

Для досягнення поставлених завдань у роботі використаний комплексний метод досліджень, що включає: аналіз існуючих літературних джерел і узагальнення науково-технічних досягнень в області ліквідації складних підземних аварій у вугільних шахтах - при виборі та обґрунтуванні напрямку досліджень; математичне моделювання, з використанням основних законів термодинаміки, тепломасопереносу і рудничної аерології; імітаційне моделювання процесів розподілу газоповітряних мас і теплоти на дільницях вентиляції шахт, ізольованих від загальшахтної вентиляційної мережі; експериментальні дослідження факторів, що визначають вентиляційний і тепловий режим аварійних дільниць - при проведенні досліджень теплової депресії і аеро- та газодинамічних процесів

в ізольованих вентиляційних дільницях (ІВД); методи чисельного моделювання - при обґрунтуванні параметрів запропонованих вентиляційних режимів; методи економічного аналізу - при оцінці запропонованих рішень і перспектив застосування розробленої технології гасіння пожеж з використанням методів вентиляційного впливу.

### **Наукові положення, що виносяться на захист.**

1. Порушення режиму вентиляції ізольованої пожежної дільниці та шахтної вентиляційної мережі визначається коефіцієнтом теплового опору, локальною тепловою депресією і глобальною тепловою депресією, обумовленими нерівномірним розподілом температури і маси повітря в об'ємі ізольованих виробок у результаті виникнення потужного джерела теплової енергії і зміни газового складу повітря; при цьому витрата повітря із часом спочатку безупинно скорочується за синусоїдальним законом, а потім, по тім же законі, наближається до первісного значення, що дозволяє істотно знизити температуру порід як у період горіння матеріалів у вогнищі, так і в період остигання порід впродовж 3-х діб з 950 до 150 °С, що сприяє скороченню строків ізоляції дільниці.

2. Надходження свіжого повітря в ізольовану пожежну дільницю залежить від величини і напрямку теплової депресії пожежі, що сформувалася в ізольованій дільниці. При сонаправленій дії теплової депресії пожежі та вентилятора головного провітрювання витоки повітря зі збільшенням депресії лінійно зростають, при протинаправленій - зменшуються в квадратичній залежності, так, при зміні теплової депресії з 0 до 150 даПа при сонаправленій дії витоки зростають з 119 до 143 м<sup>3</sup>/хв., а при протинаправленій - зменшуються з 118 до 70 м<sup>3</sup>/хв.

3. Рециркуляція пожежних газів значно прискорює процес охолодження якщо швидкість руху газів перевищує мінімальну швидкість, при якій починається турбулентний рух у гірничих виробках, яка зростає лінійно зі збільшенням кінематичної в'язкості повітря і зменшується за степеневою залежністю зі зростанням діаметру виробки, при цьому для підвищення ефективності рециркуляції необхідно, щоб еквівалентний діаметр замикаючої виробки був не менш 1 м, а усередині контуру рециркуляції не було завалів з великим аеродинамічним опором (більше 10-200 Па·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>).

4. Тривалість перехідного аеродинамічного процесу при багаторазовому реверсуванні вентиляції знижується при знятті депресії вентилятора головного провітрювання із ізольованої дільниці і зменшенні аеродинамічного опору перемичок, при цьому вміст кисню по довжині виробки знижується за параболою з 20 % на початку та в кінці виробки до 2-3 % біля вогнища пожежі, а час збереження інертного середовища на аварійній дільниці при багаторазовому реверсуванні струменя повітря в 5-6 разів більше часу при нормальній вентиляції.

5. При загальношахтному реверсуванні вентиляційний струмінь у дільниці змінить напрямку руху в тому випадку, якщо величина відношення депресій шахти у нормальному і реверсивному режимах буде меншою відношення величини критичної депресії дільниці у нормальному режимі до величини природної тяги, що діє в контурі даної дільниці; при цьому, якщо аеродинамічний опір паралельного з'єднання «лава-вироблений простір» становить від 0,02 до 0,1

киломюрга, а максимальна критична витрата повітря досягає 20-30 м<sup>3</sup>/с, при величині теплової депресії пожежі близько 160 даПа можливе перекидання витоків повітря у вироблених просторах і виникнення рециркуляції продуктів горіння в контурі «лава-вироблений простір».

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше побудовано математичну модель балансу теплоти в об'ємі вогнища пожежі ІВД, що дозволяє здійснювати прогноз динаміки середньої температури повітря у вогнищі та навколишньому масиві порід з урахуванням залежності щільності повітря від температури протягом тривалого періоду часу (до декількох місяців) з моменту виникнення пожежі.

2. Вперше отримано аналітичні залежності температури повітря у вогнищі пожежі та зонах, що примикають до неї, від аеродинамічних параметрів ІВД, що дозволяє моделювати результати впливу вентиляційного режиму на тепловий режим ІВД. Вперше встановлена закономірність, що зв'язує витрату повітря на окремих дільницях схеми провітрювання з динамікою теплових факторів пожежі, що дозволяє оцінювати вплив пожежі в ІВД на вентиляційний режим.

3. Вперше встановлено закономірності зміни витоків повітря при соннаправленій та протинаправленій дії теплової депресії пожежі та ВГП.

4. Вперше встановлені закономірності взаємодії різних джерел тяги (теплова депресія, природна тяга, депресія ВГП) на аварійній дільниці при гасінні пожеж методом рециркуляції продуктів горіння.

5. Вперше встановлені закономірності протікання перехідних газодинамічних і аеродинамічних процесів, що виникають на аварійній дільниці при багаторазовому реверсуванні струменя і додаванні інертних газів.

6. Вперше визначено умову зміни напрямку руху вентиляційного струменя у дільниці при загальношахтному реверсуванні в залежності від депресій шахти у нормальному і реверсивному режимах та величини критичної депресії дільниці у нормальному режимі та величини природної тяги.

**Наукове значення роботи** полягає у встановленні закономірностей теплових та аерогазодинамічних процесів, що протікають в ізольованих пожежних дільницях шахти при гасінні пожеж методами вентиляційного впливу, заснованих на рециркуляції продуктів горіння та шляхом багаторазового реверсування вентиляційного струменя, та розвитку на цій базі наукових основ ліквідації складних підземних пожеж у вугільних шахтах.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблено метод гасіння складних пожеж, заснований на рециркуляції продуктів горіння, та типові схеми рециркуляції продуктів горіння: із закорочуванням вентиляційного струменя; із проходженням додаткової виробки; з використанням додаткового трубопроводу.

2. Розроблено метод гасіння складних пожеж шляхом багаторазового реверсування вентиляційного струменя та схеми багаторазового реверсування продуктів горіння: з вентилятором встановленим з боку свіжого струменя; з вентилятором встановленим з боку вихідного струменя; з вентиляторами встановленими з боку свіжого і вихідного струменів; з додатковим вентилятором, установленим на поверхні; з використанням ВГП.

3. Розроблена «Методика розрахунку параметрів компенсаційного методу зниження витоків повітря через ізольовані пожежні дільниці».

4. Розроблена «Методика визначення кількості метану, що бере участь у вибуху», яка враховує надлишковий тиск у момент вибуху і геометричні розміри простору, і дозволяє оцінювати небезпеку вибуху при веденні гірничорятувальних робіт.

5. Розроблений експрес-метод визначення температури у вогнищі ізольованої пожежі, який враховує периметр активно провітрюваної зони виробленого простору, коефіцієнт теплообміну повітря з навколишніми породами та відносний час із моменту припинення горіння.

6. Розроблена «Методика визначення теплових параметрів пожежі» в залежності від витрати кисню на горіння.

7. Розроблена «Методика вибору оптимального методу гасіння пожежі» в залежності від збитків від пожеж та прийнятних умов безпеки.

8. Розроблено програмне забезпечення для виконання розрахунків теплової депресії, аеро- і газодинамічних процесів в ІВД, динаміки розвитку пожежі, параметрів технологічних схем та режимів вентиляції на ПЕОМ.

9. Розроблено способи та засоби запобігання та ліквідації підземних пожеж на шахтах та підвищення безпеки гірничих робіт: пристрій для запобігання загоряння конвеєрної стрічки на приводних та натяжних барабанах, спосіб герметизації шпурів для вибухових робіт при проходженні виробок, пристрій для розгазування тупикової гірничої виробки, аварійно-рятувальна пересувна підіймальна машина, аварійно-рятувальна пересувна лебідка, комплекс рятувальний прохідницький, пристрій для дистанційної прокладки гнучкого трубопроводу, вентиляційний трубопровід для всисного провітрювання, спосіб гасіння осередків пожежі.

*Результати дисертаційної роботи впроваджені* при ліквідації складних підземних аварій на шахтах ПАТ «Лисичанськвугілля», ДП «Артемвугілля», ДП «ВК «Краснолиманська», ДП «Луганськвугілля», ПАТ «Краснодонвугілля», ДП «Торезантрацит», ДП «Макіїввугілля». Фактичний економічний ефект, отриманий від застосування розроблених методів тільки за рахунок скорочення строку гасіння пожежі склав 209,21 тис. грн. для ДП «ВК «Краснолиманська» (акт впровадження, розрахунок економічної ефективності від 28.09.2018 р) та 171,36 тис. грн. для ВП «Шахта ім. Г.Г. Капустіна» ПАТ «Лисичанськвугілля» (акт впровадження, розрахунок економічної ефективності від 08.10.2018 р). Основні результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі НТУ «Дніпровська політехніка» МОН України при викладанні дисциплін Аерологія гірничих підприємств, Вентиляція шахт та рудників, Системи вентиляції гірничих підприємств та Аерологія гірничих та промислових підприємств студентам спеціальностей 184 - Гірництво та 263 - Цивільна безпека (довідка від 10.09.2018 р.).

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** дисертаційної роботи підтверджена коректністю постановки і рішення завдань, застосуванням класичного математичного апарата та фундаментальних положень термодинаміки, тепломасопереносу і аерогазодинаміки при

теоретичних дослідженнях, застосуванням апробованих методів чисельного моделювання при дослідженні теплових і аерогазодинамічних процесів в ІВД, погодженістю результатів чисельного моделювання, теоретичних і експериментальних досліджень (відносна похибка не перевищувала 20 %), підтвердженням ефективності запропонованих автором рішень при вирішенні практичних завдань, пов'язаних з ліквідацією складних підземних аварій на гірничих підприємствах.

**Особистий внесок здобувача.** Мета і завдання досліджень, ідея роботи, основні наукові положення, висновки і рекомендації сформульовані автором самостійно. Авторіві належить: дослідження процесів формування в ізольованому просторі теплової депресії пожежі і її зміни в процесі повторної подачі продуктів горіння до вогнища пожежі, встановлення закономірностей взаємодії різних джерел тяги на аварійній дільниці при рециркуляції продуктів горіння, дослідження перехідних аеродинамічних процесів і впливу аварійних вентиляційних режимів на ефективність гасіння пожежі методом рециркуляції та багаторазового реверсування. Апробація нових методів гасіння складних підземних пожеж в аварійних умовах здійснювалась під безпосереднім керівництвом автора, як уповноваженого керівника ліквідації аварій.

Текст дисертації автором викладений особисто.

#### **Апробація результатів дисертації.**

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і одержали позитивну оцінку на міжнародних симпозиумах і конференціях: "International Conference of Safety in Mines Research Institutes" (Katowice, Poland, 8-11 October 2001), «Безпека життєдіяльності в ХХІ столітті» (м. Дніпропетровськ, 29 січня 2002 р.), «Неделя горняка» (м. Москва, 28 січня - 3 лютого 2002 р.), «Україна наукова 2003» (м. Дніпропетровськ, 16-20 червня 2003 р.), «Донбас-2020: наука і техніка виробництву» (м. Донецьк, 03-04 лютого 2004 р.), «Школа підземної розробки» (м. Дніпропетровськ, 17-22 вересня 2007 р.), «Форум гірників» (м. Дніпропетровськ, 16 жовтня 2002 р., 16 жовтня 2003р., м. Дніпро, 10-13 жовтня 2018 р.), II Міжнародна конференція по вугільній промисловості «Тенденції та перспективи видобутку, використання вугілля в Україні та світі» (м. Дніпро, 12 квітня 2018 р.), засіданнях технічної ради ДВГРС.

**Публікації.** Основний зміст роботи опублікований в 53 наукових працях, з яких: 5 монографій, 2 навчальних посібники, 28 статей у наукових фахових виданнях (з яких 5 - у закордонних виданнях та у виданнях, що входять у міжнародні наукометричні бази), 9 патентів на винахід, 8 - матеріали наукових конференцій, форумів та симпозиумів, 1 – стандарт підприємства, 13 робіт опубліковано без співавторів.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, семи розділів і висновку. Вона містить 376 сторінок машинописного тексту (298 сторінок основного тексту), включаючи 76 рисунків, 19 таблиць, список використаних джерел з 250 найменувань і три додатки на 20 сторінках.



## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі дисертації виконаний аналіз стану питання ліквідації складних підземних пожеж у вугільних шахтах.

Аналіз показав, що у вугільних шахтах щорічно відбувається в середньому близько 100 аварій на ліквідацію яких залучаються підрозділи Державної воєнізованої гірничорятувальної служби у вугільній промисловості (ДВГРС) (табл. 1). Основними видами аварій є: підземні пожежі, обвалення порід, вибухи газу і вугільного пилу, раптові викиди вугілля та газу. У загальній кількості підземних аварій, пожежі займають у середньому 67 %, а число складних розвинених пожеж, які дають до 70 % всіх збитків від аварій, становить близько 10 %.

Таблиця 1 - Число підземних аварій у вугільних шахтах України за 2007-2017 рр.

Види аварій	Кількість аварій по роках											Всього	Сер. знач.
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017		
Пожежі	18	19	19	12	14	12	11	14	2	3	5	452	22,6
Вибухи	2	5	7	5	5	4	3	4	1	3	3	65	3,25
Викиди вугілля і газу	3	2	2	4	1	2	4	4	0	1	1	57	2,85
Обвалення	13	25	19	13	18	13	12	6	2	3	2	327	16,35
Затоплення	0	0	1	0	2	1	1	0	0	0	0	13	0,65
Разом	36	51	48	34	40	32	31	28	5	10	11	914	45,7

Значна питома вага пожеж обумовлена високою пожежонебезпекою вугільних шахт, що з однієї сторони пов'язано з великою насиченістю гірничих виробок різними горючими матеріалами (метан, вугілля, дерев'яне кріплення, гумово-кабельні вироби, конвеєрні стрічки, паливо-мастильні матеріали, вибухові речовини та ін.), а з іншого боку - наявністю численних потенційних джерел запалення (електричне і механічне устаткування, підривні роботи, вогневі роботи, паління та ін.)

Аналіз даних про хід ліквідації складних підземних аварій гірничорятувальними підрозділами і літературних джерел показав, що відомі методи гасіння складних розвинених пожеж, які застосовують на практиці, часто виявляються малоефективними або не відповідають умовам безпеки. Відомі окремі випадки використання методів гасіння пожеж шляхом вентиляційного впливу на вогнище пожежі. Однак така технологія не одержала поширення через недостатню вивченість аеродинамічних і теплових процесів, що протікають в ізольованих пожежних дільницях, відсутність контролю параметрів пожежі і порушення умов безпеки і у цей час не використовується.

Існуючі методи визначення характеру протікання процесу горіння, температури газів і вугілля в недоступних місцях не враховують специфіку гасіння пожеж рециркуляцією і багаторазовим реверсуванням.

Провідні позиції в галузі вдосконалювання методів та засобів ліквідації складних підземних пожеж у вугільних шахтах займали і займають: Державна воєнізована гірничорятувальна служба у вугільній промисловості Міненерговугілля України, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, НТУ «Дніпровська політехніка» МОН України, Донецький національний технічний університет МОН України, Криворізький національний університет МОН України, Інститут фізики гірничих процесів НАН України, Науково-дослідний інститут гірничорятувальної справи і пожежної безпеки «Респіратор» Міненерговугілля України, Державний Макіївський науково-дослідний інститут з безпеки робіт у гірничій промисловості Міненерговугілля України та ін.

Ефективність дій гірничих рятівників по ліквідації пожежі та розмір матеріального збитку багато в чому залежить від правильного вибору аварійного вентиляційного режиму. Аналіз літературних джерел показав, що питання вибору вентиляційних режимів при гасінні пожеж шляхом вентиляційного впливу дотепер не вивчені.

Сформульовано мету, завдання і обрані методи дослідження.

**Другий розділ** присвячений математичному моделюванню та встановленню закономірностей теплофізичних процесів при пожежах у гірничих виробках .

Для підвищення достовірності визначення величини теплової депресії виконаний аналіз руху повітряних потоків в об'ємі газового середовища ізольованої виробки при наявності в ній вогнища пожежі з урахуванням всіх потоків повітря між якими відбувається тепломасообмін, наявності перетікань повітря із зовнішнього середовища та інших сонаправлених або протинаправлених потоків; а так само розходжень умов тепломасообміну на окремих ділянках схеми.

У загальному випадку потокорозподіл ізольованої виробки представляється наскрізною схемою провітрювання, з основним повітряним потоком  $G_0$ , кг/с, додатковою витратою, що надходить у початковому перетині виробки з виробок, що примикають, на сполученні  $G_{\text{дод}}$ , кг/с і рівномірно розподіленими по довжині виробки припливами  $G_{\text{пр}}$ , кг/с та витоками  $G_{\text{вит}}$ , кг/с повітря. Схема провітрювання ІВД, складена нами з метою аналізу балансу повітряних мас у ділянці для наступного використання результатів цього аналізу при постановці завдань теплопереносу наведена на рис. 1.

На схемі джерела теплової тяги, які можуть виникати при пожежі, умовно позначені  $h_t$  з додатковими індексами  $_{\text{л}}$  і  $_{\text{г}}$ , щоб підкреслити їхній поділ на локальну  $h_{\text{тл}}$ , Па, що діє усередині обсягу виробки, і глобальну  $h_{\text{тг}}$ , Па, прикладену до всього стовпа повітря у виробки, теплову депресію. Символ  $h_{\text{пр}}$  указує на умовне джерело тяги, обумовлене загальшахтною вентиляцією, а гілкою 1 мо-

делюється вся шахтна вентиляційна мережа, до якої примикає вентиляційна мережа ІВД.

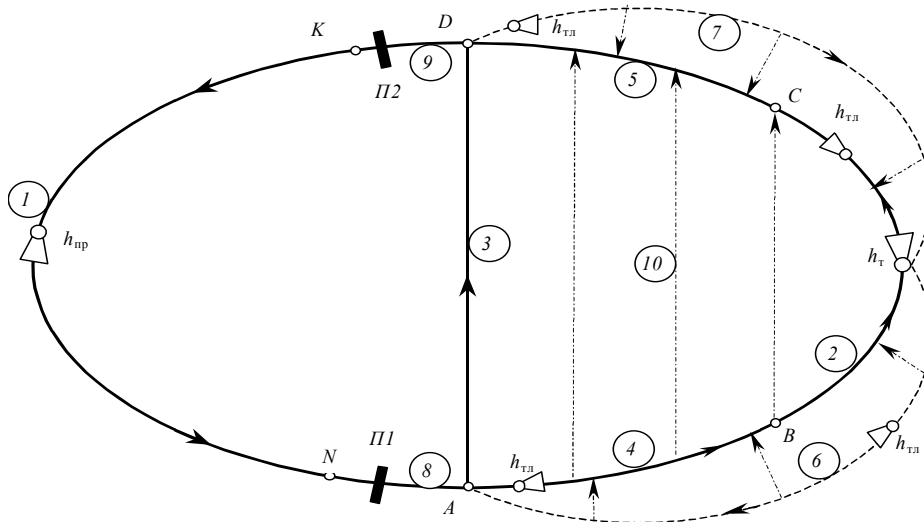


Рисунок 1 - Схема вентиляційних з'єднань ізольованої дільниці

Аналіз схеми показав, що вона не може бути зведена до простого паралельно-послідовного з'єднання гілок, а виміри на перемичках не можуть служити достатньою підставою для прогнозу не тільки температури, але й самої теплової депресії, тому що поняття теплової депресії ІВД розширюється далеко за рамки поняття ваги стовпа повітря в окремій похилій виробці. У цьому випадку теплова депресія ІВД представляється полем тиску у всіх вузлах схеми за винятком розподілу тиску при відсутності теплових джерел.

Величина теплової депресії залежить від щільності повітря у ІВД, що у свою чергу пов'язана зі вмістом домішок метану, водяних пар і температурою в умовах ізольованої пожежі. Виконаний нами аналіз дозволив одержати залежності щільності від зазначених факторів (див. рис. 2) і показав, що щільність повітря, тільки за рахунок вологості, зменшується майже на 25 %; при повному заміщенні повітря метаном варто очікувати зменшення маси газового середовища у виробках аварійної дільниці приблизно вдвічі; а підвищення температури повітря до 1000 °С приводить до збільшення його об'єму майже в три рази.

Ці фактори варто враховувати при визначенні теплової депресії, тому що її величина прямо пропорційна щільності повітря.

Величина теплової депресії, що може сформуватися в різні періоди ліквідації аварії, залежить від динаміки середньої температури повітря в межах об'єму вогнища пожежі, у даних дослідженнях визначена на підставі рівняння балансу теплоти у вогнищі пожежі

$$c_{pn} \rho_{pn} V_{pn} \frac{\Delta T_{pn}}{\Delta \tau} = \Theta_{gm} + \Theta_{kp} + \Theta_{to}, \quad (1)$$

де  $c_{pn}$  – питома теплоємність повітря в межах вогнища пожежі, Дж/(кг·К);  $\rho_{pn}$  – щільність повітря з домішками в межах вогнища пожежі, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta T_{pn}$  – зміна температури повітря, К, у проміжок часу  $\Delta \tau$ , с, у межах об'єму  $V_{pn}$ ;  $\Theta_{gm}$  – потуж-

ність тепловиділення при горінні матеріалів, що становлять пожежне навантаження виробки, Вт;  $\Theta_{\text{кп}}$  – потужність конвективного переносу теплоти повітряним потоком, Вт;  $\Theta_{\text{то}}$  – потужність конвективного теплообміну між об'ємом повітря у вогнищі пожежі та навколишнім масивом порід, Вт;

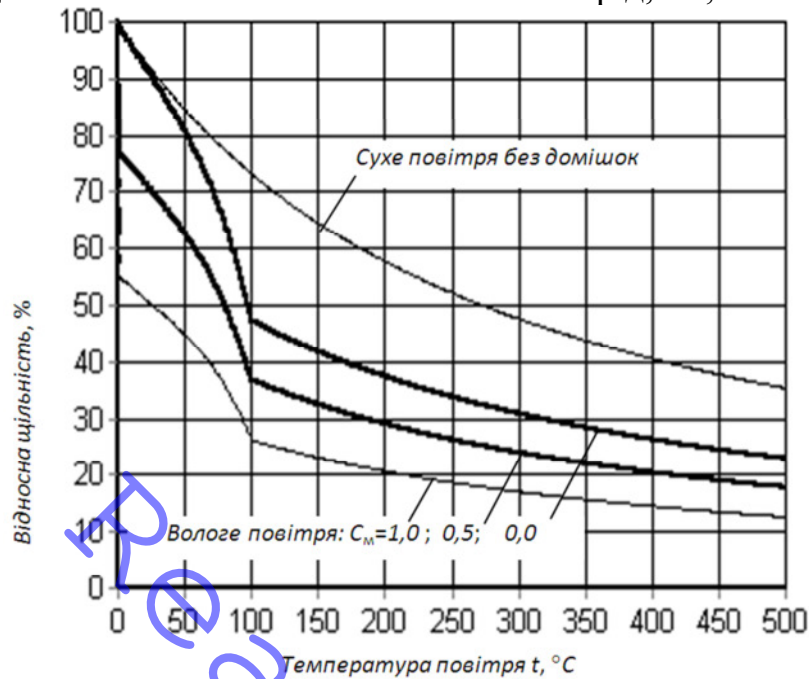


Рисунок 2 - Залежність щільності повітря від температури, вологості і вмісту метану

Ліва частина рівняння (1) являє собою зміну теплової потужності у вогнищі пожежі протягом  $\Delta\tau$ , а права – алгебраїчну суму потужностей джерел (стоків) теплоти, що діють у межах  $V_{\text{п}}$  в той же проміжок часу. Для рішення рівняння виконаний аналіз вмісту величин, що входять в обидві частини рівняння з урахуванням залежності величин теплоємності та щільності повітря при пожежі від температури, вологості та вмісту метанової домішки.

Отримане приватне рішення, що моделює динаміку температури у вогнищі при стандартній щільності та теплоємності повітря в умовах незмінної температури стінок, має вигляд

$$t = \frac{1 + \varphi \cdot St \cdot t_{\Omega}}{1 + \varphi \cdot St} \{1 - \exp[-(1 + \varphi \cdot St) \cdot \bar{\tau}]\}, \quad (2)$$

де  $\varphi = \varphi(t, \bar{\tau}, C_m)$  – функція відмінностей щільності та теплоємності вологого повітря з домішкою метану від стандартних значень цих параметрів для сухого повітря без домішок, 1;  $t_{\Omega}$  – відносне значення температури;  $St$  – безрозмірний комплекс (аналог критерію теплової подоби Стентона), що характеризує співвідношення між інтенсивністю теплообміну і фізичною теплоємністю повітря;  $\bar{\tau} = \tau / \tau_0$  – відносний час;  $\tau_0$  – час проходження повітряного потоку через вогнище пожежі, с.

В інших випадках рівняння (1) може бути вирішено тільки чисельними методами. На рис. 3 представлені температурні криві, отримані при одному з

варіантів моделювання динаміки температури у вогнищі пожежі, коли  $St=0,067$ ,  $t_{\Omega} = 0,0$ ;  $\Delta T_{\text{он}} = 1000$  °С, що відповідає швидкості повітряного потоку  $u_0 = 0,5$  м/с; при перетині виробки  $s = 10,0$  м<sup>2</sup> і довжині зони горіння  $l = 2,0$  м.

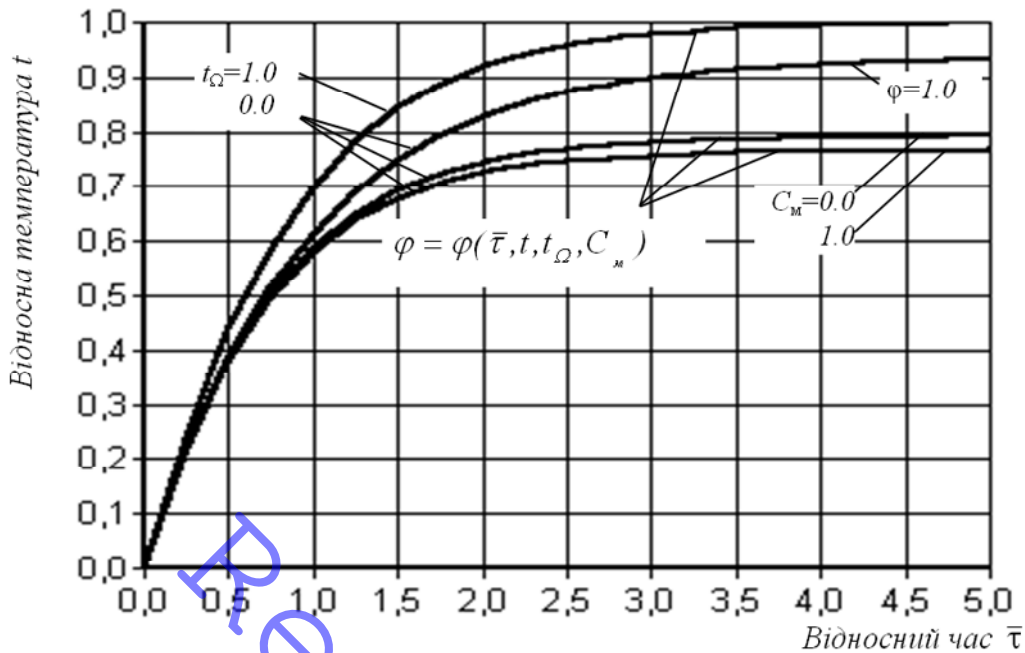


Рисунок 3 - Динаміка середньої температури повітря у вогнищі пожежі з урахуванням вологості та вмісту метану

При складних пожежах, які тривають до декількох місяців, виникає завдання визначення температури стінок виробки, тому що температура порід, що вміщують, як і повітряного потоку, підвищується, і зневажа впливом її динаміки на формування теплової депресії в ізольованих виробках неприпустима. У результаті проведених досліджень побудована математична модель динаміки температури повітря і порід у вогнищі пожежі впродовж всього періоду його ізоляції. Вона являє собою систему рівнянь (3), (4) із крайовими умовами (5), (6) і (7):

$$\frac{dt}{d\tau} = i - t - \varphi \cdot St \cdot (t - i), \quad (3)$$

$$\frac{dt}{d\bar{\tau}} = \Psi \cdot St \cdot (t - i), \quad (4)$$

$$T_{\text{п}} = T_{\text{пор}} = T_{\text{ст}} = T_0 \text{ або } t = i = 0, \quad (5)$$

$$\tilde{T}_{\text{п}}(0) = T_{\text{п}}(\tau_r); \tilde{T}_{\text{пор}}(0) = T_{\text{пор}}(\tau_r) \text{ або } \tilde{i}(0) = i(\tau_r); \quad t_0(0) = i(\tau_r), \quad (6)$$

$$i'' + a_1 \cdot i' + a_0 \cdot i = i\psi, \quad (7)$$

де  $\bar{\tau}_r = \tau_r / \tau_0$  – відносна величина періоду горіння пожежі;  $\tilde{T}_{\text{п}}(\tilde{\tau})$ ,  $\tilde{i}(\tilde{\tau}_0)$  та  $\tilde{T}_{\text{п}}(\tilde{\tau})_{\text{пор}}$ ,  $t_0(\tilde{\tau}_0)$  – температура повітря і порід після припинення горіння у вогнищі пожежі;  $\tilde{\tau} = \tau - \tau_r$  – час із моменту припинення горіння у вогнищі пожежі,  $\tilde{\tau}_0 = \bar{\tau} - \bar{\tau}_r$  – відносний час із моменту припинення горіння у вогнищі пожежі;  $a_1 = 1 + (\varphi + \psi)St$  і  $a_0 = \psi St$  - константи.

Використання цієї моделі дозволяє досліджувати залежність температури

повітря і порід від потужності тепловиділення палаючих у вогнищі матеріалів, вентиляційних параметрів ІВД і теплофізичних властивостей порід протягом усього періоду ліквідації аварії до і після припинення горіння у вогнищі пожежі.

Теплові розрахунки чисельним методом з використанням запропонованої моделі правомірні при будь-яких значеннях витрат повітряного потоку, у тому числі й тих, що змінюються в процесі гасіння пожежі. Для приклада на рис. 4 наведені результати моделювання динаміки температури повітря і порід у ІВД при постійній і змінній витраті повітря.

Величина теплової депресії пожежі визначалася нами виходячи з рівняння руху повітряного потоку уздовж всіх виробок ізольованої ділянки відповідно до розрахункової схеми (рис. 1)

$$-\rho u \frac{du}{dx} = \frac{dp}{dx} + \frac{\lambda_{тр}}{2 \cdot D_e} \rho u^2 + \left( \frac{d\rho}{dx} \cdot \delta \cdot \cos\beta + \rho \cdot \sin\beta \right) \cdot g, \quad (8)$$

де  $\lambda_{тр}$  – коефіцієнт тертя;  $\beta$  – кут нахилу виробки, град;  $D_e$  і  $\delta$  – діаметр і радіус поперечного перерізу повітряного потоку, еквівалентного круглому перетину, м.

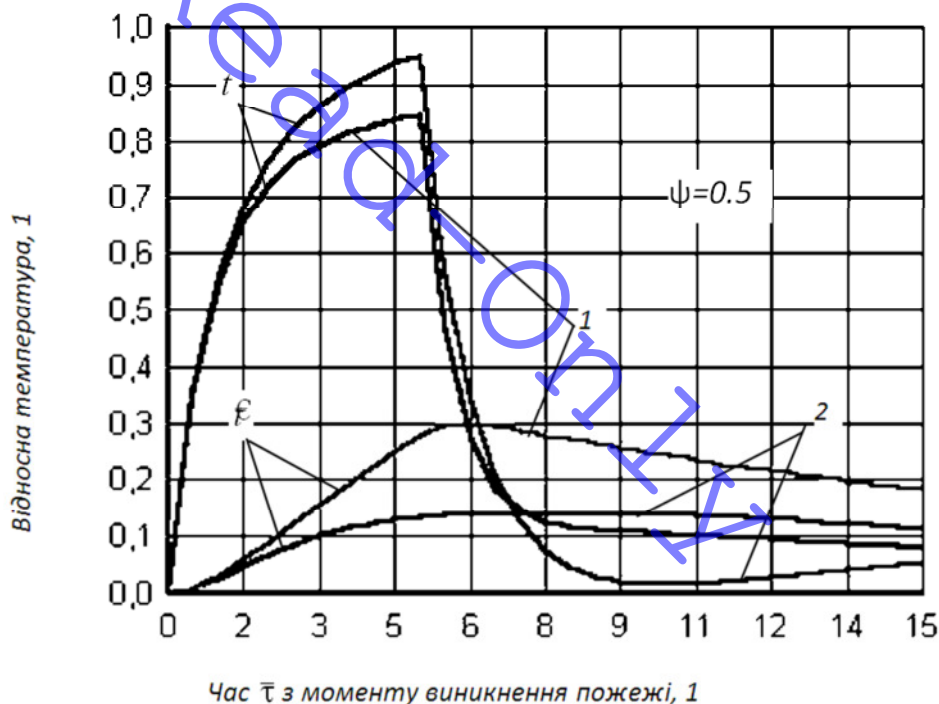


Рисунок 4 - Динаміки температури повітря і порід у ІВД при постійній (1) і змінній (2) витраті повітря

Гравітаційні сили в рівнянні (8) представлені двома величинами. Перша з них,  $p_{хл} = \frac{d\rho}{dx} \cdot \delta \cdot g \cdot \cos\beta$ , Н/м<sup>3</sup> – величина сил тиску на одиницю об'єму, що виникають у результаті зміни щільності повітря, у напрямку повітряного потоку. Друга,  $p_{хв} = \rho \cdot g \cdot \sin\beta$ , Н/м<sup>3</sup> – обумовлена впливом вертикальної складової  $\vec{p}_{св}$  вектора статичного тиску  $\vec{p}_{ст}$  на той же напрямок, при цьому  $p_{ст} = \sqrt{p_{хг}^2 + p_{хв}^2}$ .

Рішення рівняння (8) для ділянки виробки має вигляд:

$$h = p_0 - p_l = \left[ \frac{\rho_0}{RS^2} \left( \frac{1}{f_{\rho l}} - 1 \right) + \tilde{f}_\rho \right] RQ_0^2 + \rho_0 g [\delta(1 - f_{\rho l}) \cos \beta + l(1 - \bar{f}_\rho) \sin \beta], \quad (9)$$

де індекси '0' та 'l' – указують на значення змінних у початковому і кінцевому перетинах дільниці виробки, відповідно;  $\tilde{f}_\rho$  – середнє гармонійне значення функції щільності на дільниці виробки, 1;  $\bar{f}_\rho$  – середнє значення функції щільності на дільниці виробки, 1;  $\rho_0 g l \sin \beta$  – збільшення статичного (барометричного) тиску уздовж дільниці виробки, Па.

Вхідні в праву частину (9) аналітичні вирази мають наступний фізичний зміст:  $\tilde{f}_\rho$  – коефіцієнт, що дозволяє враховувати зміну аеродинамічного опору за рахунок розширення повітряних об'ємів при нагріванні;  $h_{тр} = \rho_0 g \delta (1 - f_{\rho l}) \cos \beta$  – локальна теплова депресія пожежі, Па;  $h_{тр} = \rho_0 g l (1 - \bar{f}_\rho) \sin \beta$  – глобальна теплова депресія пожежі, Па.

Виконані дослідження показали, що теплова депресія ІВД, а отже і порушення режиму вентиляції ІВД та шахтної вентиляційної мережі в цілому обумовлюється коефіцієнтом теплового опору, локальною тепловою депресією і глобальною тепловою депресією. Витрата повітря із часом спочатку безупинно скорочується за синусоїдальним законом, а потім, по тім же законі, наближається до первісного значення, що дозволяє істотно знизити температуру порід як у період горіння матеріалів у вогнищі, так і в період остигання порід впродовж 3-х діб з 950 до 150 °С, що сприяє скороченню строків ізоляції дільниці.

Результати досліджень надають можливість достовірного прогнозу режиму вентиляції виробок ІВД на різних стадіях ліквідації аварії та дозволяють шляхом математичного моделювання визначити можливість і доцільність застосування окремих способів як вентиляційного, так і активного впливу засобами гасіння на температурний режим дільниці, здійснювати порівняльний аналіз ефективності цих способів.

У **третьому розділі** наведені результати дослідження методу гасіння пожеж, заснованого на рециркуляції продуктів горіння.

Теоретично проаналізовані процеси взаємодії різних джерел тяги (теплова депресія, природна тяга, депресія ВГП) на аварійній дільниці (рис. 5) при рециркуляції продуктів горіння для умов, коли теплова депресія сонаправлена і протинаправлена депресії ВГП.

При сонаправленій тепловій депресії кількість рециркулюємого газу визначається виразом

$$Q_p = \frac{\sqrt{h_T(r_a + r_o) - r_a \cdot r_o \cdot Q_{sum}^2} - r_a \cdot Q_{sum}}{r_a + r_o}, \quad (10)$$

де  $r_a, r_o$  – аеродинамічний опір відповідних гілок, Па·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>;  $Q_{sum}$  – витоки повітря через ІВД, м<sup>3</sup>/с.

Аналіз отриманого виразу (10) показує, що збільшення витоків повітря через ізольовану пожежну дільницю приводить до зниження кількості повітря, залученого в рециркуляцію, що вкрай небажано.

Величина витоку повітря через ІВД для даного випадку становить

$$Q_{\text{вум}} = \sqrt{\frac{h_e + r_e \cdot h_T / (r_a + r_e)}{R_a + R_e}}, \quad (11)$$

де  $R_a$  та  $R_e$  - опір ізолюючих перемичок,  $\text{Па} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^6$ .

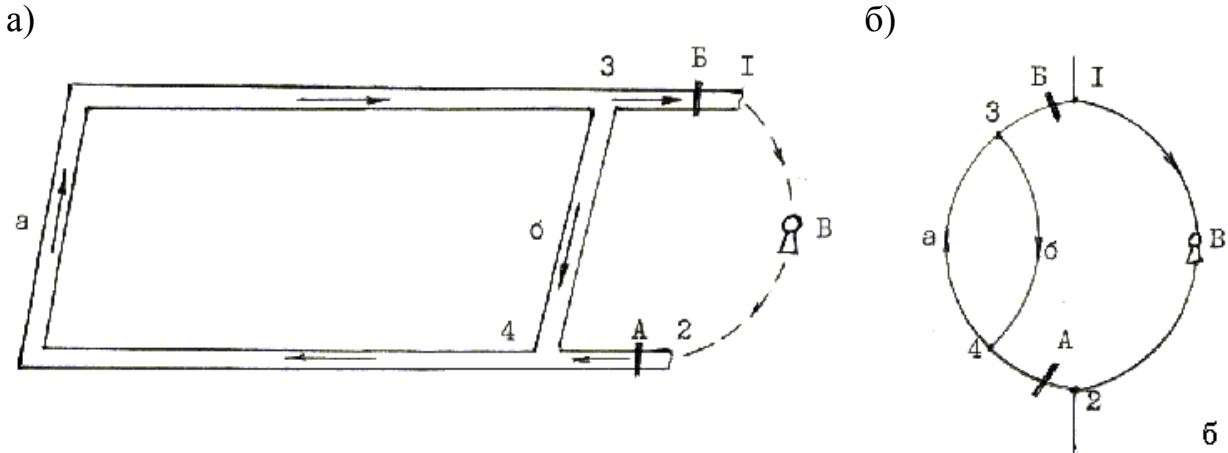


Рисунок 5 - Схема ізольованої пожежної дільниці: а – напрямок руху повітря при рециркуляції газів; б – схема вентиляційних з'єднань

Зменшити величину витоків повітря через ізольовану дільницю, не знижуючи кількості рециркулюємого газу, можна шляхом зменшення депресії ВГП, що припадає на аварійну дільницю або аеродинамічний опір тієї гілки, у якій при рециркуляції відбувається перекидання повітряного потоку (тобто гілки б, див. рис. 5).

При протинаправленій тепловій депресії кількість рециркулюємого газу і величина витоків визначаються виразами

$$Q_p = \frac{\sqrt{h_T(r_a + r_e) - r_a \cdot r_e \cdot Q_{\text{вум}}^2 - r_e \cdot Q_{\text{вум}}}}{r_a + r_e}, \quad (12)$$

$$Q_{\text{вум}} = \sqrt{\frac{h_e - h_T + r_a Q_p^2}{R_a + R_e}}. \quad (13)$$

З формули (12) випливає, що при протинаправленій тепловій депресії збільшення витоків повітря приводить до зниження витрати повітря в контурі рециркуляції. Для зменшення негативного впливу витоків повітря на процес рециркуляції варто прагнути до того, щоб значення  $r_e$  було мінімальним.

Аналіз залежності (13) показує, що при дії в ізольованому просторі теплової депресії, протинаправленої ВГП, виток повітря зменшуються. Причому, виток дорівнюють нулю в тому випадку, якщо виконується умова  $h_T = h_e + r_a Q_p^2$ . Оптимальне значення депресії, яку потрібно прикласти до ізольованої дільниці для того, щоб виключити надходження свіжого повітря до вогнища пожежі в цьому випадку дорівнює

$$h_e = h_T \left( 1 - \frac{r_a}{r_a + r_e} \right). \quad (14)$$

Таким чином, при гасінні підземних пожеж методом рециркуляції варто конструювати схему таким чином, щоб тепла депресія була протинаправлена



депресії ВГП. Для цього необхідно вибирати відповідні аварійні режими, наприклад, місцеве або загальшахтне реверсування вентиляційних струменів.

Виконаний аналіз процесу гасіння пожежі методом рециркуляції показав, що для попередження рецидиву пожежі після припинення горіння у вогнищі пожежі, необхідно, щоб температура вугілля знизилася до критичної величини, яка складає, залежно від марки вугілля, 70-120 °С. При відсутності рециркуляції газів процеси розсіювання тепла протікають дуже повільно і тривалість охолодження може доходити до декількох місяців. Рециркуляція пожежних газів значно прискорює процес охолодження якщо швидкість руху газів перевищує мінімальну швидкість, при якій починається турбулентний рух у гірничих виробках:

$$V_{\min} = \frac{Re \cdot \nu}{d}, \quad (15)$$

де  $\nu$  - кінематична в'язкість повітря, м<sup>2</sup>/с;  $d$  - діаметр виробки, м;  $Re$  – число Рейнольдса при якому рух переходить із ламінарного в турбулентний (для гірничих виробок  $Re=1000-1500$ ).

Виконані розрахунки показали, що в реальних умовах кількість теплоти, що забирається рециркулюючим потоком, перевищує кількість теплоти, що розсіюється за рахунок теплопровідності порід, від 2,3 до 59 разів. Найбільший ефект від рециркуляції можна одержати при охолодженні вугільного масиву, що характеризується низькою теплопровідністю. Довжину контуру рециркуляції, виходячи з умов ефективного виносу тепла, варто вибирати в межах 800-1500 м.

Теоретично показано, що при гасінні пожежі методом рециркуляції швидкість руху газів змінюється в порівняно вузькому діапазоні через те, що зниження теплової депресії супроводжується зменшенням еквівалентного опору контуру рециркуляції. Для підвищення ефективності рециркуляції необхідно, щоб еквівалентний діаметр замикаючої виробки був не менш 1 м, а усередині контуру рециркуляції не було завалів з великим аеродинамічним опором (більше 10-200 Па·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>). Для посилення тяги в контурі рециркуляції доцільно використовувати діоксид вуглецю, що одночасно прохолоджує газовий потік.

Проведені дослідження впливу теплової депресії на процеси в ізольованій пожежній дільниці. Вплив теплової депресії на величину витоків повітря через ізольовану пожежну дільницю характеризує рис. 6. Аналіз рис. 6 показує, що при збільшенні сонаправленої теплової депресії витoki повітря через ізольовану пожежну дільницю зростають, причому ступінь їхнього збільшення залежить від еквівалентного діаметра замикаючої виробки 7. Так, при діаметрі останньої 0,4 м витoki повітря збільшуються в 1,5 рази, а при діаметрі 1 м - в 1,2 рази. При діаметрі виробки більше 1,2 м збільшенням витоків повітря можна зневажити. Отже, при організації рециркуляції варто прагнути до того, щоб діаметр замикаючої виробки був не менше 1 м.

На рис. 7 приводяться результати комп'ютерного моделювання розглянутої ізольованої пожежної дільниці при протинаправленій теплової депресії.

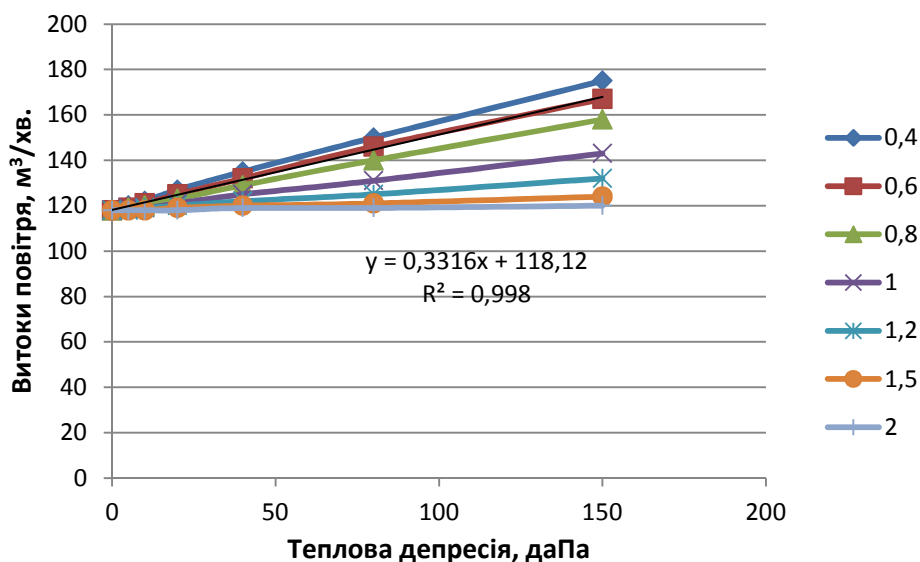


Рисунок 6 - Вплив сонеправленої теплової депресії на величину витоків повітря через ізольовану пожежну дільницю при різному діаметрі замикаючої виробки (м)

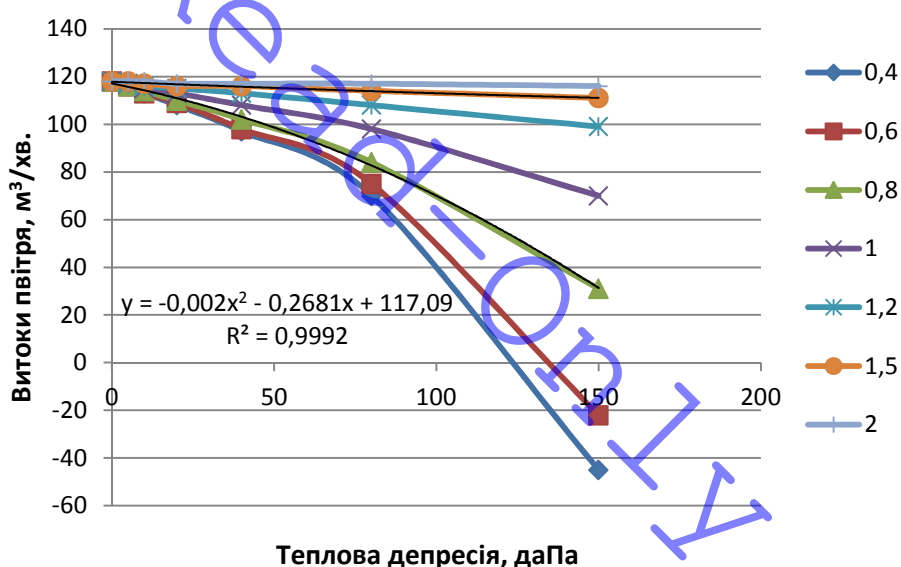


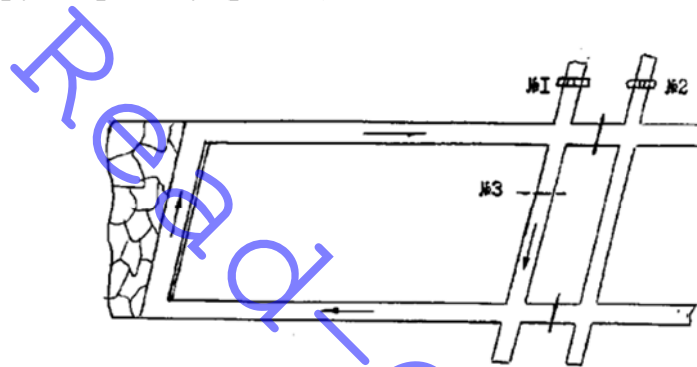
Рисунок 7 - Вплив протинаправленої теплової депресії на величину витоків повітря через ізольовану пожежну дільницю при різному діаметрі замикаючої виробки (м)

Аналіз рис. 7 показує, що з ростом теплової депресії, витоків повітря через ізольовану дільницю зменшуються. Причому ступінь їхнього зменшення залежить від еквівалентного діаметра замикаючої виробки. Так, при діаметрі останньої 0,4 м витоків зменшуються до нуля при тепловій депресії близько 120 даПа. При величині останньої 150 даПа витоків повітря склали 45 м<sup>3</sup>/хв., причому рухалися вони у зворотному напрямку (явище перекидання витоків повітря). При діаметрі замикаючої виробки 0,8 м перекидання витоків не відбувалося навіть при величині теплової депресії 150 даПа, однак величина їх знизилася в 3,8 рази. При діаметрі замикаючої виробки більше 1,5 м витоків повітря змінюються незначно при збільшенні теплової депресії.

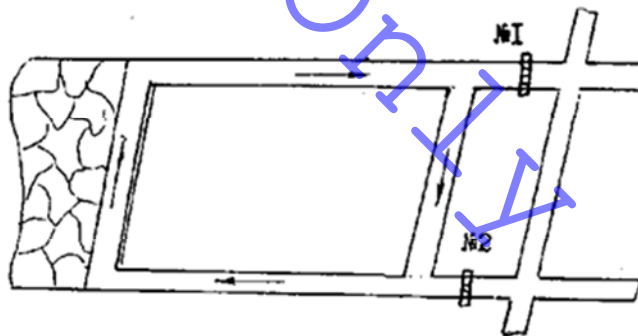
Результати комп'ютерного моделювання процесу гасіння пожеж методом рециркуляції для конкретних умов і проведені шахтні експерименти підтвердили справедливість теоретичних висновків і показали, що навіть після зниження температури бічних порід до критичної, за рахунок теплової депресії забезпечується достатня витрата повітря для ефективного охолодження вугільного масиву. Метод гасіння пожеж шляхом рециркуляції продуктів горіння доцільно застосовувати, в основному, при пожежах, що виникли в межах виїмкових ділянок. При більших об'ємах останніх підготовчі роботи зі створення замкнутого контуру досить трудомісткі, а втрати герметизації великі. У цих умовах доцільно застосовувати метод багаторазового реверсування вентиляції на аварійній ділянці.

За результатами досліджень запропоновані типові схеми гасіння складних ізольованих пожеж методом рециркуляції продуктів горіння: із закорочуванням вентиляційного струменя; із проходженням додаткової виробки; з використанням додаткового трубопроводу (рис. 8).

а)



б)



в)

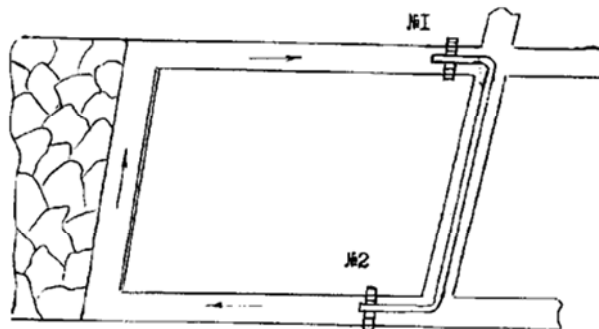


Рисунок 8 - Типові схеми рециркуляції: а - із закорочуванням вентиляційної мережі; б - із проходженням додаткової виробки; в - із трубопроводом

У **четвертому розділі** наведені результати дослідження методу гасіння пожеж шляхом багаторазового реверсування вентиляційного струменя.

Сутність методу полягає в створенні на певний період часу на ізолюючих перемичках депресії протилежного знаку, при якій витоки повітря через аварійну дільницю міняють напрямок руху. Період реверсування вибирається таким, щоб чисте повітря не встигло потрапити в зону горіння. Кількість циклів повинна бути такою, щоб вміст кисню в ізольованій дільниці знизився до рівня, при якому усувається можливість самозаймання вугілля і вибуху метану. При цьому не повинні порушуватися вибухозахист ізольованої дільниці та провітрювання інших (неаварійних) дільниць.

Аналіз аеродинаміки багаторазового реверсування показав, що при реверсуванні вентиляції в ізольованій дільниці мають місце перехідні аеродинамічні процеси, тривалість яких порівнянна із тривалістю циклу, що необхідно враховувати при гасінні пожеж методом багаторазового реверсування.

При аналізі перехідних процесів на ІВД розглянуті два найбільш типові випадки:

- дільниці, депресія яких в основному, зосереджена на ізолюючих перемичках (наприклад, при пожежах у гірничих виробках);
- дільниці, депресія яких розосереджена по довжині ізольованої дільниці (наприклад, ізольований вироблений простір).

Показано, що перехідний аеродинамічний процес на ізольованих дільницях із зосередженою на перемичках депресією протікає у два етапи. На першому етапі відбувається заповнення ізольованого простору чистим повітрям, на другому починається процес власне реверсування вентиляційного струменя. На обох етапах відбувається зростання вентиляційного тиску. Отримано аналітичні залежності, що дозволяють розрахувати тривалість перехідного процесу на кожному етапі.

Шляхом рішення диференціального рівняння, що описує рух газоповітряної суміші на ІВД з урахуванням умови нерозривності, для перехідного аеродинамічного процесу на ІВД з депресією розосередженою по довжині ізольованої дільниці отримана система залежностей, що описує зміну тиску  $P$  и витрати повітря  $Q$  уздовж ізольованої дільниці ( $x$ ) довжиною  $\ell$  від часу ( $\tau$ ) з моменту зміни тиску в камері його вирівнювання стрибком від  $P_1$  до  $P_2$ :

$$\begin{cases} P(x, \tau) = P_2 - (P_2 - P_0) \frac{x}{\ell} - (P_2 - P_0) \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\frac{\pi n x}{\ell})}{n} e^{-\frac{\pi^2 n^2 a \tau}{\ell^2}} \\ Q(x, \tau) = Q_2 - 4Q_2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\frac{\pi n x}{\ell}) \cdot e^{-\frac{\pi^2 n^2 a \tau}{\ell^2}} \end{cases}, \quad (16)$$

де  $P_0$  – початковий тиск, Па;  $Q_2$  – витрата газоповітряної суміші через ІВД після закінчення перехідного процесу, м<sup>3</sup>/с;  $a = \frac{\rho_0 B T I}{R Q_2 S}$  – коефіцієнт, (м<sup>2</sup>/с);

$n$  – номер приватного рішення;  $\rho_0$  - щільність повітря при нормальних умовах, кг/м<sup>3</sup>;  $B$  - емпірична константа.

Тривалість перехідного аеродинамічного процесу залежить від парамет-

рів ізолюваної пожежної дільниці, параметрів джерел тяги і характеру розподілу депресії в ізолюваній дільниці

$$\tau_{II} = \frac{h_2 V}{2Q_2^2 \rho_0 B T}. \quad (17)$$

Розрахунки на комп'ютері з використанням залежностей (16) показали, що 20 членів ряду дають досить точно наближення до початкового розподілу з похибкою не більше 5 %. На рис. 9 представлено за результатами моделювання на комп'ютері зміни в часі тиску і витрати повітря посередині виробки, тобто в районі вогнища пожежі.

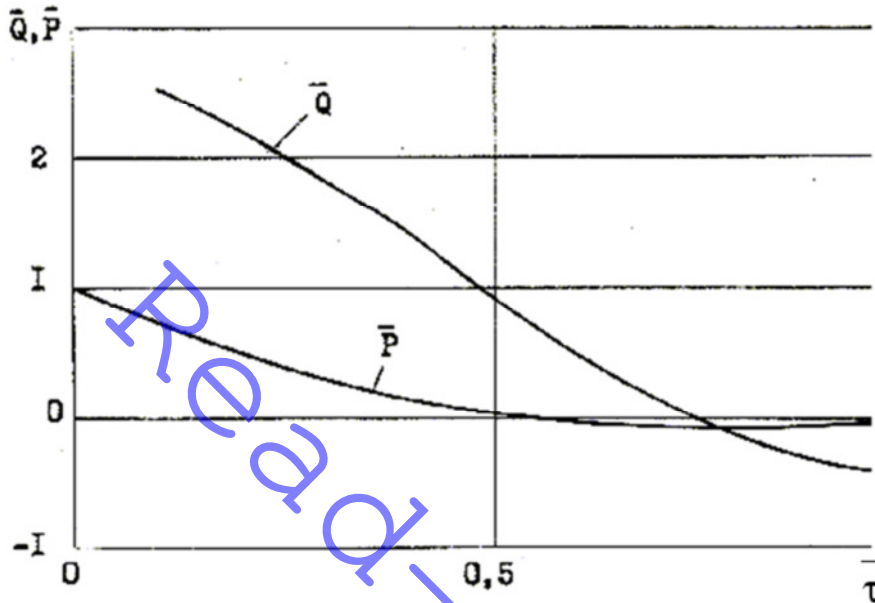


Рисунок 9 - Зміна в часі тиску і витрат повітря в середній частині ізолюваної дільниці другого типу (при  $x/l = 0,5$ )

Аналіз результатів моделювання показує, що з деяким запізнюванням депресія від негативного значення через нуль виходить на позитивне значення, поступово наближаючись до сталого значення. Аналогічним образом поводить себе і витрата повітря, трохи випереджаючи ріст тиску посередині виробки.

Розрахунки, виконані стосовно до реальних ізолюваних дільниць, показали, що тривалість перехідного аеродинамічного процесу на дільницях з депресією, зосередженою на перемичках, може досягати декількох десятків годин, що не завжди бажано. Скоротити її можна шляхом зняття депресії ВГП із ізолюваної дільниці та зменшенням аеродинамічного опору перемичок, наприклад шляхом буріння свердловин діаметром 0,05-0,10 м у гіпсових вибухостійких перемичках. Важливою умовою при цьому є забезпечення вибухозахисних властивостей ізолюючих перемичок зі свердловинами.

Значно зменшити тривалість перехідних процесів, а в деяких випадках практично їх виключити можливо при зведенні біля повітряподаючих перемичок додаткових перемичок і створення за допомогою джерел тяги в камерах, що утворилися, при реверсі вентиляційного струменя такого тиску і розрідження, щоб величина тиску в ізолюваній пожежній дільниці залишалася практично незмінною.

Ефективність багаторазового реверсування як засобу гасіння пожежі оцінювалося нами шляхом моделювання поширення газу по гірській виробці та експериментальній перевірці методу в шахтних умовах.

Моделювання поширення газу по гірській виробці (рис. 10) здійснювалося шляхом рішення рівняння переносу газу уздовж напрямку руху повітря для випадку заміщення інертного середовища повітрям. У результаті моделювання встановлено, що час збереження інертного середовища на аварійній ділянці при багаторазовому реверсуванні струменя повітря в 5-6 разів більше часу при нормальній вентиляції. Це свідчить про значне скорочення надходження кисню до вогнища пожежі при реверсуванні. При необхідності застосування штучної інертизації ізолюваного простору реверсування дозволяє значно скоротити витрати інертного газу.

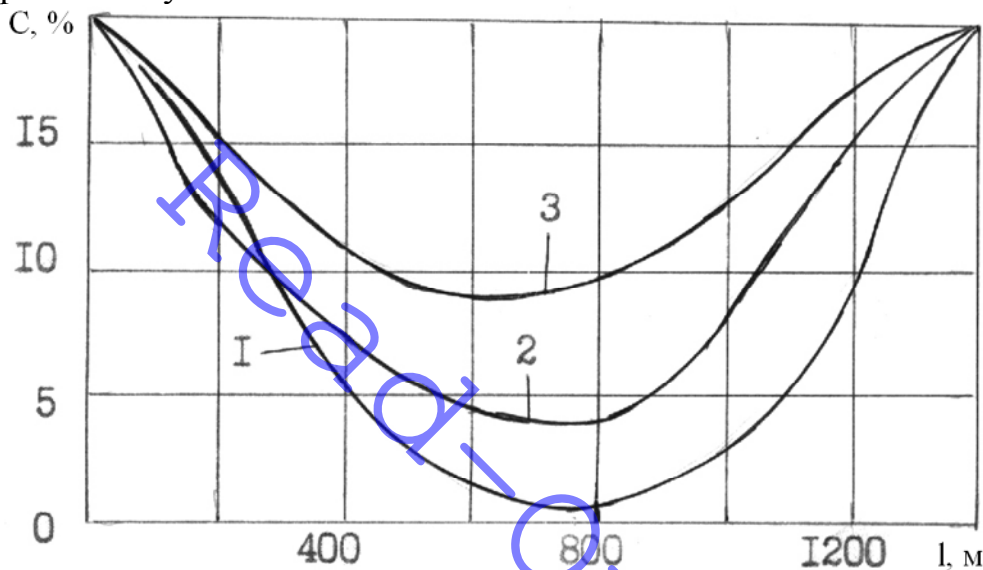


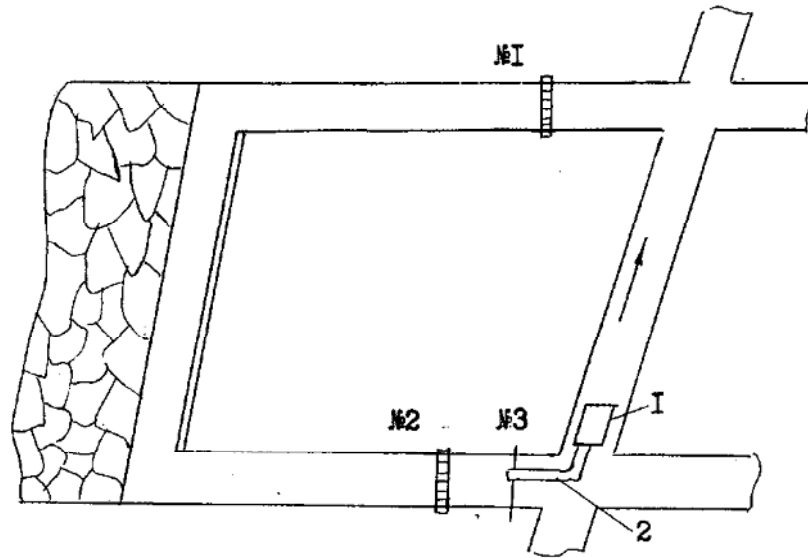
Рисунок 10 - Вміст кисню у виробці при багаторазовому реверсуванні: 1 - через 90 хв.; 2 - через 180 хв.; 3 - через 350 хв.

Експериментальна перевірка методу здійснювалася при гасінні складних пожеж в умовах шахт «Вергелевська», ім. 50-річчя СРСР і «Комісарівська» (всі Луганська область), № 3-біс (м. Торез) і «Бутівська» (м. Макіївка). У всіх випадках застосування багаторазового реверсування вентиляції на аварійній ділянці придушувало процеси горіння. Час ліквідації аварій був скорочений в 2–5 разів, а в умовах шахти ім. 50-річчя СРСР дозволило згасити пожежу, що не вдавалося згасити методом ізоляції.

За результатами досліджень запропоновані типові схеми гасіння складних ізолюваних пожеж методом багаторазового реверсування: з вентилятором встановленим з боку свіжого струменя; з вентилятором встановленим з боку вихідного струменя (рис. 11); з вентиляторами встановленими з боку свіжого і вихідного струменів; з додатковим вентилятором, установленим на поверхні; з використанням вентилятора головного провітрювання.

**П'ятий розділ** присвячений обґрунтуванню режимів провітрювання шахти і шляхів запобігання вибухів метану при гасінні розвинених пожеж методами вентиляційного впливу.

а)



б)

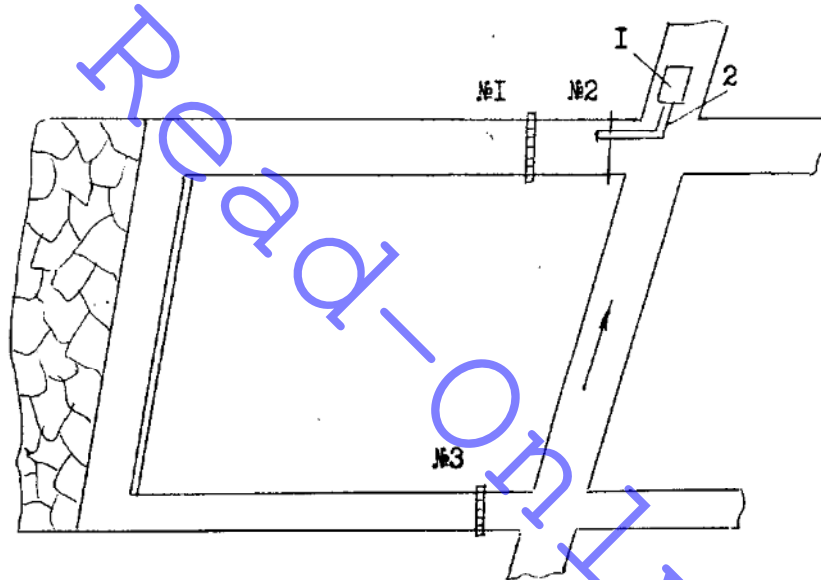


Рисунок 11 - Схеми багаторазового реверсування в ізолюваній виїмковій ділянці: а – з вентилятором встановленим з боку свіжого струменя; б – те ж з боку вихідного

На підставі проведених досліджень сформульовані загальні вимоги до аварійних вентиляційних режимів, застосовуваних у ході гасіння складних підземних пожеж, а також вимоги, що враховують метод гасіння пожежі та конкретні гірничотехнічні умови.

Так, при гасінні пожежі багаторазовим реверсуванням вентиляційних струменів вентиляційний режим повинен сприяти керуванню повітряними потоками на аварійній ділянці та забезпечувати мінімальну тривалість перехідних процесів, а при гасінні пожежі методом рециркуляції вентиляційний режим повинен сприяти мінімізації величини витоків повітря через ІВД.

Умови формування аварійного режиму провітрювання ділянки шахти розглянуті нами на спрощеній моделі вентиляційної мережі (рис. 12), у якій напі-

рна характеристика дільниці формується з урахуванням закономірностей повітрярозподілу в паралельно-послідовних з'єднаннях.

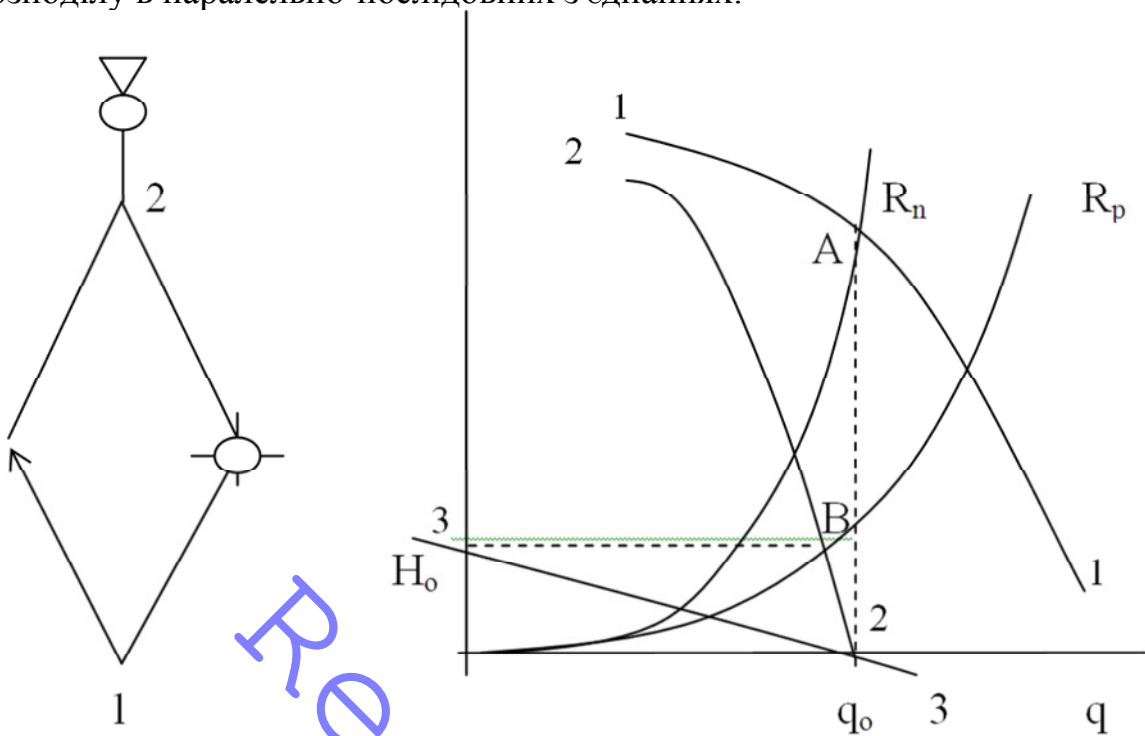


Рисунок 12 - Побудова напірної характеристики дільниці шахтної вентиляційної мережі

Напірна характеристика дільниці будується послідовним вирахуванням, по ординатах, з характеристики вентилятора (крива 1-1) - характеристики гілки ( $R_n$ ). З отриманої характеристики (крива 2-2) паралельного з'єднання по абсцисах віднімається характеристика паралельної гілки ( $R_p$ ). Напірна характеристика дільниці 3-3 описується рівнянням виду

$$h_n = H_0 - bq_n^2, \quad (18)$$

де  $H_0$  – депресія, обумовлена перетинанням характеристики 3-3 з віссю ординат, Па;  $q_n$  - витрата повітря в розглянутій дільниці,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $b$  - параметр напірної характеристики,  $\text{Па}\cdot\text{с}^2/\text{м}^6$ .

Абсциса точки (А) перетинання характеристики ( $R_n$ ) з характеристикою вентилятора (крива 1-1) визначає величину критичної витрати  $q_0$ , що характеризує граничний стан режиму провітрювання – зупинку вентиляційного струменя за рахунок сонаправленої дії внутрішнього джерела тяги і ВГП. Ордината точки (В) перетинання характеристики ( $R_p$ ) з напірною характеристикою паралельного з'єднання 2-2 визначає величину критичної депресії ( $H_0$ ). Рівність цієї величини і депресії внутрішнього джерела тяги ( $h_t$ ) визначає умова зупинки спадного потоку повітря в похилій виробці.

Проведений аналіз особливостей застосування аварійних вентиляційних режимів при пожежах у виїмкових дільницях і факторів, що впливають на їхню ефективність вказав на принципову можливість використання загальшахтного реверсування вентиляції для гасіння пожеж шляхом багаторазового



реверсування вентиляції ізольованої дільниці за рахунок загальшахтної депресії і теплової депресії пожежі. Теплова депресія використовується в цьому випадку як джерело тяги, що відновлює висхідний рух пожежних газів у лаві. Ефективність такої технології гасіння ізольованої пожежі може бути оцінена заздалегідь для всіх виїмкових дільниць шахти на стадії підготовки плану ліквідації аварії.

Після реверсування вентиляції шахти параметри напірних характеристик змінюються. При цьому опір гілок, розташованих послідовно з розглянутою ділянкою ( $R_n$ ) збільшується, в основному, за рахунок протидії природної тяги в зовнішніх вентиляційних контурах. Опір же еквівалентної гілки ( $R_p$ ), що моделює зовнішню мережу, паралельну розглянутій дільниці, зменшується за рахунок зменшення опору шляхів зовнішніх і внутрішніх витоків повітря. Все це приводить до деформації напірних характеристик гілок (виробок) шахтної вентиляційної мережі. У холодну пору року (добі) можливий перехідний процес, через різку зміну величини природної тяги в стволах. При цьому параметри напірних характеристик впродовж 20-30 хвилин можуть збільшитися на 10-20 %. Збільшення опору виробок, розташованих послідовно з розглянутою дільницею, приводить, в основному, до зменшення величини критичної витрати повітря ( $q_0$ ), а зменшення опорів гілок, паралельних розглянутій дільниці, - до зменшення критичної депресії ( $H_0$ ). При цьому слід зазначити, що величина критичної депресії дільниці, при зменшенні критичної витрати, також зменшується за рахунок зміни параметра ( $b$ ) напірної характеристики всього паралельного з'єднання.

Після реверсування вентиляції можливі два основних варіанти розвитку ситуації (див. рис. 13). У першому - напірна характеристика аварійної дільниці описується кривою 1-1 - критична депресія ( $H_0$ ) більше теплової депресії пожежі ( $h_t$ ). Режим провітрювання аварійної дільниці визначають координати точки А. Відбудеться зупинка, а потім перекидання газоповітряного потоку в аварійній дільниці. У другому варіанті - критична депресія  $H_0$  менше теплової депресії пожежі. У цьому випадку в реверсивному режимі буде зберігатися первісний напрямок руху струменя в аварійній дільниці.

Таким чином, якщо величина теплової депресії пожежі, що сформувалася в ізольованій дільниці в нормальних умовах нам відома, то, визначивши величину критичної депресії цієї дільниці в реверсивному режимі ( $H_{0p}$ ), можна оцінити можливість перекидання вентиляційного потоку в цій дільниці після реверсування вентиляції шахти. Для рішення цього завдання доцільно використовувати комп'ютерну модель шахтної вентиляційної мережі.

Критичні параметри ІВД залежать від величини природної тяги. Вплив природної тяги на провітрювання шахти і окремих її дільниць залежить від співвідношення величин депресії вентилятора і природної тяги в контурах вентиляційних стволів і похилих виробок виїмкових полів. У процесі переходу від нормального режиму провітрювання шахти до реверсивного, змінюється як сама величина природної тяги, так і опір вентиляційної мережі, у якій вона діє.

На відміну від ВГП, природна тяга стволів є «внутрішнім» джерелом, тобто, джерелом тяги, щодо якого шахтна вентиляційна мережа з'єднана послідовно з паралельним з'єднанням «зовнішні витoki – вентиляторна установка». Отже, для ВГП опір мережі збільшиться ( $R_{u'}$ ).

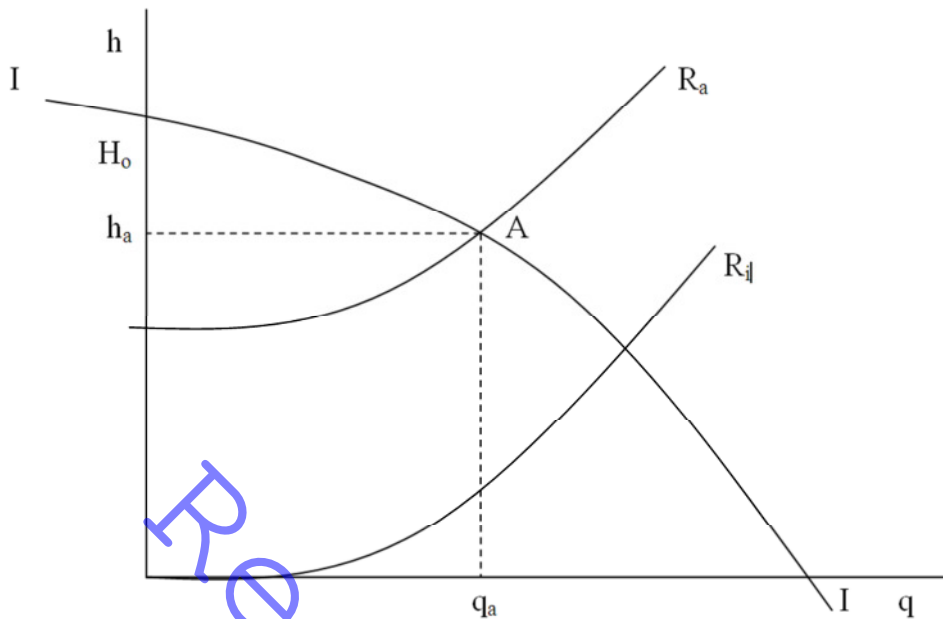


Рисунок 13 - Параметри, що характеризують вентиляцію ізолюваної ділянки в реверсивному режимі

У холодну пору року величина природної тяги перед реверсуванням збільшується через відключення калориферної установки і зменшення витоків повітря з виробок із вхідним у виробки вентиляційним струменем з вихідним. Депресія шахти при цьому зменшується в 2-3 рази. При цьому співвідношення величин природної тяги в стволах і депресії ВГП, що доводиться на шахту в реверсивному режимі, будуть порівнянні. Після реверсування, основні зміни величини природної тяги, пов'язані зі зміною температури повітря в стволах, відбуваються протягом 2-2,5 годин. Величина природної тяги, що протидіє ВГП, буде поступово зменшуватися і потім може змінити напрямок дії. Протягом усього цього часу буде змінюватися і режим провітрювання виробок ІВД.

Аналіз впливу природної тяги на критичні параметри ІВД, виконаний у розділі, дозволив сформулювати умову реверсування вентиляційного струменя в ділянці: при загальшахтному реверсуванні вентиляційний струмінь у ділянці змінить напрямку руху в тому випадку, якщо величина відношення депресій шахти у нормальному  $H_u$  і реверсивному  $H_u'$  режимах буде менше відношення величини критичної депресії ділянки у нормальному режимі  $H_{00}$  до величини природної тяги  $h_{n0}$ , що діє в контурі даної ділянки. Аналітично, ця умова має такий вигляд

$$\frac{H_{00}}{h_{n0}} > \frac{H_u'}{H_u}. \quad (19)$$

Використовуючи нерівність (19) можна прогнозувати ефективність загальношахтного реверсування вентиляції на стадії підготовки аварійної ділянки до ізоляції, а також на стадії підготовки до реверсування струменя в ізольованій ділянці.

Припустимо, що аеродинамічний опір паралельного з'єднання «лава-вироблений простір» (рис. 14) становить від 0,02 до 0,1 киломюрга, а максимальна критична витрата повітря досягає 20-30 м<sup>3</sup>/с. Тоді, можна вважати, що в більшості випадків, уже при величині теплової депресії пожежі близько 160 даПа можливе перекидання витоків повітря у вироблених просторах і виникнення рециркуляції продуктів горіння в контурі «лава-вироблений простір». З огляду на, що з моменту виникнення пожежі до її ізоляції, може пройти кілька діб, можна вважати, що вироблений простір лави, у межах 20-30 метрів буде заповнено нагрітими пожежними газами. На газових шахтах цей процес буде супроводжуватися виносом у вогнище пожежі підвищених концентрацій метану і виникненням умов для вибуху метану.

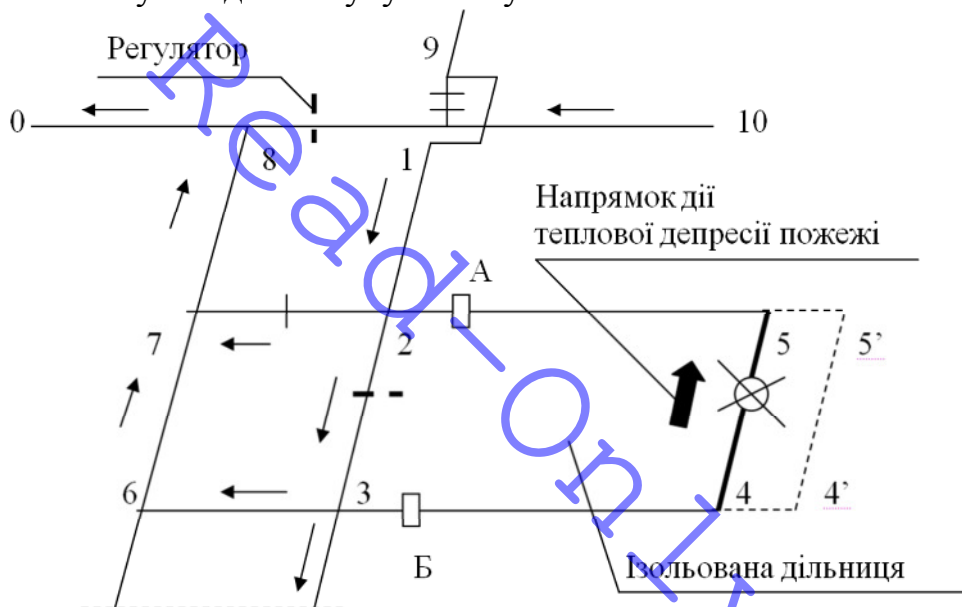


Рисунок 14 - Схема вентиляції аварійної ділянки в реверсивному режимі

На шахтах з декількома ВГП, у деяких випадках, при загальношахтному реверсуванні, існує небезпека порушення стійкості провітрювання. Це проявляється в тім, що після переведення всіх ВГП у реверсивний режим роботи, в окремих виробках або на окремих маршрутах зберігається колишній «нормальний» напрямок руху повітря. Основна причина цього - перерозподіл зон впливу вентиляторів головного провітрювання у шахтній вентиляційній мережі після загальношахтного реверсування вентиляції, через різну величину зменшення опору шляхів зовнішніх витоків (підсмоктувань) у самій вентиляторній установці та в усті ствола (збійка, шурф), на якому встановлений ВГП. Аналіз особливостей загальношахтного реверсування вентиляції на таких шахтах і застосування комбінованих режимів дозволив визначити умови ефективного їхнього застосування.

Як окремі аварійні вентиляційні режими розглянуто місцеве реверсування і закорочування вентиляційних струменів. Аналіз цих режимів показав, що у всіх схемах вентиляції зі спадним рухом потоку повітря, при пожежі в об'єкті регулювання, за допомогою закорочування можна здійснювати реверсування вентиляційного струменя. При цьому повинна виконуватися умова: критична депресія об'єкта регулювання після закорочування повинна бути менше величини теплової депресії пожежі.

Основним питанням, при гасінні пожежі за допомогою рециркуляції, є зменшення витоків повітря в ізолювану дільницю. Моделювання повітрярозподілу при рециркуляції показало, що в частині вентиляційної мережі, що включає трубопровід і гірничу виробку, де він прокладений, формуються три характерні зони тиску. У першій зоні тиск у трубопроводі буде більше тиску у виробці, і газоповітряна суміш із трубопроводу може надходити у виробку. У другій зоні відбувається вирівнювання тисків і формується, так звана, «нульова» зона з мінімальними витоками. У третій зоні, витоки повітря міняють напрямок і повітря з виробки надходить у трубопровід. Аналіз особливостей повітрярозподілу указав на можливість керування витоками повітря при організації рециркуляції продуктів горіння в ізолюваній дільниці.

Розроблено методику визначення кількості метану, що бере участь у вибуху. Після запалення вибухонебезпечної суміші виникає фронт полум'я, що приводить у рух незгорілі шари суміші. У результаті цього формується ударна хвиля, що турбулізує суміш і прискорює процес горіння. Згоряючи, метан виділяє велику кількість теплоти, яку можна підрахувати по формулі

$$Q_M = q_M \gamma_M V_M, \quad (20)$$

де  $Q_M$  – кількість теплоти, що виділяється при вибуху, кДж;  $q_M$  – питома теплотворність метану, кДж/кг;  $\gamma_M$  – питома маса метану, кг/м<sup>3</sup>;  $V_M$  – об'єм метану, що вступив у реакцію, м<sup>3</sup>.

Кількість теплоти, що поглинає повітря, дорівнює

$$Q_n = V_0 \gamma_n C_n \Delta t_n, \quad (21)$$

де  $V_0$  – об'єм простору, у якому відбувся вибух (зона горіння), м<sup>3</sup>;  $\gamma_n$  – питома маса повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $C_n$  – питома теплоємність повітря, кДж/кг;  $\Delta t_n$  – середнє значення збільшення температури повітря в об'ємі  $V_0$ , °С.

Кількість продуктів горіння, які можуть пропустити гірничі виробки під час вибуху, може бути підрахована по формулі

$$Q = t \sqrt{\frac{\Delta P \cdot T_B}{R \cdot T_0}}, \quad (22)$$

де  $t$  – тривалість реакції горіння метану, с;  $\Delta P$  – надлишковий тиск, під дією якого газоповітряна суміш виходить із аварійної дільниці, Па;  $T_B$  – абсолютна температура продуктів вибуху, К;  $T_0$  – абсолютна температура в місці вибуху в нормальних умовах, К;  $R$  – еквівалентний аеродинамічний опір мережі гірничих виробок, Па·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>.

Виражаючи надлишковий тиск у мПа, одержимо

$$V_M = V_0 \Delta P / 11,8. \quad (23)$$

Таким чином, знаючи надлишковий тиск у момент вибуху і геометричні розміри простору, можна підрахувати кількість метану, що бере участь у вибуху. Про значення надлишкового тиску можна судити по характеру ушкоджень устаткування і споруджень.

**Шостий розділ** присвячений розробці методів контролю параметрів ізолюваної вентиляційної дільниці в ході гасіння пожежі методами вентиляційного впливу.

Вивчено вплив сонаправленої і протинаправленої теплової депресії на режим провітрювання аварійної дільниці. Розроблено методики визначення сонаправленої і протинаправленої теплової депресії пожежі на стадії підготовки до ізоляції аварійної дільниці, засновані на одночасному вимірі витрат і депресії на аварійній дільниці без і при наявності допоміжної перемички легкого типу. Теоретично описаний процес нагрівання і остигання гірського масиву з урахуванням анізотропності його теплофізичних властивостей. Отримано аналітичні залежності, що дозволяють із достатнім ступенем точності прогнозувати динаміку температури у вогнищі пожежі з моменту припинення горіння. Для  $n$ -мірного анізотропного простору залежність має вигляд:

$$T = T_0 + \frac{T_1 - T_0}{(4\pi\tau)^{n/2}} \prod_{i=1}^n (\ell_i / a_i^{1/2}) \left\{ \begin{array}{l} 1 + B \cdot \exp[-x_i x_i^0 / a_i \tau] \times \\ \times \exp\left[-\sum_{i=1}^n (x_i - x_i^0)^2 / 4a_i \tau\right] \end{array} \right\}, \quad (24)$$

де  $T_0$  - температура навколишніх порід, К;  $a_i$  - коефіцієнт температуропровідності порід залежно від напрямку,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\alpha_1$  - коефіцієнт теплообміну повітря з масивом,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $x_i^0, x_i^o$  - координати середньої частини вогнища горіння, м.

В епіцентрі тепловиділення, тобто в точці з координатами  $x_i = x_i^o$ , температура порід при їхньому остиганні може бути визначена по виразу

$$T = T_0 + \frac{T_1 - T_0}{\pi^n (\tau / \tau_c)^{n/2}} (1 + B \cdot e^{-\tau_c / \pi \tau}), \quad (25)$$

де  $\tau_c$  - час горіння, с.

На підставі виконаних теоретичних досліджень розроблений експрес-метод визначення температури у вогнищі ізолюваної пожежі, який враховує периметр активно провітрюваної зони виробленого простору, коефіцієнт теплообміну повітря з навколишніми породами та відносний час із моменту припинення горіння.

Зважаючи на те, що між приростом температури у вогнищі пожежі та часткою кисню, що бере участь у горінні, існує лінійна залежність, розроблена методика визначення теплових параметрів пожежі залежно від витрати кисню на горіння. Значення частки кисню, що бере участь у горінні, визначається по даним аналізу проб повітря на вихідному з аварійної дільниці струмені. При розрахунку враховується вміст метану, оксиду і діоксиду вуглецю у вихідному з аварійної дільниці струмені, коефіцієнт витиснення азоту метаном і продуктами горіння, дольова участі метану в горінні та теплота згорання типових для гірничих виробок горючих речовин.

У **сьомому розділі** розглянуті питання вибору оптимальних методів гасіння розвинених підземних пожеж з використанням методів вентиляційного впливу.

Вибір того або іншого методу гасіння пожежі в першу чергу залежить від наступних факторів:

- технічної можливості застосування методу для гасіння конкретної пожежі, що залежить від місця виникнення пожежі, її розмірів та інтенсивності розвитку, газової обстановки, гірничо-геологічних і гірничотехнічних умов, наявності устаткування і засобів пожежогасіння та ін.;

- можливості забезпечити прийнятний рівень безпеки для гірничих рятувальників при виконанні аварійно-рятувальних робіт, пов'язаних з ліквідацією конкретної пожежі;

- зведення до мінімуму потенційної небезпеки для працюючих у шахті людей, що представляє ізолювана пожежна дільниця через виділення з неї продуктів горіння і через погрозу вибуху;

- зведення до мінімуму збитків від пожежі, обумовлених витратами на ліквідацію аварії і наступні ремонтно-відбудовчі роботи, виводом з ладу основних виробничих фондів, виводом з ладу на тривалий час великих ділянок родовища, порушенням нормального розвитку гірничих робіт.

З урахуванням цих факторів розроблені рекомендації із застосування типових схем рециркуляції продуктів горіння і багаторазового реверсування вентиляційного струменя. При цьому враховувалося місце розташування пожежі, розміри та інтенсивність її розвитку, наявність засобів пожежогасіння, витрати на ліквідацію пожежі, газова обстановка, а також достоїнства і недоліки кожної конкретної типової схеми.

Гасіння складних підземних пожеж методом рециркуляції продуктів горіння рекомендується здійснювати, в основному, у межах виїмкових дільниць, причому використання теплової депресії можливо при пожежах у похилих і вертикальних виробках, а також у горизонтальних, якщо безпосередньо за вогнищем пожежі є похила виробка.

Метод гасіння складних підземних пожеж багаторазовим реверсуванням струменя може бути застосований на будь-якій ізолюваній пожежній дільниці.

При наявності можливості використовувати для гасіння пожеж різні методи, перевага віддається тому, при якому збитки від пожежі мінімальні при збереженні прийнятних умов безпеки. Різноманіття факторів, що впливають на величину збитку від пожежі та витрат на її ліквідацію, обумовлюють необхідність здійснювати їхню оцінку для кожного конкретного випадку. Однак, незалежно від особливостей гірничого підприємства і пожежі, найбільш важливим параметром, що має визначальне значення при оцінці витрат і збитків, є тривалість гасіння пожежі.

Ефективність рециркуляції та багаторазового реверсування можна оцінити коефіцієнтами  $f_{РЕЦ}$  та  $f_{Б.Р}$ , що показують кратність зменшення тривалості ліквідації аварії при вентиляційному впливі

$$f_{PEЦ} = 1 + \frac{\eta \cdot U_p^{0,8}}{\lambda}, \quad (26)$$

$$f_{Б.Р} = 1 + \frac{\eta \cdot U_{Б.Р}^{0,8}}{\lambda}, \quad (27)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, що враховує аеродинамічні особливості виробок аварійної дільниці, у яких відбувається остигання газового потоку;  $U_p$  - середня швидкість руху нагрітого газового потоку на дільниці його охолодження при рециркуляції, м/с;  $\lambda$  - середній коефіцієнт теплопровідності бічних порід на дільниці охолодження нагрітих газів, кДж/м<sup>2</sup>·годину·К;  $U_{Б.Р}$  - середня швидкість руху нагрітого газового потоку на дільниці його охолодження при багаторазовому реверсуванні, м/с, рівна

$$U_{Б.Р} = K_{ПЕР} \frac{U_1 + U_2}{2}, \quad (28)$$

де  $K_{ПЕР}$  - коефіцієнт, що враховує наявність перехідних аеродинамічних процесів, приймається в межах 0,6-0,8;  $U_1, U_2$  - швидкості руху газового потоку на дільниці охолодження відповідно в прямому і зворотному напрямку в стабільному режимі вентиляції, м/с.

З огляду на імовірнісний характер виникнення аварій, економічна оцінка цього явища повинна враховувати очікуваний економічний збиток при виникненні пожеж та імовірнісну природу виникнення пожежі. Виконана в розділі економічна оцінка запропонованої технології гасіння ізольованих підземних пожеж методами вентиляційного впливу, показала, що при скороченні часу ліквідації пожежі на виїмкових дільницях у два рази, середній очікуваний економічний ефект складе  $E = 138,2$  тис. грн. на одну аварію.

Розроблено способи та засоби запобігання та ліквідації підземних пожеж на шахтах та підвищення безпеки гірничих робіт: пристрій для запобігання загоряння конвеєрної стрічки на приводних та натяжних барабанах, спосіб герметизації шпурів для вибухових робіт при проходженні виробок, пристрій для розгазування тупикової гірничої виробки, аварійно-рятувальна пересувна підіймальна машина, аварійно-рятувальна пересувна лебідка, комплекс рятувальний прохідницький, пристрій для дистанційної прокладки гнучкого трубопроводу, вентиляційний трубопровід для всисного провітрювання, спосіб гасіння осередків пожежі. Спосіб гасіння осередків пожежі здійснюють наступним чином (рис. 15). При виникненні осередку пожежі - з боку подачі вентиляційного струменю на відстані, що за умовами температури дозволяє ближче підійти в захисному одязі до осередку 1 пожежі, протягують уздовж виробки 2 трубопровід 3 до місця встановлення ізолюючої перемички. Після цього вимикають вентиляційний струмінь і будують ізолюючі перемички 4, 5. При цьому в перемичці 4 біля підшови 6 встановлюють забірний патрубок 7 з ізолюваної зони між перемичками 4, 5. Патрубок 7 крізь вентиль 8 з'єднують з вентилятором 9, який підключають до трубопроводу 3. В перемичці 4 біля покрівлі 10 встановлюють забірний патрубок 11, який крізь вентиль 12 підключають до трубопроводу 13 відводу газів з цієї зони в безпечне місце.

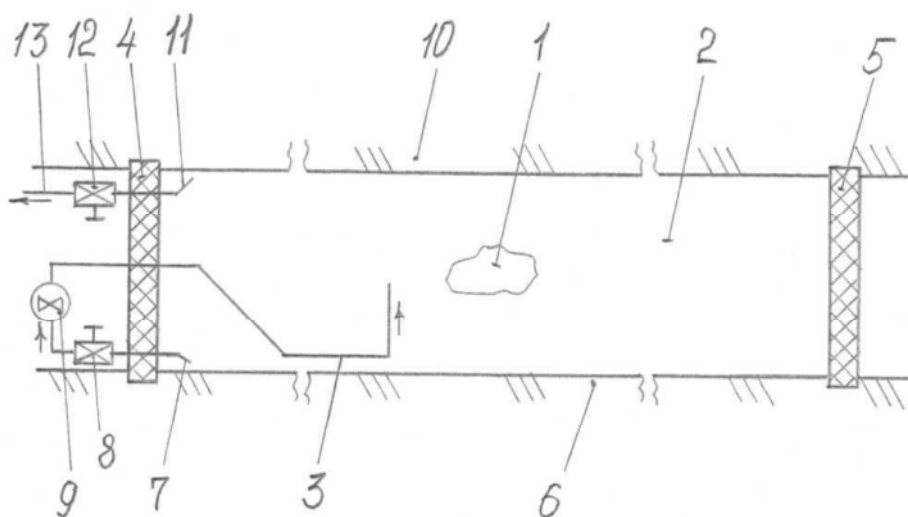


Рисунок 15 - Схема реалізації способу гасіння осередку пожежі

Результати дисертаційної роботи впроваджені при ліквідації складних підземних аварій на шахтах ПАТ «Лисичанськвугілля», ДП «Артемвугілля», ДП «ВК «Краснолиманська», ДП «Луганськвугілля», ПАТ «Краснодонвугілля», ДП «Торезантрацит», ДП «Макіїввугілля». Фактичний економічний ефект, отриманий від застосування розроблених методів тільки за рахунок скорочення строку гасіння пожежі склав 209,21 тис. грн. для ДП «ВК «Краснолиманська» та 171,36 тис. грн. для ВП «Шахта ім. Г.Г. Капустіна» ПАТ «Лисичанськвугілля». Основні результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі НТУ «Дніпровська політехніка» МОН України при викладанні дисциплін за спеціальностями 184 - Гірництво та 263 - Цивільна безпека.

## ВИСНОВКИ

У дисертації, що є завершеною науково-дослідною роботою, надане нове рішення актуальної науково-прикладної проблеми розвитку наукових основ ліквідації складних підземних пожеж у вугільних шахтах методами вентиляційного впливу шляхом встановлення закономірностей, що зв'язують витрату повітря на окремих ділянках схеми провітрювання з динамікою теплових факторів пожежі, закономірностей взаємодії різних джерел тяги і протікання перехідних газодинамічних і аеродинамічних процесів на аварійній дільниці, особливостей протікання вибухів метано-повітряної суміші та застосування аварійних вентиляційних режимів при гасінні пожеж та розробки методів гасіння складних пожеж, заснованих на рециркуляції продуктів горіння та шляхом багаторазового реверсування вентиляційного струменя, впровадження яких на шахтах дозволило отримати фактичний економічний ефект тільки за рахунок скорочення строку гасіння пожежі у сумі 390,57 тис. грн.

Найбільш важливі наукові та прикладні результати, висновки і рекомендації полягають у наступному:

1. Аналіз стану питання ліквідації складних підземних пожеж у вугільних шахтах показав, що існуючі методи гасіння пожеж шляхом ізоляції вентиляцій-



них дільниць малоефективні. При більших об'ємах ізолюваних дільниць і наявності порушених бічних порід процес горіння не припиняється через наявність значних витоків повітря через ізолювані дільниці, а при малій величині витоків, через повільне протікання процесу розсіювання тепла від нагрітих порід тривалий час існує небезпека рецидиву пожежі. Істотно підвищити ефективність гасіння пожеж можна шляхом вентиляційного впливу на вогнище пожежі, що забезпечує багаторазову подачу продуктів горіння генеруємих самою пожежею вогнищу пожежі. Однак через недостатню вивченість теплових і аерогазодинамічних процесів, відсутність розроблених методів контролю характеру протікання процесу горіння в ізолюваній дільниці при вентиляційному впливі на вогнище пожежі та порушення умов безпеки на практиці така технологія гасіння пожеж практично не використовується.

2. Розроблено теорію формування в ізолюваному просторі теплової депресії пожежі та її зміни в процесі повторної подачі продуктів горіння до вогнища пожежі. Вперше побудовано математичну модель балансу теплоти в об'ємі вогнища пожежі ізолюваної вентиляційної дільниці, що дозволяє здійснювати прогноз динаміки середньої температури повітря у вогнищі та навколишньому масиві порід з урахуванням залежності щільності повітря від температури протягом тривалого періоду часу (до декількох місяців) з моменту виникнення пожежі.

3. Отримано аналітичні залежності температури повітря у вогнищі пожежі та зонах, що примикають до неї, від аеродинамічних параметрів ізолюваної дільниці та залежності, що зв'язують витрату повітря на окремих ділянках схеми провітрювання з динамікою теплових факторів пожежі, що дозволяє моделювати результати впливу вентиляційного режиму на тепловий режим дільниці та оцінювати вплив пожежі на вентиляційний режим. Порушення режиму вентиляції ізолюваної пожежної дільниці та шахтної вентиляційної мережі визначається коефіцієнтом теплового опору, локальною тепловою депресією і глобальною тепловою депресією, обумовленими нерівномірним розподілом температури і маси повітря в об'ємі ізолюваних виробок у результаті виникнення потужного джерела теплової енергії і зміни газового складу повітря; при цьому витрата повітря із часом спочатку безупинно скорочується за синусоїдальним законом, а потім, по тім же законі, наближається до первісного значення, що дозволяє істотно знизити температуру порід як у період горіння матеріалів у вогнищі, так і в період остигання порід впродовж 3-х діб з 950 до 150 °С, що сприяє скороченню строків ізоляції дільниці.

4. Вперше встановлено закономірності зміни витоків повітря при соннаправленій та протинаправленій дії теплової депресії пожежі та вентилятора головного провітрювання. Надходження свіжого повітря в ізолювану пожежну дільницю залежить від величини і напрямку теплової депресії пожежі, що сформувалася в ізолюваній дільниці. При соннаправленій дії теплової депресії пожежі та вентилятора головного провітрювання витоків повітря зі збільшенням депресії лінійно зростають, при протинаправленій - зменшуються в квадратичній залежності, так, при зміні теплової депресії з 0 до 150 даПа при соннаправленій

дії витоки зростають з 119 до 143 м<sup>3</sup>/хв., а при протинаправленій - зменшуються з 118 до 70 м<sup>3</sup>/хв.

5. Теоретично та експериментально досліджені процеси, що протікають при рециркуляції вентиляційного струменя на ізольованій вентиляційній дільниці. Вперше встановлено, що при гасінні пожежі методом рециркуляції швидкість руху газів змінюється в порівняно вузькому діапазоні через те, що зниження теплової депресії супроводжується зменшенням еквівалентного опору контуру рециркуляції. Рециркуляція пожежних газів значно прискорює процес охолодження якщо швидкість руху газів перевищує мінімальну швидкість, при якій починається турбулентний рух у гірничих виробках, яка зростає лінійно зі збільшенням кінематичної в'язкості повітря і зменшується за степеневою залежністю зі зростанням діаметру виробки, при цьому для підвищення ефективності рециркуляції необхідно, щоб еквівалентний діаметр замикаючої виробки був не менш 1 м, а усередині контуру рециркуляції не було завалів з великим аеродинамічним опором (більше 10-200 Па·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>).

6. Вперше встановлені закономірності протікання перехідних газодинамічних і аеродинамічних процесів, що виникають на аварійній дільниці при багаторазовому реверсуванні струменя і додаванні інертних газів. Тривалість перехідного аеродинамічного процесу при багаторазовому реверсуванні вентиляції знижується при знятті депресії вентилятора головного провітрювання із ізольованої дільниці і зменшенні аеродинамічного опору перемичок, при цьому вміст кисню по довжині виробки знижується за параболою з 20 % на початку та в кінці виробки до 2-3 % біля вогнища пожежі, а час збереження інертного середовища на аварійній дільниці при багаторазовому реверсуванні струменя повітря в 5-6 разів більше часу при нормальній вентиляції

7. Визначено область ефективного застосування аварійних вентиляційних режимів залежно від особливостей схем вентиляції та з'єднання ізольованих вентиляційних дільниць з основними вентиляційними виробками. При загальношахтному реверсуванні вентиляційний струмінь у дільниці змінить напрямку руху в тому випадку, якщо величина відношення депресій шахти у нормальному і реверсивному режимах буде меншою відношення величини критичної депресії дільниці у нормальному режимі до величини природної тяги, що діє в контурі даної дільниці; при цьому, якщо аеродинамічний опір паралельного з'єднання «лава-вироблений простір» становить від 0,02 до 0,1 килоджоула, а максимальна критична витрата повітря досягає 20-30 м<sup>3</sup>/с, при величині теплової депресії пожежі близько 160 даПа можливе перекидання витоків повітря у вироблених просторах і виникнення рециркуляції продуктів горіння в контурі «лава-вироблений простір».

8. Розроблено метод гасіння складних пожеж, заснований на рециркуляції продуктів горіння, та типові схеми рециркуляції продуктів горіння: із закорочуванням вентиляційного струменя; із проходженням додаткової виробки; з використанням додаткового трубопроводу. Розроблено метод гасіння складних пожеж шляхом багаторазового реверсування вентиляційного струменя та схеми багаторазового реверсування продуктів горіння: з вентилятором встановленим з боку свіжого струменя; з вентилятором встановленим з боку вихідного струме-

ня; з вентиляторами встановленими з боку свіжого і вихідного струменів; з додатковим вентилятором, установленим на поверхні; з використанням вентилятора головного провітрювання. Визначено область їхнього застосування з урахуванням витрат на ліквідацію пожежі, місця розташування пожежі, розміру та інтенсивності її розвитку, наявності засобів пожежогасіння, газової обстановки.

9. Розроблено методику визначення сонаправленої і протинаправленої теплової депресії пожежі на стадії підготовки до ізоляції аварійної дільниці. Розроблено методику розрахунку параметрів компенсаційного методу зниження витоків повітря через ізольовані пожежні дільниці. Розроблено методику визначення кількості метану, що бере участь у вибуху, що дозволяє оцінювати небезпеку вибуху при веденні гірничорятувальних робіт.

10. Теоретично описаний процес нагрівання та остигання гірського масиву з урахуванням анізотропності його теплофізичних властивостей. Отримано аналітичні залежності, що дозволяють із достатнім ступенем точності прогнозувати динаміку температури у вогнищі пожежі починаючи з моменту припинення горіння. Розроблено експрес-метод визначення температури у вогнищі ізольованої пожежі, а також методика визначення теплових параметрів пожежі залежно від витрати кисню на горіння.

11. Розроблено методику вибору оптимального методу гасіння пожежі в залежності від збитків від пожеж та прийнятних умов безпеки. Виконано економічну оцінку запропонованої технології гасіння ізольованих підземних пожеж методами вентиляційного впливу. При скороченні часу ліквідації пожежі на виїмкових дільницях у два рази, середній очікуваний економічний ефект складе 138,2 тис. грн. на одну аварію.

12. Розроблено способи та засоби запобігання та ліквідації підземних пожеж на шахтах та підвищення безпеки гірничих робіт: пристрій для запобігання загоряння конвеєрної стрічки на приводних та натяжних барабанах, спосіб герметизації шпурів для вибухових робіт при проходженні виробок, пристрій для розгазування тупикової гірничої виробки, аварійно-рятувальна пересувна підіймальна машина, аварійно-рятувальна пересувна лебідка, комплекс рятувальний прохідницький, пристрій для дистанційної прокладки гнучкого трубопроводу, вентиляційний трубопровід для всисного провітрювання, спосіб гасіння осередків пожежі.

13. Проведено апробацію розроблених методів гасіння складних підземних пожеж безпосередньо в аварійних умовах при гасінні ізольованих пожеж на шахтах ПАТ «Лисичанськвугілля», ДП «Артемвугілля», ДП «ВК «Краснолиманська», ДП «Луганськвугілля», ПАТ «Краснодонвугілля», ДП «Торезантрацит», ДП «Макіїввугілля». Застосування методів вентиляційного впливу на вогнище пожежі скорочує час ліквідації аварії в 2-5 разів, а в окремих випадках дозволило згасити пожежі, які не вдавалося згасити методом ізоляції впродовж декількох років. Фактичний економічний ефект, отриманий від застосування розроблених методів тільки за рахунок скорочення строку гасіння пожежі склав 209,21 тис. грн. для ДП «ВК «Краснолиманська» та 171,36 тис. грн. для ВП «Шахта ім. Г.Г. Капустіна» ПАТ «Лисичанськвугілля».

## Основні положення дисертації опубліковані в наступних роботах:

Монографії та навчальні посібники.

1. Радченко В.В., Смоланов С.Н., Алейников Г.М., Грядущий Ю.Б., Заболотный А.Г. Ликвидация аварий в угольных шахтах. Теория и практика. Киев: Техника, 1999. 320 с.
  2. Смоланов С.Н., Голинько В.И., Грядущий Б.А. Основы горноспасательного дела. Днепропетровск: НГУ, 2001. 274 с.
  3. Смоланов С.Н. Ликвидация сложных подземных аварий методами вентиляционного воздействия. Днепропетровск: Наука и образование, 2002. 272 с.
  4. Смоланов С.Н., Голинько В.И., Мартиненко М.С. Изоляционные, вентиляционные и взрывоустойчивые перемычки. Днепропетровск: Наука и образование, 2002. 261 с.
  5. Голинько В.И., Алексеенко С.А., Смоланов И.Н. Аварийно-спасательные работы в шахтах: Учебное пособие. Днепропетровск: Лира ЛТД, 2011. 480 с.
  6. Смоланов С.Н., Беликов И.Б., Коробин С.А., Зиновьев Ю.А. Летопись горноспасательной службы. Днепропетровск: ООО «ЛізуновПрес», 2013. 680 с.
  7. Голинько В.И., Смоланов С.М., Грядущий Б.А. Основы гірничорятувальної справи: Навчальний посібник. 2-ге вид. Дніпропетровськ: НГУ, 2014. 271 с.
- Статті в наукових фахових виданнях.
8. Греков С.П., Смоланов С.Н., Почтаренко Н.С., Березовский А.А. Теплофизические процессы в горных выработках при экзогенных пожарах // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. НИИГД «Респиратор». Донецк: ООО «Лебедь». 2000. С. 39-46.
  9. Кукоба Л.И., Смоланов С.Н., Михайловский В.Д. Производственные работы в горноспасательной службе // Уголь Украины. 2000. № 12. С. 39-42.
  10. Смоланов С.Н. О повышении эффективности борьбы с развитыми подземными пожарами // Науковий вісник НГА України. 2001. № 3. С. 66-70.
  11. Смоланов С.Н. Влияние тепловой депрессии на аэродинамические параметры изолированного участка // Науковий вісник НГА України. 2001. № 2. С. 44-47.
  12. Смоланов С.Н. О возможности использования многократного реверсирования вентиляционной струи для тушения развитых подземных пожаров // Науковий вісник НГА України. 2001. № 6. С. 75-77.
  13. Смоланов С.Н., Кукоба Л.И., Михайловский В.Д. Профилактика – процесс непрерывный // Уголь Украины. 2001. № 8. С. 36-38.
  14. Смоланов С.Н., Пашковский П.С. Новая технология тушения сложных подземных пожаров // Уголь Украины. 2002. № 1. С. 33-35.
  15. Смоланов С.Н. Оценка влияния естественной тяги на реверсивный режим проветривания горных выработок шахт // Науковий вісник НГА України. 2002. № 6. С. 83-85.
  16. Смоланов С.Н. Повышение эффективности тушения сложных подземных пожаров путем рециркуляции продуктов горения // Науковий вісник НГА України. 2002. № 2. С. 74-77.

17. Бондаренко В.И., Самуся В.И., Смоланов С.Н., Колесов О.А. Аварийно-спасательная передвижная подъемная установка // Уголь Украины. 2003. № 1. С. 43-45.
18. Смоланов С.Н. Использование общешахтного реверсирования вентиляции при тушении сложных подземных пожаров // Науковий вісник НГУ. 2003. № 5. С. 61-64.
19. Смоланов С.Н. Горноспасательной службе в Украине - 100 лет // Уголь Украины. 2003. № 1. С. 3-7.
20. Смоланов С.Н., Каледин Н.В., Выскубенко В.П., Костоманов А.Л. Аппаратура высокочастотной связи при ведении горноспасательных работ в шахте // Уголь Украины. 2003. № 1. С. 37-40.
21. Смоланов С.Н., Колесов О.А., Бондаренко В.И., Самуся В.И., Москаленко А.В. Аварийно-спасательная передвижная подъемная установка // Уголь Украины. 2003. № 1. С. 43-45.
22. Смоланов С.Н. Определение параметров аварийного участка при сонаправленном действии тепловой депрессии и вентилятора главного проветривания // Науковий вісник НГУ. 2003. № 7. С. 65-67.
23. Смоланов С.Н. Выбор оптимального метода тушения изолированного подземного пожара // Сб. науч. тр. НГУ. 2003. № 17, том 2. С. 331-335.
24. Смоланов С.Н. Определение тепловых параметров пожара в зависимости от расхода кислорода на горение // Науковий вісник НГУ. 2003. № 7. С. 65-67.
25. Смоланов С.М., Голинько В.І. Підвищення ефективності ліквідації складних підземних аварій // Вісті академії інженерних наук України. 2004. № 2 (22). С. 30-34.
26. Бондаренко В.И., Самуся В.И., Смоланов С.Н. Применение передвижных подъемных установок для аварийно-спасательных работ в шахтных стволах // Проблемы эксплуатации оборудования шахтных стационарных установок: Сб. научн. тр. НИИГМ им. М.М. Федорова. 2004. № 98. С. 28-32.
27. Смоланов С.Н. Использование азотных мембранных винтовых установок передвижных станций АМВП-15/0.7 С У1 при ликвидации сложных подземных аварий на угольных шахтах Украины // Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2005. № 1 (1). С. 32-35.
28. Алексеенко С.А., Бондаренко В.И., Муравейник В.И., Смоланов С.Н., Король В.И. Мобильная установка для спасения и защиты рабочих от перегрева при пожарах и взрывах в угольных шахтах // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. научн. тр. МакНИИ. 2005. № 1. С. 66-69.
29. Смоланов С.Н., Голинько В.И. Использование общешахтного реверсирования вентиляции для тушения изолированного пожара // Збірник наукових праць НГУ. 2010. № 34, Том 2. С. 252-257.
30. Булат А.Ф., Минеев С.П., Смоланов С.Н., Беликов И.Б., Самопаленко П.М. Об особенностях управления метановыделением при ликвидации последствий взрывов метановоздушной смеси // Уголь Украины. 2018. № 8. С. 29-34.

31. Бондаренко В.И., Самуся В.И., Смоланов С.Н. Создание аварийно-спасательной передвижной подъемной установки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 10. С. 202-203.

32. Бондаренко В.И., Самуся В.И., Смоланов С.Н. Мобильные подъемные установки для аварийно-спасательных работ в шахтных стволах // Горный журнал. 2005. № 5. С. 99-100.

33. Salli S., Mamaykin O., Smolanov S. Inner potential of technological networks of coal mines // Mining of Mineral Deposits: CRC Press. 2013. Pp. 243-246.

34. Smolanov S., Bielikov I., Golub S., Makarenko V. State military rescue service in coal industry // Mining of Mineral Deposits: CRC Press. 2014. Vol. 8, Iss. 1. Pp. 91-96.

35. Mineev S.P., Smolanov S.N., Belikov I.B., Samopalenko P.I. Methodology of temperature prediction in the field of fire // The International Scientific Periodical Journal «Modern Scientific Researches». 2018. Iss. 5, Part 1. Pp. 30-39.

#### Патенти.

36. Пат. України № 35000. МПК А62С 37/00. Пристрій для запобігання загоряння конвеєрної стрічки на приводних та натяжних барабанах / С.Г. Луньов, В.А. Люєв; С.В. Люєв; Б.С. Любарський; С.М. Смоланов; Л.І. Кукоба, заявник і патентовласник: Центральний штаб Державної воєнізованої гірничорятувальної служби у вугільній промисловості. - № з-ка 99074346; заявл. 28.08.1999, опубл. 15.03.2001, Бюл. 2/2001.

37. Пат. України № 37016. МПК Е21F 5/00, F42D 1/24. Спосіб герметизації шпурів для вибухових робіт при проходженні виробок / С.Г. Луньов, В.А. Люєв; С.В. Люєв; Б.С. Любарський; С.М. Смоланов; Л.І. Кукоба, заявник і патентовласник: Центральний штаб Державної воєнізованої гірничорятувальної служби у вугільній промисловості. - № з-ка 2000031359; заявл. 09.03.2000, опубл. 16.04.2001, Бюл. 3/2001.

38. Пат. України № 47007. МПК ЕУ21F1/00. Пристрій для разгазування тупикової гірничої виробки / В.П. Сухоруков, С.М. Смоланов, Д.В. Сухоруков, заявник і патентовласник: Сухоруков В.П., Смоланов С.М., Сухоруков Д.В. - № з-ка 2001053630; заявл. 17.03.2001, опубл. 17.06.2002, Бюл. 6/2002.

39. Пат. України № 51948. МПК Е21F11/00. Аварійно-рятувальна пересувна підймальна машина / В.І. Самуся, С.М. Смоланов, О.А. Колесов, В.В. Хіценко, О.В. Москаленко, Л.П. Вігдергауз, заявник і патентовласник: Донецький науково-конструкторський центр науково-дослідницького інституту організації та механізації шахтного будівництва. - № з-ка 2001117515; заявл. 05.11.2001, опубл. 16.12.2002, Бюл. 12/2002.

40. Пат. України № 57421. МПК Е21F11/00. Аварійно-рятувальна пересувна лебідка / С.М. Смоланов, О.А. Колесов, О.В. Москаленко, Л.П. Вігдергауз, заявник і патентовласник: Донецький науково-конструкторський центр науково-дослідницького інституту організації та механізації шахтного будівництва. - № з-ка 2002107853; заявл. 03.10.2002, опубл. 16.06.2003, Бюл. 6/2003.

41. Пат. України № 60443. МПК Е21F11/00. Комплекс рятувальний прохідницький / С.М. Смоланов, Ю.В. Клименко, О.А. Колесов, О.В. Москаленко, Л.П. Вігдергауз, О.П. Боровенський, І.Я. Беркович, заявник і патентовласник:

Донецький науково-конструкторський центр науково-дослідницького інституту організації та механізації шахтного будівництва. - № з-ка 2002076175; заявл. 24.07.2002, опубл. 15.10.2003, Бюл. 10/2003.

42. Пат. України № 86118. МПК E21F1/00. Пристрій для дистанційної прокладки гнучкого трубопроводу / В.П. Сухоруков, А.Д. Алексеев, С.М. Смоланов, Д.В. Сухоруков, заявник і патентовласник: Ін-т фізики гірн. процесів НАН України. - № з-ка а200706671; заявл. 14.06.2007, опубл. 25.03.2009, Бюл. 6/2009.

43. Пат. України № 86503. МПК E21F1/00. Вентиляційний трубопровід для всисного провітрювання / А.Д. Алексеев, Д.В. Сухоруков, С.М. Смоланов, заявник і патентовласник: Ін-т фізики гірн. процесів НАН України. - № з-ка а200708449; заявл. 23.07.2007, опубл. 27.04.2009, Бюл. 8/2009.

44. Пат. України № 128026. МПК E21F5/00. Спосіб гасіння осередків пожежі / А.Ф. Булат, І.О. Ященко, С.М. Смоланов, І.Б. Беликов, С.П. Мінєєв, А.М. Селезньов, заявник і патентовласник: Ін-т геотехн. мех. НАН України. - № з-ка а201803850; заявл. 10.04.2018, опубл. 27.08.2018, Бюл. 16/2018.

Матеріали конференцій.

45. Smolanov S.N., Klimenko Yu.V., Mariychuk I.Ph. Heat protection mineworkers and mine rescuers // 29–th International Conference of Safety in Mines Research Institutes. Central Mining Institute, Katowice, Poland. 2001. Vol. 2. Pp. 161–164.

46. Голинько В.И., Смоланов С.Н. К вопросу о совершенствовании технологии тушения подземных пожаров // Труды 2-го междунар. симпозиума «Безопасность жизнедеятельности в XXI веке». Днепропетровск. 2002. С. 9-10.

47. Смоланов С.Н. Особенности проветривания аварийного участка при общешахном реверсировании // Сборник трудов симпозиума «Неделя горняка-2002». Москва: МГУ. 2002. С. 1-3.

48. Голинько В.И., Смоланов С.Н. Ликвидация сложных подземных пожаров методами вентиляционного воздействия // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Україна наукова 2003». Дніпропетровськ: Наука і освіта. 2003. Том 27: Гірнична справа. С. 5-6.

49. Бондаренко В.И., Самуся В.И., Смоланов С.Н. Аварийно-спасательная мобильная подъемная установка с автономным электроснабжением // Материалы конференции «Донбасс-2020: Наука и техника производству». 2004. С. 122-125.

50. Смоланов С.Н., Кузьмин С.П. Применение газообразного азота для предупреждения и локализации подземных пожаров в угольных шахтах // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Школа підземної розробки». Дніпропетровськ: НГУ. 2007. С. 65-68.

51. Смоланов С.Н., Маслов О.В. Исследование параметров рациональных схем проветривания на угольных шахтах с крутым и наклонным залеганием пластов // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Школа підземної розробки». Дніпропетровськ: НГУ. 2007. С. 171-173.

52. Булат А.Ф., Минеев С.П., Смоланов С.Н. О некоторых особенностях управления метановыделением при ликвидации последствий взрывов метано-

воздушной смеси в угольных шахтах // Матеріали міжнар. конф. «Форум горняков – 2018». Дніпро. 2018. С. 242-250.

Стандарт підприємства.

53. Алексеев А.Д., Шевченко Л.В., Смоланов И.Н. Метод определения времени образования в горных выработках, пройденных по пласту, опасных концентраций метана и других УВ при пожарах с учетом сорбционных свойств угля. СТП утв. 11.11.2002 № 143/1 ЦШ ГВГСС. Донецк. 2002. 18 с.

## АНОТАЦІЯ

Смоланов С.М. Розвиток наукових основ ліквідації складних підземних пожеж у вугільних шахтах методами вентиляційного впливу. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Спеціальність: 05.26.01 - «Охорона праці». - Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми встановлення закономірностей теплових та аерогазодинамічних процесів, що протікають в ізольованих пожежних ділянках шахти при гасінні пожеж, розробці методів вентиляційного впливу та розвитку на цій базі наукових основ ліквідації складних підземних пожеж у вугільних шахтах, що має суттєве значення для зниження аварійності та підвищення рівня безпеки праці у вуглевидавничій галузі.

Вперше побудовано математичну модель балансу теплоти в об'ємі вогнища пожежі ізольованої вентиляційної дільниці (ІВД), що дозволяє здійснювати прогноз динаміки середньої температури повітря у вогнищі та навколишньому масиві порід з урахуванням залежності щільності повітря від температури протягом тривалого періоду часу (до декількох місяців) з моменту виникнення пожежі. Вперше отримано аналітичні залежності температури повітря у вогнищі пожежі та зонах, що примикають до неї, від аеродинамічних параметрів ІВД, що дозволяє моделювати результати впливу вентиляційного режиму на тепловий режим ІВД. Вперше встановлено закономірності зміни витоків повітря при соняправленій та противонаправленій дії теплової депресії пожежі та вентилятора головного провітрювання. Вперше встановлені закономірності взаємодії різних джерел тяги (теплова депресія, природна тяга, депресія вентилятора головного провітрювання) на аварійній дільниці при гасінні пожеж методом рециркуляції продуктів горіння. Вперше встановлені закономірності протікання перехідних газодинамічних і аеродинамічних процесів, що виникають на аварійній дільниці при багаторазовому реверсуванні струменя і додаванні інертних газів. Вперше визначено умову зміни напрямку руху вентиляційного струменя у дільниці при загальношахтному реверсуванні в залежності від депресій шахти у нормальному і реверсивному режимах та величини критичної депресії дільниці у нормальному режимі та величини природної тяги.

Розроблено метод гасіння складних пожеж, заснований на рециркуляції продуктів горіння, та типові схеми рециркуляції продуктів горіння. Розроблено



метод гасіння складних пожеж шляхом багаторазового реверсування вентиляційного струменя та схеми багаторазового реверсування продуктів горіння.

Розроблена «Методика розрахунку параметрів компенсаційного методу зниження витоків повітря через ізольовані пожежні дільниці». Розроблена «Методика визначення кількості метану, що бере участь у вибуху». Розроблений експрес-метод визначення температури у вогнищі ізольованої пожежі. Розроблена «Методика визначення теплових параметрів пожежі». Розроблена «Методика вибору оптимального методу гасіння пожежі». Розроблено програмне забезпечення для виконання розрахунків теплової депресії, аеро- і газодинамічних процесів в ізольованих вентиляційних дільницях, динаміки розвитку пожежі, параметрів технологічних схем та режимів вентиляції на комп'ютері. Розроблено способи та засоби запобігання та ліквідації підземних пожеж на шахтах та підвищення безпеки гірничих робіт.

Результати дисертаційної роботи впроваджені при ліквідації складних підземних аварій на шахтах. Фактичний економічний ефект, отриманий від застосування розроблених методів тільки за рахунок скорочення строку гасіння пожежі склав 209,21 тис. грн. для ДП «ВК «Краснолиманська» та 171,36 тис. грн. для ВП «Шахта ім. Г.Г. Капустіна» ПАТ «Лисичанськвугілля».

Ключові слова: ліквідація складних підземних пожеж, методи вентиляційного впливу, ізольована вентиляційна дільниця, закономірності теплових та аерогазодинамічних процесів.

#### ANNOTATION

Smolanov S.M. Development of scientific foundations for the elimination of complex underground fires in coal mines by methods of ventilation influence. - Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. On the specialty: 05.26.01 - "Labor safety". - Institute of Geotechnical Mechanics by M.S. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2018.

The dissertation is devoted to the decision of the actual scientific and applied problem of establishing the regularities of thermal and aerogasdynamic processes occurring in the isolated fire sections of the mine during extinguishing fires, developing the methods of ventilation and the development on this basis of the scientific foundations for the elimination of complex underground fires in coal mines, which is essential for decrease of accidents and increase of safety level in the coal mining industry.

For the first time a mathematical model of the heat balance in the volume of the fire center of an isolated ventilation area (IVA) was developed, which allows to predict the dynamics of the average air temperature in the fireplace and the surrounding array of rocks taking into account the dependence of the air density on temperature for a long period of time (up to several months) from the moment of fire.

For the first time, the analytical dependences of the air temperature in the fire center and the adjoining zones are obtained from the aerodynamic parameters of IVA, which allows to simulate the results of the influence of the ventilation regime on the thermal mode of the IVA. For the first time, regularities of changes in air leaks during

sodirectional and antidirectional action of thermal depression of a fire and the main ventilation fan were established. For the first time, regularities of interaction between different sources of traction (thermal depression, natural traction, depression of main ventilation fan) were established at the emergency unit during the extinguishing of fires by the method of recycling of combustion products. For the first time the regularities of the transition of gas-dynamic and aerodynamic processes occurring at the emergency area during multiple reversal of the jet and the addition of inert gases are established. For the first time, the condition for changing the direction of movement of the ventilation jet in the section at the general-phase reversal, depending on the depression of the mine in normal and reverse regimes and the volume of the critical depression of the area in the normal mode and the volume of the natural traction, was determined.

The method of extinguishing complex fires, based on the recirculation of combustion products, and typical schemes of recirculation of combustion products were developed. The method of extinguishing complex fires by means of multiple reversal of an air jet and a scheme of repeated reversal of combustion products were developed.

The "Methodic of calculating the parameters of the compensation method for reducing leakage of air through isolated fire areas" was developed. The "Methodic for determining the amount of methane involved in the explosion" was developed. An express method for determining the temperature at the hearth of an isolated fire was developed. The "Methodic for determining the thermal parameters of the fire" was developed. The "Methodic of choosing an optimal fire extinguishing method" was developed. Software was developed for performing heat depression calculations, aerodynamic and gas-dynamic processes in isolated ventilation areas, dynamics of fire development, technological circuit parameters and ventilation regimes on a PC. The methods and means of preventing and eliminating underground fires in mines and improving the safety of mining operations are developed.

The results of the dissertation work were introduced at the elimination of complex underground accidents at the mines. The actual economic effect obtained from the application of developed methods only at the expense of a reduction of the fire extinguishing period amounted to 209,21 thousand UAH for SE "Coal company "Krasnolymanska" and 171,36 thousand UAH for the SE "Mine by G.G. Kapustin" PJSC "Lisichanskvugillya".

Keywords: elimination of complex underground fires, methods of ventilation influence, isolated ventilation area, regularities of thermal and aerogasdynamic processes.

## АННОТАЦИЯ

Смоланов С.М. Развитие научных основ ликвидации сложных подземных пожаров в угольных шахтах методами вентиляционного воздействия. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Специальность: 05.26.01 - «Охрана труда». - Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепр, 2018.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы установления закономерностей тепловых и аэрогазодинамических процессов, которые протекают в изолированных пожарных участках шахты при тушении пожаров, разработке методов вентиляционного воздействия и развития на этой базе научных основ ликвидации сложных подземных пожаров в угольных шахтах, что имеет существенное значение для снижения аварийности и повышения уровня безопасности труда в угледобывающей отрасли.

Впервые разработана математическая модель баланса теплоты в объеме очага пожара изолированного вентиляционного участка (ИВУ), которая позволяет осуществлять прогноз динамики средней температуры воздуха в очаге и окружающем массиве пород с учетом зависимости плотности воздуха от температуры на протяжении продолжительного периода времени (до нескольких месяцев) с момента возникновения пожара. Впервые получены аналитические зависимости температуры воздуха в очаге пожара и зонах, примыкающих к нему, от аэродинамических параметров ИВУ, которые позволяют моделировать результаты воздействия вентиляционного режима на тепловой режим ИВУ. Впервые установлены закономерности изменения утечек воздуха при сопоставленном и противонаправленном действии тепловой депрессии пожара и вентилятора главного проветривания. Впервые установлены закономерности взаимодействия различных источников тяги (тепловая депрессия, естественная тяга, депрессия вентилятора главного проветривания) на аварийном участке при тушении пожаров методом рециркуляции продуктов горения. Впервые установлены закономерности протекания переходных газодинамических и аэродинамических процессов, которые возникают на аварийном участке при многократном реверсировании струи и добавлении инертных газов. Впервые определено условие изменения направления движения вентиляционной струи в участке при общешахтном реверсировании в зависимости от депрессий шахты в нормальном и реверсивном режимах и величины критической депрессии участка в нормальном режиме и величины естественной тяги.

Разработан метод тушения сложных пожаров, основанный на рециркуляции продуктов горения, и типовые схемы рециркуляции продуктов горения. Разработан метод тушения сложных пожаров путем многократного реверсирования вентиляционной струи и схемы многократного реверсирования продуктов горения.

Разработана «Методика расчета параметров компенсационного метода снижения истоков воздуха через изолированные пожарные участки». Разработана «Методика определения количества метана, принимающего участие во взрыве». Разработан экспресс-метод определения температуры в очаге изолированного пожара. Разработана «Методика определения тепловых параметров пожара». Разработана «Методика выбора оптимального метода тушения пожара». Разработано программное обеспечение для выполнения расчетов тепловой депрессии, аэро- и газодинамических процессов в изолированных вентиляци-

онных участках, динамики развития пожара, параметров технологических схем и режимов вентиляции на компьютере. Разработаны способы и средства предотвращения и ликвидации подземных пожаров на шахтах и повышения безопасности горных работ.

Результаты диссертационной работы внедрены при ликвидации сложных подземных аварий на шахтах. Фактический экономический эффект, полученный от применения разработанных методов только за счет сокращения срока тушения пожара, составил 209,21 тыс. грн. для ГП «УК «Краснолиманская» и 171,36 тыс. грн. для ОП «Шахта им. Г.Г. Капустина» ПАО «Лисичанскуголь».

Ключевые слова: ликвидация сложных подземных пожаров, методы вентиляционного влияния, изолированный вентиляционный участок, закономерности тепловых и аэрогазодинамических процессов.

Read-Only

Смоланов Сергій Миколайович

Розвиток наукових основ ліквідації складних підземних пожеж  
у вугільних шахтах методами вентиляційного впливу

(Автореферат)

Реза-Он

Підписано до друку 09.01.2019 р.  
Формат А5. Папір офсетний.  
Друк ризографічний. 2,1 умов. друк. арк.  
Тираж 100 прим. Замовлення №  
Віддруковано в ТОВ «Барвікс».  
Свідоцтво про внесення до державного реєстру  
ДП № 24 від 25.07.2000 р.  
49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 21