

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Д.В. САВЕЛЬЄВ
О.В. ХАЛИМЕНДИК
С.С. БАРАБАНОВ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗНЕПИЛЮВАННЯ ПОВІТРЯ
ПРИ БУДІВНИЦТВІ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД
БУРОПІДРИВНИМ СПОСОБОМ**

МОНОГРАФІЯ

Дніпро
2025

УДК 622.807:622.34.012.2; 691.263/.266

Рекомендовано до друку Вченою радою Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» як монографія для фахівців і студентів спеціальностей 184 «Гірництво» та 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (протокол №4 від 25.03 2025 р.).

Рецензенти:

С.П. Мінєєв – д-р техн. наук, професор, зав. відділом керування динамічними проявами гірського тиску. Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, м. Дніпро, Україна;

О.Л. Тюткін – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри транспортної інфраструктури Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро, Україна;

О.О. Сдвижкова – д-р техн. наук, професор, завідувачка кафедри прикладної математики НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Савельєв Д.В.

Підвищення ефективності знепилювання повітря при будівництві підземних споруд буропідривним способом: монографія / Д.В. Савельєв, О.В. Халимендик, С.С. Барабанов; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2025. – 162 с.

Монографія присвячена вирішенню завдання підвищення ефективності знепилювання повітря при будівництві підземних споруд буропідривним способом і полягає у встановленні закономірностей процесів утворення, виносу і поширення пилогазових домішок та розробці на цій основі ефективних засобів зниження концентрації високодисперсного пилу. Розроблено математичну модель турбулентного переносу дрібнодисперсного пилу. Отримано аналітичні вирази, що дозволяють визначати концентрацію пилу на будь-якій відстані від імпульсного джерела пилоутворення залежно від параметрів вибуху, петрографічного складу вуглепородного масиву і умов провітрювання. Розроблено методику визначення оптимальних складів, властивостей твердіючої суміші набійки і технології її приготування. Монографія призначена для широкого кола інженерно-технічних працівників гірничого напрямку, науково-дослідних і проєктних організацій. Може бути використана у навчальному процесі закладів вищої та середньої професійної освіти при викладанні дисциплін з гірництва а також будівництва та цивільної інженерії.

ISBN _____

© Д.В. Савельєв, О.В. Халимендик,
С.С. Барабанов 2025.

© НТУ «Дніпровська політехніка», 2025

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Стан питання, мета та завдання досліджень.....	9
1.1 Аналіз стану атмосфери за пиловим чинником при веденні буропідричних робіт в гірничих виробках.....	9
1.2 Огляд способів і засобів знепилювання повітря при виконанні вибухових робіт	13
1.3 Стан досліджень з питань пилодинаміки в підземних виробках шахт і рудників при проведенні гірничих виробок буропідричним способом.....	20
Висновки за розділом 1	30
Список використаних джерел в розділі 1.....	31
2 Дослідження процесів утворення і поширення пилогазових домішок у тупикових виробках при проведенні вибухових робіт.....	37
2.1 Формування пилогазової хмари під час проведення підричних робіт в тупиковій виробці і винос її за межі зони викиду	37
2.2 Дослідження процесу турбулентного перенесення дрібнодисперсного пилу у вентиляційному потоці при проведенні гірничих виробок буропідричним способом	48
2.3 Оцінка інтенсивності турбулентного осадження дрібнодисперсного пилу при русі пилової хмари в виробці.....	63
2.4 Вплив турбулентної коагуляції на величину концентрації дрібнодисперсного пилу	71
Висновки за розділом 2.....	77
Список використаних джерел в розділі 2.....	79
3 Експериментальні дослідження властивостей гірських порід, оцінка впливу поверхнево-активних речовин і конструкції заряду на вихід дрібнодисперсного пилу при руйнуванні вуглепородного масиву підриванням	84

3.1	Методика проведення експериментальних досліджень	84
3.2	Дослідження зміни фізико-механічних характеристик і структури гірських порід при взаємодії з поверхнево-активними речовинами	91
3.2.1	Фізико-механічні характеристики і структурні особливості гірських порід у забої підготовчої виробки	91
3.2.2	Вплив поверхнево-активних речовин на вихід дрібнодисперсної фракції пилу при руйнуванні гірських порід в забої виробки.....	102
3.3	Оцінка вмісту надмалих частинок в продуктах руйнування вуглепородного масиву методом рентгеноструктурного аналізу	108
3.4	Експериментальні дослідження впливу конструкцій зарядів ВР на вибухове руйнування твердих порід на моделях з оптично активних матеріалів.....	114
	Висновки за розділом 3	127
	Список використаних джерел в розділі 3.....	128
4	Розробка і обґрунтування способів і засобів зниження виходу дрібнодисперсного пилу при руйнування гірських порід енергією вибуху	131
4.1	Обґрунтування складу набійки для зниження виходу дрібнодисперсної фракції пилу при вибухових роботах.....	131
4.2	Динаміка концентрації дрібнодисперсного пилу з урахуванням використання ПАР при вибуховому руйнуванні гірських порід	135
4.3	Розробка та апробація в промислових умовах способу зниження концентрації дрібнодисперсного пилу при проходці гірничих виробок з використанням енергії вибуху.....	139
	Висновки за розділом 4.....	156
	Список використаних джерел в розділі 4.....	157
	Висновки	159

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

БПР – буропідривні роботи;

БПС – буропідривний спосіб;

ВР – вибухова речовина;

ГДК – гранично допустима концентрація;

ЗП – засіб підривання;

КВШ – коефіцієнт використання шпурів;

ПАР – поверхнево-активні речовини;

УХ – ударна хвиля;

A – кількість заряду, вибухової речовини, кг;

f – коефіцієнт міцності порід за шкалою проф. М.М. Протод'яконова (величина, що наближено характеризує відносну опірність породи руйнуванню при видобутку і дорівнює одній десятій частині межі міцності породи при одновісному стисненні, МПа);

S – площа поперечного перерізу виробки, м²;

$l_{ш}$ – середня довжина шпуру, м;

$l_{з.в}$ – довжина зони викиду газу і пилу, м;

γ – щільність відбиваної руди або породи, кг/м³

m – кількість шпурів в забої;

i – кількість груп шпурів, які одночасно підриваються;

n_0 – початкова запиленість повітря, мг/м³

R – радіус дії шпурового заряду, м;

D – швидкість детонації вибухових речовин, м/с;

α – коефіцієнт аеродинамічного опору виробки, Н·с²/м⁴;

Re – число Рейнольдса;

ν – кінематична в'язкість повітря, м²/с;

D_t – коефіцієнт турбулентної дифузії, м²/с;

C – концентрація частинок пилу в повітряному потоці, мг/м³;

C_0 – концентрація пилу в привибійній зоні, мг/м³;

Q – кількість повітря, м³/с;

L – довжина гірничої виробки;

$\rho_{\text{ч}}$ – щільність частинок пилу, кг/м³;

$\rho_{\text{п}}$ – щільність повітря, кг/м³;

$\mu_{\text{с}}$ – динамічна в'язкість середовища, Па·с;

τ_p – час релаксації, с;

$d_{\text{ч}}$ – діаметр частинки пилу, м;

u_t – швидкість турбулентного осадження частинок пилу, м/с;

β – коефіцієнт масовіддачі, м/с;

f – частота турбулентних пульсацій середовища, с⁻¹;

Δp – перепад тиску на ділянці виробки;

\overline{F}_{cm} – сила взаємодії частинок при їх зіткненнях, Н.

ВСТУП

Ефективність будівництва протяжних підземних гірничотехнічних об'єктів (капітальні та підготовчі гірничі виробки, перегінні тунелі ліній метрополітенів, автодорожні та залізничні тунелі тощо) значною мірою залежить від рівня впровадження високопродуктивної технології на базі різних типів комбайнів підвищеної енергооснащеності. Тим не менш, область їхнього застосування і ефективного використання обмежується верхньою межею міцності руйнування порід (до $f = 8$ за шкалою міцності гірських порід М.М. Протод'яконова). Тому обсяг підземних гірничих виробок, що споруджуються буропідривним способом (БПС) досі становить 30-40%, а в окремих галузях і всі 100%. Отже, частка цього способу руйнування міцних гірських порід, дотепер, залишається значною.

Проведення гірничих виробок по міцних породах вимагає проведення вибухових робіт, які супроводжуються викидом в гірничу атмосферу пилу і шкідливих газів, вносячи істотний внесок в погіршення санітарно-гігієнічних умов праці.

Одним з головних недоліків цього способу є утворення значної кількості дрібнодисперсного пилу (0,5-5,0 мкм). Так, під час проведення підривних робіт в умовах міцних порід, в атмосферу надходить близько 0,5 кг дрібнодисперсного пилу на 1 м³ відбитої гірничої маси і близько 1000 л шкідливих газових домішок при підриванні 1 кг вибухової речовини (ВР). Такий обсяг забруднень, що утворюється при одночасному підриванні великих кількостей ВР, не дозволяє існуючими засобами вентиляції знизити концентрацію пилу до гранично допустимих концентрацій (ГДК) навіть протягом тривалого періоду провітрювання після підривання зарядів.

Таким чином, санітарно-гігієнічні умови праці в виробках які проводяться буропідривним способом визначаються, в першу чергу, рівнем концентрацій продуктів вибуху, що складаються з пилу і отруйних газів. Причому концентрації, а також винесення і поширення пилогазових домішок,

залежать від параметрів вибуху, петрографічного складу вуглепородного масиву і умов провітрювання підготовчої тупикової виробки тощо. Тому для поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці на основі підвищення ефективності знепилювання повітря при проведенні гірничих виробок буропідривним способом важливо виявити взаємний зв'язок між зазначеними факторами. Для цього необхідно виконати дослідження процесів утворення і поширення пилогазових домішок і впливу їх на санітарно-гігієнічні умови праці, що й обумовлює актуальність теми даної роботи.

З урахуванням викладеного вище, в роботі вирішувалося науково-прикладне завдання виявлення закономірностей зміни концентрації продуктів вибуху в гірничих виробках і розробці на цій основі способів підвищення ефективності знепилювання повітря при проведенні гірничих виробок буропідривним способом.

1 СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз стану атмосфери за пиловим чинником при веденні буропідривних робіт в гірничих виробках

Сучасна технологія проведення гірничих виробок базується на широкому застосуванні буропідривних робіт. Наприклад, на шахтах Донбасу цим способом проводиться близько 70% всіх основних і нарізних виробок [1].

Багаторічна практика проведення гірничих виробок показала, що при руйнуванні породного масиву вибухом, утворюється велика кількість дрібнодисперсного пилу. Довжина зони відкидання пилової хмари досягає значних відстаней і далі хмара транспортується вентиляційним струменем по довжині гірничої виробки.

Практично увесь пил, що утворився, разом зі зруйнованою гірничою масою відкидається на відстань 5-10 м від вибою. Частина пилу підхоплюється вибуховою хвилею і переноситься на 50-70 м, частково відкладається на ґрунті, боках і покрівлі виробки. Середня запиленість повітря протягом трьох хвилин після вибуху становить 400-7300 мг/м³. Причому в перші 3-4 с концентрація зваженого пилу може досягати 12000 мг/м³ [2].

При виконанні вибухових робіт, в результаті хімічного розкладання ВР, утворюється велика кількість пилу і газоподібних продуктів.

Кількість пилу, яка утворилася, знаходиться в прямій залежності від енергії вибуху (рис. 1.1) [3]. Крім того, питомий вихід пилу і запиленість повітря залежать від гірничотехнічних умов підривання.

Ступінь дроблення порід вибухом визначає загальна кількість пилу, що утворюється, яка, в свою чергу, при інших рівних умовах залежить від потужності, щільності і величини заряду вибухової речовини. Як показують існуючі дослідження, в легенях при антракозі і силікозі знаходиться приблизно 95% частинок пилу розміром менше 2 мкм, 5% – 2- 4 мкм і незначна кількість – понад 5 мкм. За даними А.Ф. Сачкова, кількість пилу, що надійшла в атмосферу і

яка складається з частинок діаметром менше 10 мкм на 1 м³ підірваної гірничої маси, становить 80-500 г [4].

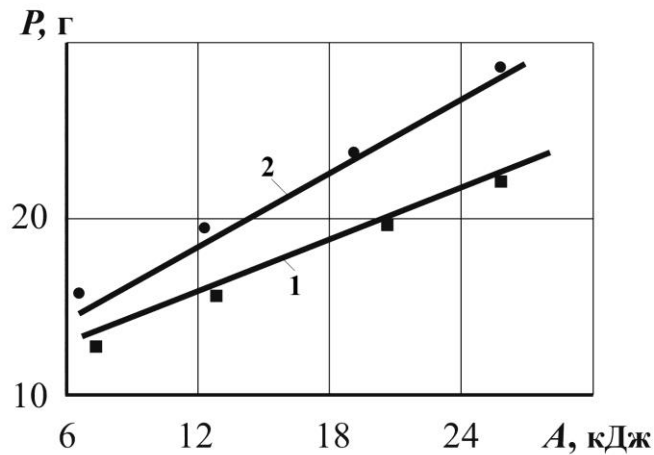


Рисунок 1.1 – Залежність виходу пилу від енергії вибуху:

1 – по тонкозернистому алеволіту; 2 – по дрібнозернистому пісковіку

Оцінка чистоти рудникової атмосфери після вибухових робіт здійснюється за ГДК, тобто за такими концентраціями шкідливих домішок, які ще не надають негативної дії на людину, не знижують його працездатності, не впливають негативно на його самопочуття і настрої [4].

Концентрації найбільш шкідливих компонентів, з огляду на їх кількість і токсичність, залежно від умов підривання і фізико-хімічних властивостей ВВ, коливаються в широкому діапазоні, наприклад СО – від 0,05% до 0,4%, оксиди азоту – від 0,0005% до 0,05%. Допустимі ж правилами безпеки концентрації окису вуглецю – 0,0016%, а окислів азоту – 0,00025% [4].

У комплексі з пилом, який утворюється при БПР, забруднена атмосфера є серйозною небезпекою загального отруєння організму і сприяє захворюванню гірників на пневмоконіоз. Це пояснюється тим, що пил є досить активним сорбентом, отруйні гази десорбуються з нього тривалий час і встигають комплексно впливати на живий організм [4].

Найбільш шкідливим компонентом вуглепородного (породного) пилу є вільний і пов'язаний двоокис кремнію. Проведеними МакНДІ дослідженнями вмісту двоокису кремнію в пилу шахтопластів Донбасу встановлено, що середній відносний вміст загального двоокису кремнію у вуглепородному пилі становить 38-47%, а вміст вільного двоокису кремнію – 3,0-5,5%. [5]. Патогенна дія пилу вугільних шахт визначається головним чином його масою, складом і дисперсністю [6].

Наслідком вибуху є утворення великої кількості дрібнодисперсного пилу. Частка пилу, яка виділяється в гірничу атмосферу, при окремих виробничих процесах становить: при бурових роботах 50-60%, вибухових роботах 30-40%, інших 10% [4]. Запиленість 1 м³ повітря протягом 15-20 хв після вибуху, якщо не застосовувати засобів знепилювання, становить 400-1000 мг, при цьому до 90-97% частинок цього пилу мають діаметр менше 5 мк [1]. Цей пил вважається таким, який важко пригнічується і є найбільш небезпечним для людини, а адсорбція на його поверхні отруйних газів підвищує агресивність цього пилу і сприяє швидкому розвитку у працюючих в шахтах профзахворювань, в тому числі, пов'язаних з органами дихання, – пневмоконіозу і хронічного пилового бронхіту. Порівняльний аналіз, виконаний низкою інститутів гігієни праці, показав, що захворювання органів дихання прохідників в 2,5-3 рази вище, ніж у контрольної групи, а також значно підвищені гострі шлунково-кишкові захворювання (в 2,5-3,5 рази), захворювання периферичної нервової системи (в 1,7-2,5 рази), серцево-судинної системи організму (в 1,5-2,5 рази) [7]–[8].

Фракційний склад зруйнованої гірської породи визначається технологією руйнування, з одного боку, і властивостями порід – з іншого. Найнебезпечнішою для здоров'я людини і безпеки робіт є фракція, яка на 70 - 80% складається з частинок діаметром менше 10 мкм [9].

Дослідженнями [10] встановлено, що на частку буропідривних робіт доводиться від 30 % до 60% пилу, який надходить в гірничу атмосферу. Оцінка результатів вибухового руйнування порід, які вміщують кварц (кварцити, пісковики та ін.), відібраних в ближній зоні вибуху, показала, що найдрібніші

фракції (1-2 мм) на 70-80% представлені уламками кварцу, в яких вміст мінералу кварцу в пилоподібних частинках становить від 75% до 90% і більше, із середнім розміром фракцій 8-9 мкм [11]–[12]. Ці дані підтверджує мікроскопічний аналіз проб повітря про наявність в найдрібніших фракціях (0-50 мкм) до 90-95% уламків кварцу, небезпечних для здоров'я гірників концентрацій.

Розробка вуглепородного масиву на глибоких горизонтах шахт ускладнюється такими факторами: збільшення міцності вуглевміщуючих порід, яке пов'язане з процесами літіфікації, діагенезу, зміною петрографічного складу, зокрема переважанням порід, які вміщують кварц, а також структурними перетвореннями, що відбуваються в вуглевмісній товщі під дією літостатичного тиску (катаклазу, що включає дроблення, грануляцію та розтріскування окремих мінеральних зерен або локальних зон). Даний фактор при розробці корисних копалин з використанням енергії вибуху (проходка капітальних і підготовчих гірничих виробок у вуглепородному масиві) призводить до утворення дрібнодисперсного кварцового (сілікозонебезпечного) пилу внаслідок розкриття численних дефектів будови (мікротріщин) в кварцових зернах на контакті «ВР-порода» [12], а також пневмоконебезпечного пилу при динамічному впливі на вугільний пласт.

Вивчення мінералогічного складу і структурних особливостей міцного піщанику ($f = 14-15$ за шкалою М.М. Протод'яконова) – найбільш небезпечною за фактором силікозу породи, показало [13], що його головні мінерали представлені уламковим кварцом – 30-40%, уламками польового шпату (в основному уламками кислого плагіоклазу) – 50-55%. другорядні мінерали представлені глинистими мінералами груп каолініту, монтморилоніту і слюди – 5-10%. Ступінь окатаності уламків 1-2 бали (кутоподібні і округлено-кутоподібні). Цемент контактний, а також цемент регенерації (порода частково окварцована), співвідношення видів цементу приблизно 1:1. Структура породи – дрібнозерниста, розмір зерен коливається від 10 до 1000 мкм. Високий вміст кварцу в пісковиках вказує на те, що при їх руйнуванні динамічними

навантаженнями (удар, вибух) може утворюватися велика кількість дрібнодисперсного силікозонебезпечного пилу. Мікроскопічний аналіз дисперсного складу зруйнованих зразків вуглепородного масиву [13], свідчить про те, що в продуктах руйнування пісковика в межах 90-95% містяться дрібнодисперсні фракції розміром від 0 до 100 мкм, які представлені виключно гострокутними уламками мінералу кварцу.

Запилення атмосфери виробок відбувається не тільки за рахунок новоствореного пилу, але і за рахунок зриву вибуховою хвилею пилу, що осів раніше на стінках [14]–[16].

На кількість пилу, що надходить в гірничі виробки при вибухових роботах, впливають такі чинники:

- фізико-механічні властивості гірських порід, які підривають;
- властивості і величина заряду вибухової речовини;
- спосіб і порядок підривання;
- площа поперечного перерізу виробки, в якій проводиться підривання;
- кількість, пилу, що накопичився на її стінках;
- використовувані засоби боротьби з пилом та ін.

Крім того, під час проведення підривних робіт виділяється велика кількість отруйних газів.

1.2 Огляд способів і засобів знепилювання повітря при виконанні вибухових робіт

При виконанні вибухових робіт в умовах проведення гірничих виробок викид пилової хмари є одним з найбільш потужних факторів забруднення рудникової атмосфери на значній відстані по довжині гірничих виробок. Пил, який розповсюджується по мережі гірничих виробок, містить, як зазначалося вище, велику кількість дрібнодисперсних фракцій, які мають негативний вплив на здоров'я гірників. Інтенсивність забруднення рудничної атмосфери пилом під час вибуху визначається кількістю викинутого пилу і поширенням його в

прилегли гірничі виробки. При цьому поширення пилової хмари залежить від дисперсності пилу і режиму провітрювання. У зв'язку з вищевказаним, основним напрямом зменшення шкідливого впливу на організм працюючих вибухових робіт при проведенні гірничих виробок є розробка способів і засобів зниження концентрації дрібнодисперсного пилу.

Аналіз основних факторів, що впливають на утворення шкідливих чинників при виконанні вибухових робіт показав, що на процеси пилогазоутворення при вибуховому відбиванні вугілля, в першу чергу, впливають енергетичні параметри руйнування (довжина і кількість шпурів, тип і кількість ВР, які одночасно підриваються, засоби підривання, що застосовуються) і фізико-механічні властивості пласта, в якому відбувається підривання. Більшість досліджень, присвячених забезпеченню мінімального виходу пилу і отруйних газів після вибухових робіт, спрямовано в основному на поліпшення якості ВР і засобів підривання (ЗП), вдосконалення параметрів БПР, засобів і способів боротьби з пилом [4].

Зменшити вихід пилу і отруйних газів можливо при застосуванні відповідного способу підривання і параметрів вибухових робіт. При електричному способі підривання ВР без оболонки утворюється менше пилу і отруйних газів.

Позитивний ефект досягнутий на рудниках кольорової металургії при застосуванні спеціальних паст, до складу яких входить рідке скло, розчин слабкої соляної кислоти і 3%-й розчин перекису водню [8].

Застосування набійки з хімічно неактивних речовин знижує кількість отруйних газів. Набійка з хімічно активних речовин, особливо лугів, поряд з активним поглинанням окислів азоту, доцільна з медико-біологічної точки зору, так як вдихання лужних аерозолів перешкоджає розвитку силікотичного процесу [8].

У даний час багатьма науково-дослідницькими інститутами та організаціями створено велику кількість способів і засобів боротьби з пилом в гірничих виробках (рис. 1.2). Всі їх можна розділити на такі основні напрями:

- попередження пилоутворення;
- запобігання поширенню пилу, який утворився, і боротьба з пилом безпосередньо у джерела пилоутворення;
- застосування заходів проти здування осілого пилу, як вторинного джерела пилоутворення.

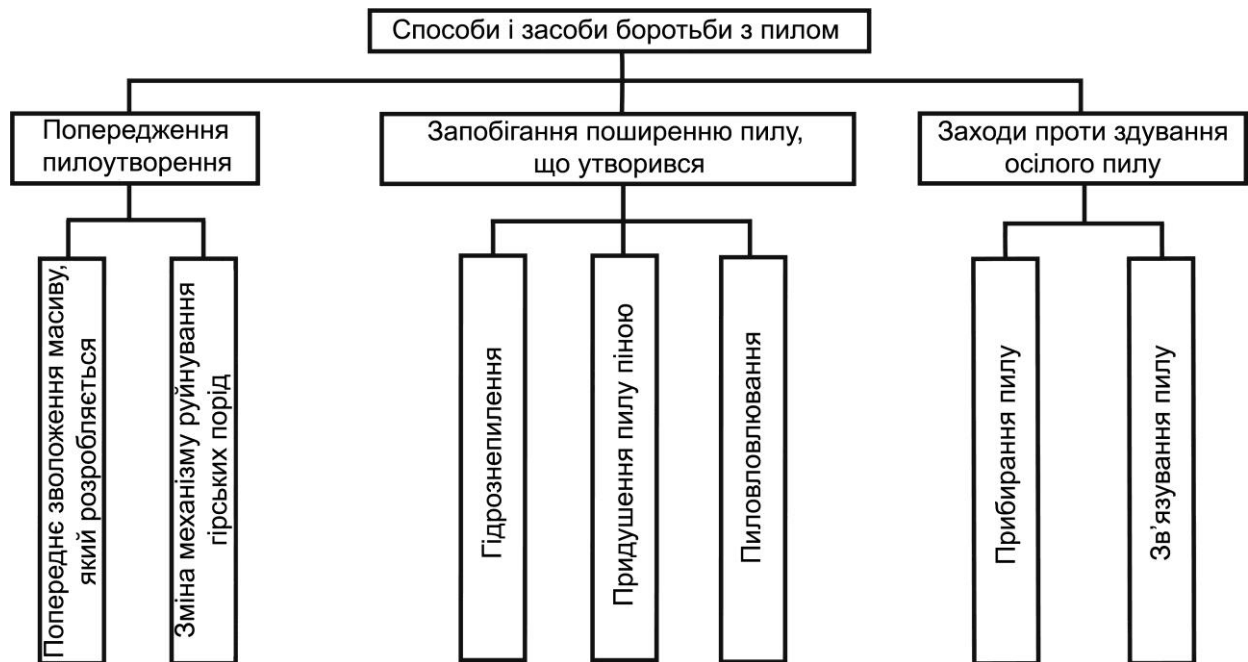


Рисунок 1.2 – Класифікація способів і засобів боротьби з пилом

Заходи, пов'язані з попередженням пилоутворення, по своєму принциповому значенню є головним напрямом в боротьбі з пилом. Одним з таких заходів, що має практичне значення і отримав в даний час значного поширення в Україні та за кордоном, є штучне зволоження вугілля в масиві [17].

Слід зазначити, що всі інші застосовувані способи спрямовані на усунення газів і пилу, які вже утворилися [18]. Основним способом видалення шкідливих продуктів вибуху і пилу з гірничих виробок є провітрювання. Однак при цьому пил не видаляється з повітря, а розбавляється і переміщується по мережі гірничих виробок, осідаючи на їх поверхні. Крім того, немає гарантії

попередження отруєння робітників в той час, коли виробка вважається провітреною, внаслідок попадання в легені пилу, який є активним сорбентом отруйних газів.

Найбільш простим і доступним засобом зниження концентрації пилу, що утворюється при вибухових роботах, є вода [18]. Вода ефективна при змочуванні частинок пилу.

Гідропідривання вважається одним з перспективних, ефективних і безпечних технологій виконання вибухових робіт. Відомі два принципово відмінних один від одного види гідропідривання:

- підривання зарядів в шпурах, заповнених водою, або з гідронабійкою у вигляді водонаповнених поліетиленових ампул;
- підривання зарядів в поліетиленових судинах, заповнених рідким матеріалом.

Гідропідривання першого виду має певні переваги у порівнянні зі звичайним висадженням на вугільних шахтах, тому що при його здійсненні різко підвищується ефективність вибуху: збільшується коефіцієнт використання шпурів (КВШ); знижується питома витрата ВР; одночасно при цьому різко знижується пилоутворення і виділення в атмосферу отруйних газів вибуху.

Проведені дослідження [4], [9], [18] показали, що внутрішня набійка є ефективним засобом запобігання адсорбції отруйних газів на рудниковому пилу. Внутрішня гідронабійка (0,4 л на кожен шпур) знижує запиленість після вибуху на 75-80%, адсорбцію двоокису азоту на 95-96% і окису вуглецю на 100% в процесі вибуху [9].

Для гідронабійки застосовують ампули з поліетилену діаметром 38-40 мм, довжиною 0,4 м, які самі замикаються.

Застосування водяної набійки при вибухових роботах сприяє зниженню вмісту оксидів азоту і запиленості повітря в забої відразу після вибуху. Але при цьому застосування поліетиленових ампул дає збільшення на 10-15% виходу

окису вуглецю, що пояснюється згоранням поліетилену в розпечених газах вибуху ВР [19].

Як приклад, широке застосування у вугільних шахтах при виконанні вибухових робіт знайшов вид гідропідривання зі створенням водорозпиленних і порошкових запобіжних завіс. Цей вид гідропідривання полягає в тому, що водорозпиленні завіси створюються за рахунок руйнування вибухом оболонки поліетиленових мішків з водою, підвішених перед забоєм до вибуху шпурових зарядів. Таким чином, виробка виявляється заповненою дрібним водяним пилом, який поглинає гази, що виділилися, і змочує та утримує пил.

Більш простим варіантом попереднього способу розпилення води вибухом є гідромінний спосіб розпилення і випаровування води перед вибухом. Для здійснення цього способу в підошві виробки на відстані 1-2 м від вибою створюють канавку ємністю близько 200 л і заповнюють її водою. У воду поміщають один-два патрона ВР з водонепроникною оболонкою, які вибухають одночасно з підриванням зарядів у врубових шпурах [20].

Ефективним напрямом боротьби з газами і пилом при вибухових роботах є зрошення пилогозової хмари і підірваної гірничої маси диспергованою водою. Застосування зрошувачів і туманоутворювачів різних конструкцій дозволяє підвищити ефективність пилегазопригнічення при веденні вибухових робіт в підготовчих виробках шахт до 86-92%. Однак таке зрошення технічно важко здійснити при веденні вибухових робіт в нішах [4]. Крім того, результати останніх досліджень, отриманих в Національній Академії Наук США [21], свідчать про те, що одержувані розпиленням краплі води в зв'язку з великим співвідношенням поверхні забруднюючих речовин до кількості крапель, чинять шкідливий вплив на організм людини і можуть викликати ракові захворювання.

Серед різноманітних способів і засобів придушення пилу великий інтерес представляють комплексні засоби очищення атмосфери після вибухових робіт [4]. Їх можна поділити на працюючі за рециркуляційною схемою і великі протигази, в яких забруднене повітря, проходячи через спеціальний агрегат, очищається від отруйних газів і пилу. Кожен з них має свої переваги і недоліки

і не може бути універсальним. Найбільшим недоліком таких апаратів і пристроїв очищення є те, що шахтна атмосфера очищається від шкідливих і отруйних домішок послідовно. Вихід з ладу однієї з касет очищення або поглинального фільтра призводить до того, що повітря не очищається від якогось шкідливого компонента.

Наведений аналіз свідчить про те, що широке впровадження прогресивної технології вибухових робіт і техніки її виконання, з одночасним здійсненням комплексу заходів з використанням апаратів і пристроїв для очищення рудникової атмосфери від дрібнодисперсного пилу після вибухових робіт, не усуває загрози зростання запиленості повітря і захворюваності гірників вугільних шахт на пневмоконіоз.

Використання зрошення та вентиляції, як основних способів усунення шкідливих продуктів вибухових робіт, виявляється недостатньо для зниження їх концентрацій до необхідних санітарно-гігієнічних норм. При цьому відомі способи руйнування породного масиву які направлені на мінімізацію пилоутворення за рахунок зміни властивостей середовища, в якій відбувається підривання, на жаль не знайшли широкого використання. Таким чином, недооцінюється можливість зниження виходу респірабельного пилу, що утворюється при вибуховому відбиванні вугілля зменшенням здатності пилоутворення пласта при його зволоженні.

У зв'язку з цим, для ефективного попередження небезпечних і шкідливих проявів газів і пилу, що утворюються, а також дрібнодиспергованих крапель зрошувальної рідини, необхідна розробка нетрадиційних підходів до вирішення цих питань, в тому числі оснований на подачі зволожуючої рідини безпосередньо в пласт до його руйнування [22].

При застосуванні зволоження вугілля в масиві відбувається зв'язування материнського пилу ще до його утворення [23]. Придушуються як великі фракції пилу, так і респірабельні, розміром менше 5 мкм, на які припадає переважна кількість пилу – 90-95%. Весь процес придушення пилу здійснюється шляхом змочування і обволікання пилинок рідиною з поверхнево-активними

речовинами (ПАР), що призводить до збільшення ваги пилинок і схильності їх до агрегації. Зволоження при руйнуванні вугілля не дає можливості утворитися вторинному пилю [18].

Дослідженнями встановлено [18], що в зволоженому масиві при руйнуванні зменшується вихід дрібних фракцій пилю і це не вимагає додаткового дрібнодисперсного зрошення, досить водорозпиленних завіс з добавками ПАР, для того, щоб усувати великі фракції пилю.

При вибуху, під дією газів, що утворюються, рідина, яка знаходиться в порах і тріщинах вугільного масиву, розпорошується, а висока температура продуктів детонації сприяє перетворенню води (водних розчинів) на перегрітий пар. Під впливом пари пил злипається в щільні грудки.

Відомо, що підвищення температури речовини пов'язано з його розширенням, в результаті чого зменшуються сили взаємного тяжіння між молекулами як всередині речовини, так і в його поверхневому шарі. Тому з підвищенням температури поверхневий натяг рідини зменшується і поблизу критичної температури стає рівним нулю, що сприяє більш ефективному змочуванню пилю. Водяна пара, має найбільшу адсорбційну активність в порівнянні з іншими компонентами газової хмари, тому інтенсивно адсорбується на частинках пилю і таким чином перешкоджає адсорбції отруйних газів [1]. Ведення робіт у зволоженій зоні може призвести до зміни параметрів БПР і часу виконання окремих операцій (зокрема – час, що відводиться на буріння шпурів).

Зниження міцності вугілля зволоженням може призвести до зменшення утворення токсичних газів і, в комплексі з іншими засобами, цей захід дозволить значно знизити загальну кількість газів, що виділяються в атмосферу і пилоутворення, підвищивши при цьому ефективність самого вибуху [18].

У роботах Е.І Єфремова та інших вчених встановлено [12], [24]–[29], що на інтенсивність пиловиділення і дисперсність пилоподібних частинок найбільший вплив надають властивості середовища, тобто характеристики міцності породоутворюючих мінералів і щільність дефектів їх побудови.

Відомо [30], що кварц – один з найміцніших породоутворюючих мінералів – міститься в породі, як правило, у вигляді понадіндивідів (витягнуті агрегати, що складаються з декількох десятків дрібних ізометричних зерен з великою щільністю дефектів будови [28]). Тому породи з вмістом кварцу, що піддаються руйнуванню під дією динамічних навантажень (вибух, удар), є основним джерелом дрібнодисперсного сілікозонебезпечного пилу (0-100 мкм), що складається на 75-90% і більше з кварцу [12].

Для безкварцевих порід (перидотити, габро, базальти) або порід з вмістом кварцу менше 10% (габро-діабазів) медіанний розмір дрібнодисперсних частинок зруйнованої вибухом породи зазвичай лежить в межах 30-40 мкм при середньозваженому їх діаметрі 65-75 мкм [24]. При вибуховому руйнуванні таких порід, пилогазова хмара, яка утворилася, швидко розсіюється і осідає за рахунок інтенсивного випадання великих частинок під дією гравітаційних сил.

Враховуючи той факт, що зі зменшенням міцності порід, які руйнуються, зростає діаметр пилоподібних частинок [26], є можливість збільшувати їх розмір за рахунок цілеспрямованого зменшення властивостей міцності середовища на контакті «руйнуючий інструмент – порода» або «ВР-порода».

У зв'язку з вищевказаним, одним із способів зниження кількості найбільш пневмоконіозонебезпечних дрібнодисперсних фракцій пилу, є зменшення міцності порід, які вміщують кварц, що може бути досягнуто шляхом впливу на них ПАР. Для кварцу такою речовиною є розчин Na_2CO_3 , в присутності якого опір даного мінералу руйнуванню сильно знижується [30]–[31].

1.3 Стан досліджень з питань пилодинаміки в підземних виробках шахт і рудників при проведенні гірничих виробок буропідривним способом

Багатьма дослідниками виконана величезна робота по вивченню процесів пилодинаміки в підземних виробках шахт і рудників при проведенні гірничих виробок буропідривним способом.

У натурних умовах було помічено, що при поширенні продуктів вибуху гірничими виробками під дією вентиляційного потоку, який виходить з кінця вентиляційного трубопроводу, спостерігається зміна концентрації і дисперсного складу пилу.

Інтерес до цього фізичного явища обумовлений тим, що в умовах проведення вибухових робіт утворюється велика кількість дрібнодисперсного пилу, яка шкідливо впливає на організм працюючих, викликаючи, при цьому, різні види захворювань органів дихання.

Турбулентні характеристики повітряних потоків досліджувалися Дж. Лауфером, Ф.С. Клебановим, Е.М. Мінським, Б.А. Фрідманом, Л.А. Таунсендом, Г. Рейхардом, Х.А. Драйденом, Ю.Г. Захаровим і ін. Повний огляд основних робіт в цьому напрямі виконано І.Г. Лойцянським, І.О. Хінце, Г. Шліхтінгом [32]–[34].

Руху твердих частинок в турбулентному потоці присвячені роботи М.А. Фукса, В.В. Дьякова, К.П. Меднікова, В.В. Білоусова, А.І. Ксенофонтової, К.З. Ушакова, В.М. Вороніна, Г.І. Баренблатта, М.А. Великанової, В.П. Журавльова, Ф.С. Клебанова, В.М. Маккавєєва, А.Д. Багріновської, Г.А. Радченко, А.П. Янова, В.І. Голінька, В.Є. Колесника, В.С. Ващенко, В.В. Скобунова, А.К. Красноштейна та ін.

Велика кількість науково-дослідних робіт присвячена боротьбі із забрудненням рудникової атмосфери шкідливими домішками, з яких слід зазначити праці В.В. Дьякова, М.І. Швидкого, О.О. Лапшина, І.Ф. Ярембаша, С.К. Савенко, О.М. Голишева, Ю.А. Гасило та ін.

Перші експериментальні роботи з проблеми динаміки зважених частинок в турбулентному потоці, що рухається по каналах (гірничих виробках), проведені в рамках класичної механіки турбулентного руху багатокомпонентних середовищ, яка тоді ж і починала формуватися, відносяться до початку 1950-х років.

У своїх роботах, для з'ясування повної картини руху зважених частинок в турбулентному потоці, дослідники виходили із загальних рівнянь механіки

турбулентного руху багатоконпонентних середовищ. Дотепер це питання досліджено далеко не повністю [29].

Література з теорії зважених частинок в турбулентному потоці в основному представляє дві теорії: дифузійну і гравітаційну.

Автори першої теорії не враховують зворотного впливу рухомих частинок на потік. Застосування дифузійної теорії ґрунтується на аналогії між турбулентною дифузією зважених частинок і рідини. При цьому приймається рівність пульсацій швидкостей течії рідини і зважених частинок, тобто їх коефіцієнти турбулентного обміну однакові.

Друга теорія, розроблена Г.І. Баренблатом, ґрунтується на врахуванні впливу зважених в потоці частинок на його характеристики [35]–[36].

Найважливішим показником вентиляційного потоку є його транспортуєча здатність, що забезпечує ефективний винос пилу. Вперше питання про рух пилових частинок в рудникових повітряних потоках висвітлено В.Н. Вороніним [37]. Незважаючи на те, що чисельні коефіцієнти, що використовуються цим автором, не можуть претендувати на точність, наведені ним формули достовірно відображають процеси підйому і виносу аерозолів. Відомі також роботи в цьому напрямі В.В. Дьякова, В.В. Скобунова, А.К. Красноштейна [39]–[41].

Дослідження динаміки пилових частинок розвивалися цими дослідниками в напрямі поглиблення уявлень про елементарні процеси, що відбуваються з пило-повітряними сумішами при їх русі по гірничій виробці, на основі експериментальних досліджень процесу поширення пилу. Ними закладено основи створення теорії поширення пилу в гірничій виробці з урахуванням всіх супроводжуючих його чинників.

Проте питання щодо руху пилових частинок в турбулентних потоках по суті практично не вирішене дотепер. Наявні сьогодні гіпотези не можуть пояснити процеси, пов'язані з підйомом і винесенням аерозолів, отже, не дозволяють описати процес поширення пилу аналітично.

Теоретично найбільш досліджено питання про поведінку окремих пилових частинок при різних режимах вентиляційного потоку без урахування їх впливу на рух повітря і інших частинок. Досягнення в цій області зводяться або до визначення траєкторії переміщення окремих частинок, або до вивчення випадання з повітряного потоку під дією гравітаційних сил і до обчислення на основі цього дальності їх польоту [29], [35]–[36], [40].

Траєкторії руху частинок пилу різні автори описують у вигляді залежностей від часу при малих і великих числах Рейнольдса (ламінарному і турбулентному потоках повітря) Для з'ясування повної картини руху зважених частинок в турбулентному потоці слід виходити із загальних рівнянь механіки турбулентного руху багатокомпонентних середовищ. З цією метою використовують, як правило, дифузний і гравітаційний способи.

Аналіз руху аерозолів передбачає вирішення різних систем диференціальних рівнянь в похідних. Даний шлях містить значні труднощі математичного характеру. У зв'язку з цим зазвичай використовують наближені методи дослідження. Істотним недоліком останнього підходу є те, що виділення і облік окремих факторів, що впливають на процес руху пилового аерозолу, тобто прийняття спрощуючих припущень, робляться нерідко без аналізу реальних умов, при яких вони дійсно справедливі. Використання на практиці таких рішень утруднено і часто призводить до розбіжності висновків різних авторів. Існує низка робіт, присвячених вивченню процесу поширення пилу на фізичних моделях гірничих виробок [36], [39], [41].

Поряд з теоретичними і лабораторними дослідженнями фізичних основ процесу поширення пилу в гірничих виробках велика увага, особливо в останні роки, приділяється його вивченню в шахтних умовах, які надзвичайно ускладнюють постановку, проведення і обробку експериментальних даних. І все ж низкою дослідників отримано досить надійні результати, що стосуються розподілу концентрації пилу як по перерізу, так і по довжині гірничих виробок [42]–[46]. Обробка результатів досліджень проводиться в основному зі

статистичними визначенням і побудовою емпіричних залежностей, які, як правило, згладжуються і справедливі для конкретних гірничотехнічних умов.

Як показує аналіз численних досліджень, зниження концентрації пилу з віддаленням від джерела автори описують експоненціальною залежністю [44], [47]–[51]. Крива зміни запиленості повітря уздовж гірничої виробки у всіх авторів має приблизно однаковий вид. Результати експериментальних досліджень цього напрямі дають багатий матеріал для теоретичного осмислення фізичної сутності цих процесів.

Значна увага вченими приділялася експериментальному вивченню розподілу пилу по перерізу виробок. Більшість з них вважає, що даний процес аналогічний розподілу поздовжніх швидкостей пульсацій повітря, а не руху в перерізі потоку. Це питання глибоко не вивчено, оскільки експериментальні дані отримані в основному для труб. Недостатньо вивчене це питання і теоретично.

Характер розподілу концентрації пилу у виробках як по перерізу, так і по довжині дуже важливий для розробки заходів по боротьбі з пилом. Однак проведені дослідження стосуються лише деяких певних умов, і, отже, отримані результати не можуть відображати дійсний розподіл концентрації пилу при інших умовах провітрювання.

При дослідженні розподілу концентрацій пилу по перерізу в наскрізній штрекоподібній виробці Г.А. Радченком та П.В. Белобородовим були отримані надзвичайно нерівномірні і несталі профілі концентрації пилу в перерізах, віддалених від джерела пилу на відстані 4,8 і 11,8 калібру виробки [52]. Якщо порівняти отримані ними пилові криві з епюр швидкості, зафіксованої авторами поряд з набором проб, то ніякої схожості між полями швидкостей руху повітря і полем концентрації пилу в даному перерізі моделі виробки немає. Вельми нерівномірний розподіл концентрації пилу в площинах поперечних перерізів пояснюється авторами досліджень умовами введення пилу в трубу. Однак якщо розподіл концентрації пилу по перерізу було б обумовлено лише умовами введення пилу в трубу, то при дослідженні потрібно дотримуватися, щоб

розподіл концентрації пилу по перерізу, що відстоїть від джерела пилу на відстані 4,8 калібру, був стійким.

Пізніше тими ж авторами при дослідженні розподілу концентрації пилу по висоті в діагонально з'єднаних повітропроводах було встановлено, що на розподіл дрібнодисперсних частинок по висоті в повітропроводах мають неабиякий вплив (крім загальновідомих чинників – турбулентного перемішування і осідання пилинок за рахунок сил тяжіння) умови введення пилу в потік, захоплення частинок турбулентними пульсаціями і зміна структури потоку під впливом місцевих опорів. Ними було встановлено, що сталий профіль запиленості можна зняти тільки на відстані не менше ніж 42 калібру від джерела пилоутворення при відсутності місцевих опорів і він збігається з епюрами поздовжніх і пульсаційних (поперечних) швидкостей.

Дифузійна теорія переміщення зважених частинок в турбулентному потоці почала розвиватися в роботах Є.П. Меднікова, які детально висвітлені в його монографії [53]. У цій роботі автор вказує на те, що в існуючих монографіях і збірниках з механіки аерозолів, як правило, відсутня згадка про одну з двох головних рушійних сил турбулентного перенесення і осадження аерозольних частинок, а саме турбулентної міграції частинок (інша рушійна сила – турбулентна дифузія частинок). Автор стверджує, що будучи невеликі в порівнянні з масштабом пульсацій газу, частинки залучаються з тим чи іншим відставанням по фазі і амплітуді в пульсаційний рух газу і здійснюють разом з ним інтенсивне дифузійне переміщення по потоку. Більш того, наявність досить значних градієнтів усередненої швидкості газу і її пульсаційних складових в пристінній області потоку викликає поява ще двох специфічних форм руху частинок. Однією з них є поздовжнє ковзання частинок щодо газу зі швидкістю, сумірною зі швидкістю його перебігу, інший – поперечна міграція частинок зі швидкістю, сумірною зі швидкістю турбулентних пульсацій газу.

На підставі виконаних досліджень автором отримано новий аналітичний опис розподілу значень швидкості радіальних пульсацій за поперечним перерізом турбулентного потоку в трубах і каналах.

Виконані дослідження [29], [53], [54] свідчать про те, що розподіл домішки (твердих частинок) по перерізу каналу (гірничих виробок) має слідувати тому ж закону, що і розподіл поздовжніх швидкостей пульсацій повітря, а не закону розподілу швидкостей руху повітря в перерізі потоку, за умови, що домішки, які переносяться, не впливають на формування і розвиток пульсаційного поля. Ця умова виконується для турбулентних потоків з малим насиченням його домішками (зваженими частинками) близько 1% за вагою до всієї поточної рідини, крім того, зважені частинки повинні бути такого розміру, щоб присутність їх не знижувала величини енергії пульсації.

Очевидно, таким умовам повністю відповідає рудниковий пил в атмосфері виробок і, отже, розподіл частинок по перерізу виробок має підкорятися тим же законам, що і розподіл швидкостей пульсацій повітря в гірничих виробках.

Як відомо, розмір турбулентних швидкостей пульсацій може бути вимірний величиною середніх квадратів пульсацій \bar{u}^2 і \bar{v}^2 або квадратних коренів з цих величин – стандартних відхилень $\sqrt{\bar{u}^2}$ і $\sqrt{\bar{v}^2}$, а відношення середнього квадратичного відхилення повздовжньої складової швидкості пульсації $\sqrt{\bar{u}^2}$ до середньої швидкості потоку називається інтенсивністю турбулентності.

Вимір поздовжніх пульсацій Е.М. Мінським в трубах різного перерізу і при різних числах Re показує, що картина розподілу залишається однією і тією ж [55]–[56]. Мінімум пульсацій чітко знаходиться на осі потоку. Такий же результат був отриманий Е.М. Мінським і Б.А. Фрідманом [56]. В шорстких каналах пульсаційне поле кількісно не відрізняється від поля, отриманого в гладкій трубі.

Вивченням інтенсивності пиловиділення і довжини зони викиду продуктів вибуху при веденні вибухових робіт шпуровим методом в прохідницьких забоях займалися В.Н. Воронін, Л.Д. Вороніна,

А.Д. Багриновский, А.І. Ксенофонтова, Г.А. Радченко, С.Ф. Шепелєв, А.П. Янов, В.С. Ващенко та інші дослідники.

Для визначення кількості пилу N (г), що надходить в гірничу атмосферу виробки при підриванні шпурового заряду вибухової речовини, рекомендована така формула [57]:

$$N = 1,5 \cdot 10^{-3} A^3 f \sqrt{\frac{S}{l_{ш}}}, \quad (1.1)$$

де A – кількість заряду, ВР, кг;

f – коефіцієнт міцності порід за шкалою проф. М. М. Протод'яконова;

S – площа поперечного перерізу виробки, м²;

$l_{ш}$ – середня довжина шпуру, м.

Залежність (1.1) не буде дотримуватися в тому вигляді, в якому вона отримана для звичайних комплектів шпурів.

Формула (1.1) враховує як утворення пилу в результаті дії ВР, яка дробить, так і надходження пилу в гірничу атмосферу в результаті зриву її частинок з поверхні боків, покрівлі і підшви виробок.

Автори вважають, що зрошення поверхні виробки в привибійному просторі знижує інтенсивність пиловиділення на 20-30%, тому в формулу слід вводити відповідні поправки.

Для визначення довжини тупикових виробок, що забруднюються продуктами вибуху, ними запропонована така формула [57]:

$$l_{з.в.} = 2 \cdot 10^{-4} \frac{A}{\gamma_{ш} \sqrt{S}}, \quad (1.2)$$

де $l_{з.в.}$ – довжина зони викиду газу і пилу, м;

γ – густина відбиваної руди або породи, кг / м³.

Для умов Криворізького басейну А.П. Янов і В.С. Ващенко довжину зони викиду продуктів вибуху в горизонтальних гірничих виробках рекомендують визначати за формулами [7]:

при вогневому підриванні

$$l_{з.в.} = \frac{m}{l_{ш}} + 0,3A; \quad (1.3)$$

при електричному підриванні

$$l_{з.в.} = \frac{2i}{l_{ш}} + 0,3A. \quad (1.4)$$

де m – кількість шпурів в забої;

i – кількість груп шпурів, які одночасно підриваються.

Для визначення початкової запиленості повітря n_0 (мг / м³) в межах зони викиду продуктів вибуху ними запропонована така формула [7]:

$$n_0 = K_{II} l_{ш} f \frac{K_c}{K_e}, \quad (1.5)$$

де K_{II} – коефіцієнт пропорційності ($K_{II} = 60$ для початкової максимальної запиленості та $K_{II} = 20$ – для середньої запиленості);

K_c – коефіцієнт, що залежить від способу підривання (при електропідриванні $K_c = 0,5$, при вогневому способі $K_c = 1,0$);

K_e – коефіцієнт, що залежить від обводнення порід і виробки (для сухого забою $K_e = 0,5$; для забою з вологими породами або штучним зрошенням $K_e = 1,0$; для забою зі слабкими притоками і невеликим протіканням $K_e = 2,0$; для обводненого забою з рясним протіканням або внутрішньою водяною набійкою $K_e = 3,0$).

При підриванні по шаруватим і тріщинуватим породам в формулу (1.5) вноситься поправка 0,7-0,9. При підриванні у вертикальних стволах, похилих а підняттяєвих виробках вноситься відповідна поправка, рівна 0,1; 0,5 і 0,1.

Під час вибуху, під дією ударної хвилі, відбувається явище здійснення раніше осілого пилу. Дане явище має суттєвий вплив на концентрацію пилу при формуванні пилогазової хмари. Вивченню цього явища присвячено велику кількість досліджень, детальний огляд яких, наведено в роботі [16]. У цих роботах, які висували і будь-яким чином підтверджували гіпотези про механізми підйому частинок, використовувалися методи математичного моделювання процесу підйому пилу за ударною хвилею, що розповсюджується вздовж шару частинок. При цьому, поширеним підходом в описі руху твердої фази був режим одиночних частинок, коли вважалося, що поле течії газу визначається тільки ударною хвилею і твердої стінкою, якої моделювався шар пилу. Сам же шар або хмара частинок, яка формується, не роблять зворотного впливу на перебіг газу. Тоді рух частинок можна описати системою звичайних диференціальних рівнянь, яка описує траєкторію частинки, що рухається під дією будь-якої сили, зумовленої впливом газу.

У роботах [15], [58]–[59] запропоновано математичні моделі підйому частинок шару пилу під дією ударної хвилі. Чисельно досліджена динаміка частинок дисперсної фази в турбулентному плинні газу в плоских ударних хвилях, що ковзають уздовж поверхні [59]. Показано суттєвий вплив інтенсивності ударної хвилі і початкового розташування частинок на характеристики їх підйому.

Всі роботи, наведені в огляді [16], присвячені початковій стадії процесу вторинного пилоутворення і призначені для вирішення завдань, пов'язаних з прогнозуванням виникнення вибухонебезпечних ситуацій. Однак, для вирішення завдань поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці в гірничих виробках, необхідно розглядати не тільки процеси пилоутворення в початковій стадії формування пилогазової хмари, але і в стадії розвитку процесів розповсюдження пилу при русі аеродисперсних систем мережею гірничих

виробок, що дозволить виконати якісну оцінку впливу пилового фактора на стан шахтної атмосфери.

Таким чином, можна констатувати, що дотепер є важливі результати, накопичений теоретичний і експериментальний матеріал, який дозволяє більш повно розглянути процеси, що відбуваються при поширенні дрібнодисперсного пилу в гірничій виробці.

Висновки за розділом 1

Відбій породи від гірського масиву буропідричним способом супроводжується утворенням в привибійній зоні пилогазової хмари, яка поступово витісняється свіжим вентиляційним струменем, при цьому змішується з останнім, що призводить, з одного боку, до зниження концентрації пилу і газу в хмарі, а з іншого боку – до розтягування цієї хмари, тобто до збільшення її протяжності.

Пилова хмара містить пил крупних фракцій, який інтенсивно осідає по довжині виробки і більш дрібний респірабельний пил (<5 мкм), який практично не випадає з вентиляційного потоку [60].

Газопилова хмара при поширенні її по всій довжині виробки містить в своєму складі дрібнодисперсну фазу, яка становить особливо небезпечну загрозу для здоров'я гірників, які працюють в даній виробці і в прилеглих сусідніх виробках шахтної вентиляційної мережі.

Аналіз показав, що при буропідричному способі проходження підземних гірничих виробок, незважаючи на всі досягнення щодо вдосконалення схем провітрювання і пилопридушення, концентрації шкідливих домішок у виробках значно перевищують ГДК, що і зумовлює високий рівень захворювання на пневмокніоз прохідників і майстрів-підричників [60]. Концентрація домішок на відстані 100 м від вибою навіть за наявності комплексу засобів пилопридушення і газовловлювання значно перевищує ГДК за всіма компонентами домішок. Та ж картина спостерігається і в усті виробки [60].

Список використаних джерел в розділі 1

1. Артамонов В.М., Ніколаєв Є.Б., Румежак О.М. Проблеми екології. 2012. – №1. – С. 85–89.
2. Бутуков А.Ю., Василянський Н.П. Пристрій автоматичного збору проб шахтного повітря при проведенні вибухонебезпечних робіт / А.Ю. Савченко. МакНІІ. – Макіївка-Донецьк, 1960. – С. 27-34.
3. Петрунін Г.О. Обґрунтування параметрів вентиляції та пиловловлювання в підготовчих виробках при бурових та буропідривних роботах: дисертація для ступеня к.т.н. – 2009. – 24 с.
4. Ярембаш І.Ф. Очищення шахтної атмосфери після вибухонебезпечних робіт. Оубл. Надра, 1979. – 191 с.
5. Боротьба з вугіллям і рідними пилами в шахтах [Петрухін П.М., Гродель Г.С. [Жилляєв Н.І., Коренєв А.П. та ін.] ; ред. П.М. Петрухіна. – [3-те вид.]. Оубл. Надра, 1981. – 271 с.
6. Закономірності дисперсного складу шахтного пилу в гірничих виробках вугільних шахт Донбасу / О.Г. Кременєв, В.Ю. Дерев'янський, В.А. Сергєєв та ін. // Методи та засоби створення безпечних і здорових умов праці на вугільних шахтах. – 2013. – №2. – С. 152-164.
7. Романченко С.Б., Руденко Ю.Ф., Костеренко В.М. Динаміка пилу у вугільних шахтах. – Гірничий кейс ТОВ «Кіммерійський центр», 2011. – 256 с.
8. Янов А.П. Захист шахтної атмосфери від забруднення / А.П. Янов, В.С. Ващенко. Оубл. Надра, 1977. – 238 с.
9. Боротьба з пилом і шкідливими газами на залізородних шахтах / А.П. Янов, В.С. Ващенко, Ф.Г. Гагауз та ін. Під загальною редакцією А.П. Янова. Оубл. Надра, 1984. – 228 с.
10. Довідник по боротьбі з пилом в гірничодобувній промисловості / Під редакцією А.С. Кузьмича. Оубл. Надра, 1982.– 240 с.

11. Про вплив фракційного складу кварцовмісних порід на вміст силікозанебезпечного пилу в продуктах їх руйнування / Є.І. Єфремов, В.Д. Петренко, В.С. Шевченко // Доп. АН України. – 1993.– №5. – С. 80-85.

12. Іщенко К.С. Експериментальні дослідження впливу властивостей лицьового матеріалу на ефективність та екологічну безпеку руйнування твердих середовищ вибухом / К.С. Іщенко, Л.А. Логвіна, В.М. Коновал // Вісник КДПУ. – 2006. – Частина 2, вип. 2. (37) – С.66-68.

13. Golinko V.I. Features of destruction coal-rock massif saturated surfactant / V.I. Golinko, D.V. Saveliev, Y.Y. Lebedev // Науковий вісник Національного гірничого університету. Науково-технічний журнал. – Дніпропетровськ: – 2015. – №5 – С. 98-104.

14. Федоров А.В. А.В. Федоров, Н.М. Федорова, І.А. Федорченко, Матеріали міжнародної конференції "РДАММ-2001". Інститут теоретичної та прикладної механіки. – Том 6, ч. 2, спецвипуск – 2001. – С. 642-649.

15. Гостєєв Ю.А. Математичне моделювання виникнення та загоряння частинок вугільного родовища / Ю.А. Гостєєв, А.В. Федоров Фізика горіння та вибуху. 2003. Т. 39, № 2. Р. 67-74.

16. Федоров А.В. Сумішоутворення при поширенні хвильових процесів в газозв'язях. 2004. Т.40, №1. С. 21-37.

17. Панов Г.Є. Попереднє зволоження масивів у вугільних шахтах і кар'єрах / Панов Г.Є. Опубл. Надра, 1970. – 129 с.

18. Ніколаєв Є.Б., Колесник В.А. Нормалізація гірничої атмосфери при руйнуванні гірських порід вибухом // Промислова безпека та вентиляція підземних споруд ХХІ століття / Ніколаєв Є.Б., Колесник В.А. // Матеріали ІІІ Міжнародної науково-практичної конференції 18–19 квітня 2013 року. – Донецьк: ДонНТУ. [Електронний ресурс] <http://Ea.donntu.org/handle/123456789/19961>.

19. Радіонов Б.М. Розробка методів і засобів зниження пилогазовиділення при виконанні вибухонебезпечних робіт в прохідницьких вибоях. Дис. ступеня

Канд. Техн. наук. 26.05.01 "Охорона праці та пожежна безпека" / Б.М. Радіонов – Кривий Ріг, 1993. – 19 с.

20. Іщук І.Г. Засоби комплексного знепилювання гірничих підприємств. Довідник / І.Г. Іщук, Г.А. Поздняков. Опубл. Надра, 1991. – 253 с.

21. Забурдяєв Г.С. Небезпечні та шкідливі прояви пилу в шахтах / Забурдяєв Г.С. // Безпека праці в промисловості. – 1999. – №2. – Р. 38-41.

22. Керування властивостями і станом вугільних пластів з метою боротьби з основними шкідливими факторами на шахтах / [В.В. Ржевський, Б.Ф. Братченко, А.С. Бурчаков, Н.В. Ножкін]. Під загальною редакцією В.В. Ржевського – Опубл. Надра, 1984. – 327 с.

23. Артамонов В.М. Про можливості управління умовами праці в очисних і підготовчих вибоїнах в зонах гідродару / [В.Н. Артамонов, І.М. Кузик, Є.А. Мартинова, Є.Б. Ніколаєв] // Гірничий інформаційно-аналітичний вісник МДТУ. – 2001. – №10, с. 119-121.

24. Єфремов Є.І. Експериментальні результати руйнування полімінеральних середовищ при вибуховому та механічному впливі. Конф. "Високоенергетична обробка матеріалів" / Є.І. Єфремов, В.Д. Петренко, І.Л. Кратковський, В.В. Шеленок. – Дніпропетровськ, 1995. – С. 44-49.

25. Єфремов Є.І. Вплив вибухового навантаження на ступінь руйнування полімінеральних середовищ. "Геотехнічна механіка" / Є.І. Єфремов, І.Л. Кратковський, В.Д. Петренко. – Дніпропетровськ: ІГТМ НАН України, 1998. – Том. 4. – С. 4-9.

26. Єфремов Є.І. Проблеми екології масових вибухів у кар'єрах / [Є.І. Єфремов, П.В. Бересневич, В.П. Мартиненко, В.І. Борисов]. – Дніпропетровськ: Січ, 1996. – 177 с.

27. Єфремов Є.І. Експериментальні дослідження впливу швидкості вибухового навантаження на вихід пиловідних фракцій при руйнуванні гірських порід. Сб. Наук. Пер. "Геотехнічна механіка" / Є.І. Єфремов, І.Л. Кратковський, В.Д. Петренко. Дніпропетровськ: ІГТМ НАН України, 2001. – Том. 26. – С. 8-12.

28. Кратковський І.Л. Ступінь орієнтації дефектів у структурі кристалічних порід та характер їх руйнування під дією навантажень [текст]. Сб. Наук. Пер. "Геотехнічна механіка" / І.Л. Кратковський. – Дніпропетровськ : ІГТМ НАН України, 2003. –Том. 42. – С. 115-122.

29. Ксенофонтowa А.І., Бурчаков А.С. Теорія і практика боротьби з пилом у вугільних шахтах, 1965. – 227 с.

30. Єфремов Є.І. Вплив поверхнево-активних речовин на характер динамічного руйнування полімінеральних порід / Є.І. Єфремов, І.Л. Кратковський, К.С. Іщенко [Електронний ресурс] nmu.org. ua /pdf/2013/20131016-30. pdf.

31. Greggs, D. Experiments bearing upon the orientation of quartz in deformation rocks / D. Greggs, J. Bell // Geol. Soc. American Bull., 1938 – vol. 49. – P. 1723-1746.

32. Лойцяньський І.Г. Механіка рідини і газу. Опубл. Наука, 1973. 847 с.

33. Хінце І.О. Турбулентність, її механізм і теорія / І.О. Хінце – Державне видавництво фіз.-мат. літ., 1963.– 680 с.

34. Шліхтінг Г. Виникнення турбулентності / Г. Шліхтінг. – Видавництво Ін. Літ., 1962. – 204 с.

35. Баренблатт Г.І. Про рух зважених частинок в турбулентному потоці / т. XVII, вип. 3. – Опубл. Наука – 1953. P. 261-274.

36. Фукс Н. А. Механіка аерозолів / Фукс Н. А. – АН, 1955. – 351 с.

37. Воронін В.М. Основи рудничної аерогазодинаміки / В.Н. Воронін – Вуглетехвидав., 1951. – 490 с.

38. Дьяков В.В., Ковальов В.І. Протипилові режими вентиляції в шахтах / В.В. Дьяков, В.І. Ковальов – Опубл. Надра, 1984. – 200 с.

39. Красноштейн А.К. Загальні закономірності провітрювання гірничих виробок / А.К. Красноштейн // Удосконалення освоєння родовищ, т. 30. – 1967. – С. 36-47.

40. Скобунов В.В. Шахтна аерологія / В.В. Скобунов – Вид. Академії наук. – 1962. – 259 с.

41. Бекірбаєв Д.Б. Боротьба з вугільним і кам'яним пилом в шахтах. Д.Б. Бекірбаєв, Г.С. Гродель, П.А. Гульшин та інші. – М.: Держгіртехвидав. – 1959 – 499 с.
42. Певнєв А.О. Експериментальне дослідження розподілу вугільного пилу в криволінійних повітряно-пилових потоках. –1976. – Вип. 1. – С. 150-154.
43. Старков С.П. Метод моделювання газових потоків при транспортуванні твердих частинок та його застосування // Праці СхідНІІ з безпеки виконання робіт у гірничодобувній промисловості.– 1974. №21. – С. 75-81.
44. Фролов М.А. Деякі питання теорії і практики моделювання пилоповітряних потоків у вибоїнах вугільних шахт / М.А. Фролов, В.І. Бородай // Боротьба з силікозом. 1970 – Т 8. – С. 43-54.
45. Байков А.Ф. Дослідження динаміки пилу в роботі плугових установок / А.Ф. Техніка безпеки, охорона праці та гірничорятувальна справа. – 1975. №2. – С. 38-44.
46. Гущин В.І. Боротьба з пилом в стругових лавах / В. І. Гущин. – ЦНШВугілля, 1975. – 41 с.
47. Голінко В.І., Лебедєв Я.Я., Новікова Є.А. Зміна концентрації та дисперсного складу пилу по довжині конвеєрних виробок вугільних шахт. – Дніпродзержинськ: – 2010. № 2 (15). – С. 319-327.
48. Довідник з вентиляції шахт [текст] / [Ф.А. Абрамов, В.А. Бойко, Н.Ф. Гращенко – Опубл. Надра, 1977. – 328 с.
49. Чемезов К.П. Утворення і придушення пилу в шахтах північного сходу СРСР / К.П. Чемезов, І.Кн. Муксуков, Г.П. Девиденко. 1977. – 120 с.
50. Шпонін А.П. А.П . Шпонін, А.К. Козлов . Гігієнічні аспекти охорони громадського здоров'я. – 1977. – С. 28-35.
51. Байков А.Ф. Дослідження процесу поширення пилу в турбулентних потоках лав в плужних вугільних виробках / А.Ф. Байков Наукові основи створення високопродуктивних комплексно-механізованих і автоматизованих шахт з розрахунковим і логічним керуванням. – 1975. – С. 288-294.

52. Радченко Г.А. Знепилювання вентиляції підземних виробок / Г.А. Радченко – Оpubл. Наука, 1970. – 304 с.
53. Медніков Є.П. Турбулентний транспорт і осадження аерозолів / Медніков Є.П. – Оpubл. Наука, 1981. – 174 с.
54. Медніков Є.П. Міграційна теорія осадження частинок аерозолію з турбулентного потоку на стінках труб і каналів / Є.П. Медніков // Доповіді АН, т. 206, №1. – 1972, – С. 51-54.
55. Мінський Е.М. Про пульсації швидкості в повністю усталеному турбулентному потоці / Е.М. Мінський // Журнал ОТН, т. 10, 1940. – С. 87-94.
56. Мінський Є.М., Фрідман Б.А. Про експериментальне визначення деякої статистики характеристики турбулентних потоків / Е.М. Мінський, Б.А. Фрідман // Вісті енергетики інституту ім. Г.М. Кржижановського», т. 9, 1940. Р. 38-52.
57. Воронін В.М. Керівництво по проектуванню і практичній реалізації протипилових режимів вентиляції в шахтах / В.Н. Воронін, Л.Д. Вороніна, А.Д. Багриновський. – Держгіртехіндекс, 1960. – 47 с.
58. Гостєєв Ю.А. Про розрахунок підйому пилу попутною ударною хвилею / Ю.А. Гостєєв, А.В. Федоров Фізика горіння і вибуху. 2002. Т.38, №3. Р. 80-84.
59. Бедарєв І.А. Розрахунок підйому частинок з печери, ініційованого проходженням ударної хвилі / І.А. Бедарєв, Ю.А. 2007. Т. 48, №1. С. 24-34.
60. Поздняков Г.А., Петрунін Г.О. Динаміка концентрації пилогазових аерозолів у довгих тупикових виробках, що ведуться буровибуховим методом / Г.А. Поздняков, Г.О. Петрунін // Гірничий інформативно-аналітичний вісник №12. – 2007. С. 296-302.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УТВОРЕННЯ І ПОШИРЕННЯ ПИЛОГАЗОВИХ ДОМШОК У ТУПИКОВИХ ВИРОБКАХ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ВИБУХОВИХ РОБІТ

2.1 Формування пилогазової хмари під час проведення підривних робіт в тупиковій виробці і винос її за межі зони викиду

Формування пилогазової хмари під час вибуху гірської породи відбувається під впливом таких факторів [1]:

- за рахунок виділення продуктів детонації і переподрібної породи з устя свердловини;
- в результаті здійснення пилу на поверхні гірничих виробок;
- при зіткненні і дробленні кусків породи під час переміщення їх вибухом.

При вибуху пилогазова хмара викидається у виробку за вельми короткий проміжок часу. Процес його формування являє собою високоенергетичний, складний процес, який швидко протікає.

В умовах існуючих технологій і схем ведення буропідривних робіт маса ВР, яка одночасно підривається, може досягати 180 кг. При підриванні значна маса пилу, який накопичився на всьому протязі виробки, переходить у зважений стан під дією ударної хвилі вибуху і підтримується в ній тривалий час внаслідок збільшення турбулізації вентиляційного струменя витоками повітря [2].

Під час вибуху камуфлетного заряду в породному масиві процес руйнування породи, відповідно до теорії Г.І. Покровського, йде наступним чином [3]: в момент вибуху удар газів вибуху руйнує і витісняє деякий шар породи, що прилягає до заряду, утворюючи порожнину – зону витіснення або котел (рис. 2.1). Розчавлена і витіснена порода вдавлюється в стінки котла, які внаслідок цього є шаром роздавленої і ущільненої породи. Ударна хвиля, яка виникла в момент вибуху, переміщається радіально в масиві породи за межі котла, викликаючи зсув частинок породи в радіальному напрямі. В результаті

радіального переміщення частинок і шарів породи в ній виникають діючі в тангенціальному напрямі зусилля розтягу та зсуву. Вони викликають утворення мережі радіальних і кільцевих (переривчастих сферичних) тріщин.

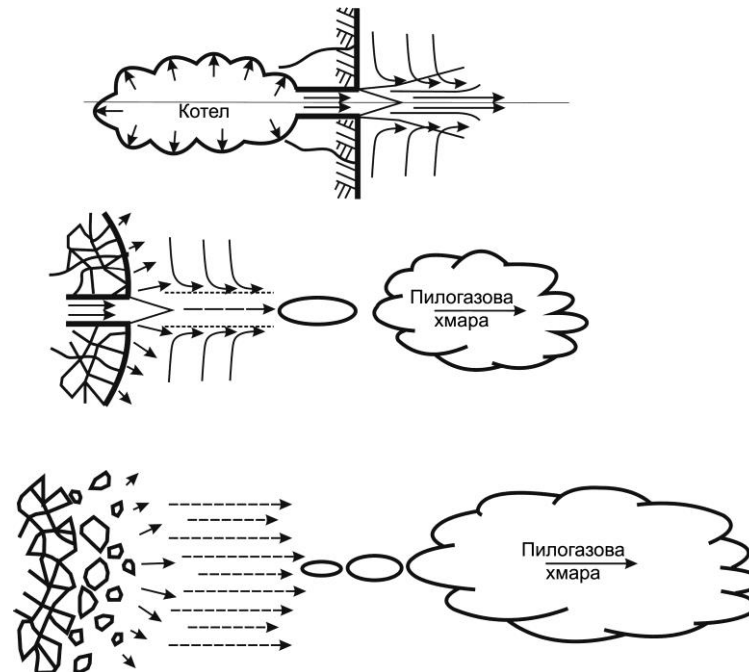


Рисунок 2.1 – Схема зародження пилогазової хмари при камуфлетному підриванні гірських порід

Таким чином, в межах зони руйнування на початку (від центру) розташовується шар безструктурної, роздавленою і ущільненою породи з частими і широкими тріщинами розривів і складань [3]. Зона руйнування містить полідисперсний пил, який витісняється разом з продуктами вибуху в результаті створення ними високого тиску.

Дослідженнями, проведеними у відділі механіки вибуху гірських порід ІГТМ НАН України, встановлено, що основним джерелом пилу при руйнуванні гірських порід буропідривним способом є процес вильоту газоподібних продуктів детонації вибухової речовини і суміші з матеріалу набійки разом з пилоподібними частинками, що утворилися в зоні дрібного дроблення на контакті «ВР-порода», і дрібнодисперсними частинками бурового шламу, що

втягуються в пилогазовий струмінь з прилеглої вибухової свердловини інжекційним потоком повітря [4]–[5].

На інтенсивність пиловиділення і дисперсність пилоподібних частинок, як встановлено в [5]–[6], впливають такі чинники: гірничо-геологічні особливості масиву (тріщинуватість і обводненість), питома витрата вибухової речовини і швидкість її детонації, фракційно-мінералогічний склад і характеристики міцності породи, яка руйнується, мікроструктурні особливості середовища (характер контакту між мінеральними зернами, щільність дефектів внутрішньої будови мінералів у вигляді мікротріщин і площин спайності, а також ступінь їх просторового орієнтування).

З перерахованих факторів найбільший вплив на пилоутворення при руйнуванні полімінеральних порід надають властивості середовища, тобто характеристики міцності породоутворюючих мінералів і щільність дефектів їх будови. Внаслідок того, що кварц – один з найміцніших породоутворюючих мінералів – міститься в породі, як правило, у вигляді надіндивидів (витягнуті агрегати, що складаються з декількох десятків дрібних ізометричних зерен з великою щільністю дефектів будови [7]), породи з вмістом кварцу, що піддаються руйнуванню під дією динамічних навантажень (вибух, удар), є основним джерелом дрібнодисперсного силікозонебезпечного пилу (0-100 мкм), що складається на 75-90% і більше з кварцу [5]. З огляду на той факт, що медіанний діаметр (середній діаметр 50% частинок пилоподібної фракції 0-100 мкм) промислового кварцового пилу не перевищує 2-4 мкм для пилу, що утворився при вибуху на контакті «ВР-порода», і 8-10 мкм для пилу в буровому шламi, частинки з такими властивостями можуть досить довго перебувати в атмосфері після вибуху за рахунок турбулентності повітряних потоків.

Для безкварцових порід (перидотити, габро, базальти) або порід з вмістом кварцу менше 10% (габро-діабазів) медіанний розмір дрібнодисперсних частинок зруйнованої вибухом породи зазвичай лежить в межах 30-40 мкм при середньозваженому їх діаметрі 65-75 мкм [8]. При вибуховому руйнуванні

таких порід пилогазова хмара швидко розсіюється і осідає за рахунок інтенсивного випадання великих частинок під дією гравітаційних сил.

Процес поширення газопилової хмари, яка утворюється при вибуху, можна поділити на два періоди, які характеризуються різними законами поширення шкідливих домішок: період прискореного і період уповільненого руху газу і пилу по виробці [9].

Перший період короткочасний і не перевищує часток секунди. У момент вибуху газу і пил з певною масою під дією енергії вибуху заповнюють об'єм гірничої виробки до повного переходу кінетичної енергії в потенційну.

Імпульс високого тиску вибухових газів за досить короткий проміжок часу передається навколишньому середовищу (зоні нормального тиску), яка стискається, а площа розділу відсувається на деяку відстань від початкової межі, створюючи перед собою переущільнену зону [10]. Але так як тривалість імпульсу мала і передача його навколишньому середовищу відбувається повністю, то між забоем і зоною переущільнення виникає зона розрідження, яка відразу ж заповнюється газоподібними і колоїдними продуктами вибуху. У цей момент концентрацію газів і пилу в заповненому обсязі можна вважати величиною постійною. Однак в силу виникнення в результаті вибуху ВР поздовжнього коливання в пружному середовищі, за розрідженням в певному об'ємі настає стиснення. Тому переущільнена зона (незагазована і з досить високим тиском) починає переміщатися в бік забою, стискає при цьому загазований об'єм і на межі з ним розріджує його свіжим повітрям.

З огляду на те, що поздовжні коливання, які виникли в результаті детонації ВР, загасають з незначним періодом, можна з достатньою для практики точністю вважати, що зона розрідження, яка виникла на початку вибуху, є зоною викиду продуктів хімічного розкладання ВР, але вже зі змінною концентрацією отруйних домішок по довжині виробки, тобто максимальна концентрація буде біля забою, а мінімальна – на межі зони викиду газів.

Найважливішими параметрами пилогазової хмари, яка утворилася після вибуху є її об'єм, який визначається величиною площі перерізу виробки і довжиною зони викиду продуктів вибуху, а також дисперсність і початкова концентрація пилу і отруйних газів в хмарі.

Об'єм зони руйнування приблизно в 1000-2000 разів більше об'єму заряду [3].

Початкова концентрація пилу і отруйних газів формується в зоні викиду продуктів вибуху, довжина якої залежить від таких факторів: кількості одночасно підірваної ВР (A), кг; площі перерізу виробки (S), м².

Для визначення довжини зони викиду l_0 продуктів вибуху ВР в умовах шахт Донбасу пропонується використовувати емпіричну формулу [11]:

$$l_{з.в.} = \frac{5A}{\sqrt{S}} \quad (2.1)$$

Теоретичні дослідження [12]–[13] дозволили отримати більш загальну формулу, що має високу збіжність з відомими емпіричними формулами і фактичними даними і враховує радіус дії шпурового заряду R (м), швидкість детонації вибухових речовин D (м/с) і міцність порід f за шкалою проф. М.М. Протод'яконова. Ця залежність має такий вигляд:

$$l_{з.в.} = 1,7 \cdot 10^{-4} \frac{AD}{R^2 \sqrt{fS}}$$

Експериментальні вибухи в тупикових виробках показали [9], що через 20-30 с після вибуху шкідливі домішки заповнюють весь переріз виробки, концентрація їх по перерізу вирівнюється, подальше поширення по довжині виробки газопилової хмари відбувається з незначною швидкістю. Тому для практичних розрахунків при визначенні об'єму виробок, що забруднюються

продуктами вибуху, можна обмежитися довжиною зони поширення газів і пилу за 25 с, яка для тупикових виробок може бути визначена за формулою:

$$l_{з.в.} = 8,1 \cdot 10^{-2} S^{\frac{3}{4}} \alpha^{-0,5} A + 20,7 \ln(1 + 2,5 \cdot S^{-5/8} \alpha^{-1/4}), \quad (2.2)$$

де S – площа поперечного перерізу виробки, м^2 ;

α – коефіцієнт аеродинамічного опору виробки, $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$;

A – величина (маса) заряду, кг .

Перший доданок у виразі (2.2) враховує викид газів і пилу в момент вибуху заряду ВР ($\text{м}/\text{кг}$), а другий доданок враховує поширення газу і пилу в другому періоді (м).

Після вибуху в перші 800 мс пилогазова хмара викидається на довжину виробки $l_{з.в.}$ і має в стадії зародження температуру близько $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ [3].

Таким чином, в результаті першого етапу зародження пилогазової хмари утворюється вихідний об'єм гарячих газів і пилу V_2 .

Встановлено, що кількість шкідливих газів від застосовуваної при вибухах на вугільних шахтах ВР – ПЖВ-20 становить $145 \text{ л}/\text{кг}$ ВВ в перерахунку на CO [10]. Ці гази в період зародження пилогазової хмари займають об'єм:

$$V_2 = 14,5 A, \text{ м}^3,$$

де A – маса заряду ВР під час вибуху, кг .

У вихідний об'єм пилогазової хмари, крім вибухових газів, надходить і атмосферне повітря, тому його вихідний об'єм буде:

$$V_1 = V_n + V_2.$$

Тобто, в результаті змішування після вибуху гарячих газів (об'ємом V_2 і температурою T_2) з атмосферним повітрям (об'ємом $V_{\text{п}}$ і температурою $T_{\text{п}}$), отримаємо суміш газів об'ємом V_1 , з невідомою температурою T_1 .

У зв'язку з тим, що температура і тиск суміші газів, пилу та атмосферного повітря набагато перевищує температуру і тиск в гірничій виробці, відбувається подальше розширення пилогазової хмари до вирівнювання температури і тиску до атмосферних умов у виробці. При цьому об'єм пилогазової хмари зміниться до величини V_2 .

Таким чином, процес переходу пилогазової хмари зі стану 1 (моменту її зародження) в стан 2 (моменту завершення її формування) здійснюється у вигляді двох процесів: ізотермічного і ізохоричного.

Отже, на підставі рівняння стану газів $f(P, V, T) = 0$ і відповідно до законів Бойля-Маріотта [14]:

$$PV = \text{const}$$

$$\text{при } T = \text{const}, m = \text{const}$$

і Гей-Люсака:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \text{ при } P = \text{const}, m = \text{const}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \text{ при } V = \text{const}, m = \text{const}$$

можна записати:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2},$$

Звідки:

$$V_2 = V_1 \frac{P_1 T_2}{P_2 T_1}, \quad (2.3)$$

де P_1 – тиск всередині хмари після змішування гарячих газів з атмосферним повітрям;

P_2 – тиск всередині хмари після розширення і остигання, рівний атмосферному, Па;

T_1 – температура всередині хмари після змішування гарячих газів з атмосферним повітрям,

K ; T_2 – температура суміші газів хмари після охолодження, рівна температурі навколишнього середовища, K .

При змішуванні розпечених газів з відносно холодним атмосферним повітрям, маса суміші дорівнює масі складових компонент [15]:

$$m_1 = m_2 + m_{\text{п}}, \quad (2.4)$$

Внутрішня енергія має властивість адитивності, тобто внутрішня енергія складної системи дорівнює сумі внутрішніх енергій складових її частин [16], отже:

$$U_1 = U_2 + U_{\text{п}},$$

де U_1 – внутрішня енергія суміші газів, Дж;

U_2 – внутрішня енергія гарячого газу, Дж;

$U_{\text{п}}$ – внутрішня енергія атмосферного повітря, Дж.

Визначити абсолютне значення внутрішньої енергії системи неможливо [15]. На практиці вимірюються тільки зміни внутрішньої енергії. Тому кількісне визначення внутрішньої енергії системи можливо лише по відношенню до деякого, умовно вибраного, стандартного стану.

Якщо суміш газів задана масовими частинками q_i , то питома масова теплоємність суміші визначається за формулою [15]:

$$C_p = q_1 C_{p1} + q_2 C_{p2} + \dots + q_n C_{pn} = \sum q_i C_{pi}.$$

Температура суміші обчислюється за формулою [16]:

$$T_1 = \frac{q_z C_{pz} T_z + q_n C_{pn} T_n}{q_z C_{pz} + q_n C_{pn}}, \quad (2.5)$$

де q_z, q_n – відповідно масові частки гарячого газу і атмосферного повітря.

Тиск суміші визначається за рівнянням Клапейрона-Менделєєва:

$$P_1 = \frac{m_1 R T_1}{V_1}, \quad (2.6)$$

де R – газова постійна суміші.

З урахуванням виразів (2.4) і (2.5) формула (2.6) прийме вигляд:

$$P_1 = \frac{R(m_z + m_n)(q_z C_{pz} T_z + q_n C_{pn} T_n)}{V_1(q_z C_{pz} + q_n C_{pn})}. \quad (2.7)$$

Отриманий вираз (2.7) дозволяє визначати тиск суміші газів в зоні викиду.

Підставивши в (2.3) вирази (2.5) і (2.7), отримаємо формулу для визначення об'єму пилогазової хмари, яка завершила своє формування під дією енергії вибуху:

$$V_2 = \frac{(m_z + m_n) R T_2}{P_2}. \quad (2.8)$$

З урахуванням того, що T_2 це температура рудникового повітря T_B , а P_2 – тиск всередині хмари після розширення і остигання, рівний атмосферному P_a , вираз (2.8) остаточно представимо у вигляді:

$$V_2 = \frac{(m_e + m_n)RT_n}{P_a}$$

Під час витіснення продуктів вибуху в гірничу виробку, в інтервалі часу 0,03-0,12 с після початку підривання шпурових зарядів, спостерігається різкий скачок запиленості рудникової атмосфери призабойного простору [3] до величини, рівної $6,4 \text{ кг/м}^3$ (рис. 2.2).

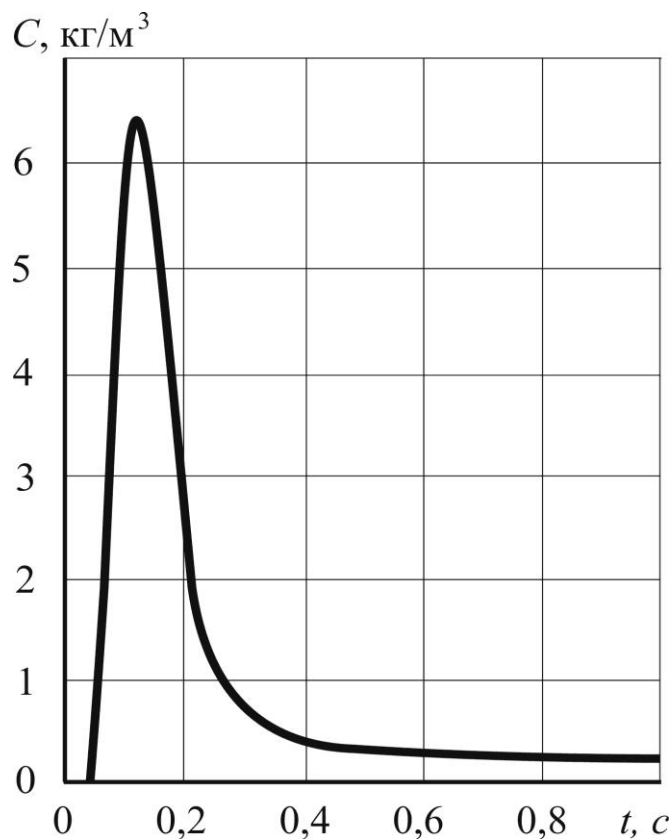


Рисунок 2.2 – Зміна концентрації (C) вугільного пилу в призабойному просторі виробки за час (t) після подачі електричного імпульсу у вибуховий ланцюг

Потім концентрація різко падає до величини рівної $2,5 \text{ кг/м}^3$ через 0,2 секунди після висадження. Після цього починається її плавне зниження до величини рівної $0,3 \text{ кг/м}^3$ через 0,5 с і $1-2 \text{ г/м}^3$ через 3 хв після висадження, що свідчить про закінчення формування пилогазової хмари.

У пилогазовій хмарі, до закінчення її формування, приймає також участь дрібнодисперсний пил за рахунок її зриву вибуховою хвилею з стінок виробки [9]. Ударна хвиля (УХ), поширюючись уздовж гірничої виробки, взаємодіє з шаром раніше осілого пилу. Механізм утворення зваженого пилу за ударними хвилями, які проходять повз шар осілого пилу, досліджений експериментально і аналітично багатьма авторами [17]–[20]. В роботі [18], процес підняття пилу пояснюється дією системи хвиль стиснення і розрідження, що утворюється в результаті послідовного відбиття від твердої поверхні і межі хмари частинок головної УХ. Газовий потік за фронтом УХ утворює на поверхні турбулентну структуру. Дрібні частинки (до 10 мкм) за час перебування в області розрідження встигають відірватися від поверхні. Потрапивши в турбулентний приграничний шар, частинки вносяться в основний потік, набираючи швидкість. Основна роль у механізмах підйому і виносу частинок з пристінної області в високошвидкісних двофазних потоках належить силам Саффмана і Магнуса.

У результаті проведених розрахунків [19] виявлено декілька можливих механізмів підняття частинок пилу з твердої підкладки. Перший пов'язаний з утворенням області досить інтенсивної позитивної вертикальної швидкості за викривленою УХ, що може призвести до викиду більш великих частинок вгору. Другий механізм підйому пов'язаний з нестационарним вихровим утворенням, в яке згортається струмінь запиленого газу, що розповсюджується в чистий газ за УХ.

У міру віддалення від центру вибуху УХ загасає, тому її вплив на пил, який осів раніше, слабшає і кількість пилу, який здіймається, знижується по довжині виробки. Крім того, кількість осілого пилу, який здіймається ударною хвилею, також зменшується по довжині виробки.

2.2 Дослідження процесу турбулентного перенесення дрібнодисперсного пилу у вентиляційному потоці при проведенні гірничих виробок буропідривним способом

Процес поширення по виробці, сформованої під час вибуху газопилової хмари, за зоною викиду (у другому періоді поширення домішок) відбувається під впливом вільного струменя повітря, який виходить з трубопроводу з відносно невеликою швидкістю.

Домішки (пил, газ), що знаходяться поза межами вільного струменя, проникають в повітряне середовище за рахунок турбулентної дифузії, таким чином відбувається перемішування і інтенсивний винос пилогазових домішок з привибійної частини виробки [21]–[22]. Пил і продукти вибуху поширюючись по гірничих виробках погіршують санітарно-гігієнічні показники рудникової атмосфери на робочих місцях.

Для зменшення запиленості рудникової атмосфери при проведенні гірничих виробок буропідривним способом використовують різні способи зниження пилоутворення при вибухах. Для визначення ефективності застосовуваних способів і засобів зниження пилоутворення при виконанні вибухових робіт необхідно визначати концентрацію пилу на будь-якій довжині тупикової виробки протягом всього часу провітрювання з урахуванням витоків повітря з вентиляційного трубопроводу, що можливо на підставі рішення диференціального рівняння турбулентної дифузії. Відповідно до теорії зважених частинок в турбулентному потоці характер їх руху в гірничих виробках визначається спектром пульсацій, характерних для турбулентних потоків [23]. Характер руху частинок пилу і молекул газу відрізняється, але до певної межі. Такою межею є дисперсність частинок пилу.

У турбулентних потоках на середній рух накладаються пульсації коливання, що мають найрізноманітніші амплітуди і напрямки.

Розрахунки показують [24], що тільки досить великі частинки дисперсної фази, залежно від гідродинамічних умов середовища і щільності взаємодіючих

фаз, не беруть участі в турбулентних пульсаціях середовища. Для більш дрібних частинок при моделюванні гідродинамічних процесів в багатозначних системах турбулентний пульсаційний рух частинок необхідно враховувати. Частинка, зважена в турбулентному потоці, тим точніше слідує за пульсаціями середовища, чим менше її радіус і різниця щільності фаз, чим більше в'язкість середовища і нижче частота її пульсацій.

Існує дві форми руху зважених частинок: турбулентна дифузія і турбулентна міграція частинок. Турбулентна дифузія не може забезпечити високих значень швидкості турбулентного осадження частинок на стінках каналів. Вона лише підводить аерозольні частинки в пристінну область потоку [25].

При теоретичному аналізі всіх форм руху частинок в турбулентному потоці зазвичай приймаються такі припущення [25].

1. Діаметр частинок $d_{\text{ч}}$ малий у порівнянні з масштабом несучих їх пульсаційних вихорів з масштабом ℓ , тобто $d_{\text{ч}} \ll \ell$. При такому припущенні кожна частинка робить рух, залишаючись в межах вихору.

2. Частинки мають форму близьку до сферичної, а в разі сильного відхилення від сфери вводиться коефіцієнт форми. Полідисперсність частинок розглядається пофракційно.

3. Частинки не утрудняють рух одна одної в ході взаємних переміщень; вони не зіткаються, не коагулюють один з одним; не надають відчутного впливу на турбулентні характеристики середовища. Межею концентрацій частинок при виконанні даних умов, згідно з експериментальними даними Россеткі і Пфефером, можна вважати $C \leq 200 \text{ г/м}^3$ [24].

4. Електростатичні й інші сили не гідродинамічної природи відсутні.

Тому не буде великої погрешності в допущенні, що турбулентна дифузія частинок в розвиненому турбулентному потоці далеко від стінок дорівнює турбулентній дифузії молекул газу [23].

Для дрібнодисперсних частинок розміром до 10 мкм в умовах шахтних вентиляційних потоків коефіцієнт турбулентної дифузії D_d рівний коефіцієнту

турбулентної дифузії середовища D_T , тому рух цих частинок практично нічим не відрізняється від руху несучих турбулентних вихорів середовища [26].

Задача про вертикальний розподіл частинок в горизонтальному потоці з урахуванням дії гравітаційного поля вирішена Н.А. Фуксом. Розглядаючи рівновагу процесів осадження частинок під дією сили тяжіння і переходу їх у верхні шари потоку під впливом турбулентної дифузії, він отримав таке рівняння розподілу частинок по висоті:

$$\ln \frac{C_y}{C} = -\frac{v_e y}{D_t}, \quad (2.9)$$

де C – концентрація частинок біля дна каналу, мг/м³;

C_y – концентрація на висоті y , мг/м³;

y – висота каналу, м;

v_e – швидкість осадження частинок в спокійному повітрі, м/с;

D_t – коефіцієнт турбулентної дифузії, м²/с.

При $Re > 10000$ коефіцієнт D_t практично постійний і виражається емпіричною формулою [7]:

$$D_t = 0,044\nu Re^{0,75},$$

де Re – число Рейнольдса;

ν – кінематична в'язкість повітря, м²/с.

При діаметрі дисперсних частинок в потоці повітря < 20 мкм, відбувається їх рівномірний розподіл по перерізу виробки за рахунок турбулентних пульсацій. У цьому випадку коефіцієнт турбулентної дифузії визначається за виразом [27]:

$$D_t = 0,007\nu Re^{0,875}. \quad (2.11)$$

З рівнянь (2.9) і (2.11) випливає, що:

$$C_y = C \exp\left(-\frac{v_e y}{0,007 \text{Re}^{0,875}}\right) \quad (2.12)$$

Розрахунки, виконані за рівнянням (2.12) для виробки площею поперечного перерізу 8 м², показують, що при швидкості повітряного потоку 0,25-0,3 м/с і діаметрі кварцових частинок до 5 мкм концентрація аерозолу по висоті залишається практично незмінною. Експериментальні дослідження, виконані В.В. Недіним та О.Д. Нейковим, підтверджують справедливість даних розрахунків [28]. Отже, кварцові частинки з діаметром до 5 мкм в таких потоках повністю захоплюються вихровими масами, і дія сили тяжіння в видаленні від стінок виробок дуже малий в порівнянні з дією аеродинамічних сил.

У шахтах в міру віддалення від джерел пиловиділення запиленість повітря зменшується. Це явище пояснюється осадженням частинок пилу на бічні стінки, покрівлю та підосшву виробок. Спостереження показують, що пил осідає на поверхні виробок як при малих, так і при великих швидкостях вентиляційного струменя. Так, наприклад, в рудних шахтах має місце накопичення пилу в вентиляційних виробках, де швидкість руху повітря досягає 5-7 м/с. Осадження пилових частинок в турбулентному потоці можливо під впливом гравітаційних сил, дифузійних процесів і інерційних сил.

Аналіз теоретичних і експериментальних досліджень [29] показує, що в турбулентному потоці на достатньому видаленні від стінок частинки повністю захоплюються пульсаціями і їх переміщення в напрямі течії і по перерізу потоку визначається головним чином динамічними параметрами потоку. Гравітаційні сили на переміщення дрібнодисперсних частинок впливу майже не мають. Підраховано, що в горизонтальній виробці при швидкості вентиляційного струменя більш 0,2 м/с осадження пилу з розмірами частинок менше 10 мкм під дією гравітаційних сил практично виключено [28]. Отже,

можна стверджувати, що різниця в процесах турбулентного перенесення твердих частинок і молекул газу залежить від ступеня дисперсності пилу, і для високодисперсних систем цим розходженням можна зневажити, без шкоди для точності практичних розрахунків.

При порівнянні картини руху зважених частинок і молекул газу в турбулентному потоці слід виходити із загальних рівнянь механіки турбулентного руху багатокомпонентних середовищ. Отже, отримання теоретичної залежності, що дозволяє визначати концентрацію дрібнодисперсного пилу (<10 мкм) на будь-якій відстані від миттєвого (імпульсного) джерела пилоутворення по довжині тупикової виробки в період її провітрювання з урахуванням витоків повітря з вентиляційного трубопроводу можливо на підставі диференціального рівняння турбулентної дифузії.

Після висадження процес провітрювання довгих тупикових виробок відбувається при нагнітанні в них свіжого повітря по трубопроводу. Пил і газ, що виносяться з привибійної частини, надходять в основну частину виробки у вигляді хмари, яка переміщується повітряним потоком до устя виробки [30]. У початковий момент після вибуху хмара заповнює виробку в її привибійній частині довжиною l_n (рис. 2.3, положення I - I). Концентрація пилу і газу в повному об'ємі хмари приблизно постійна.

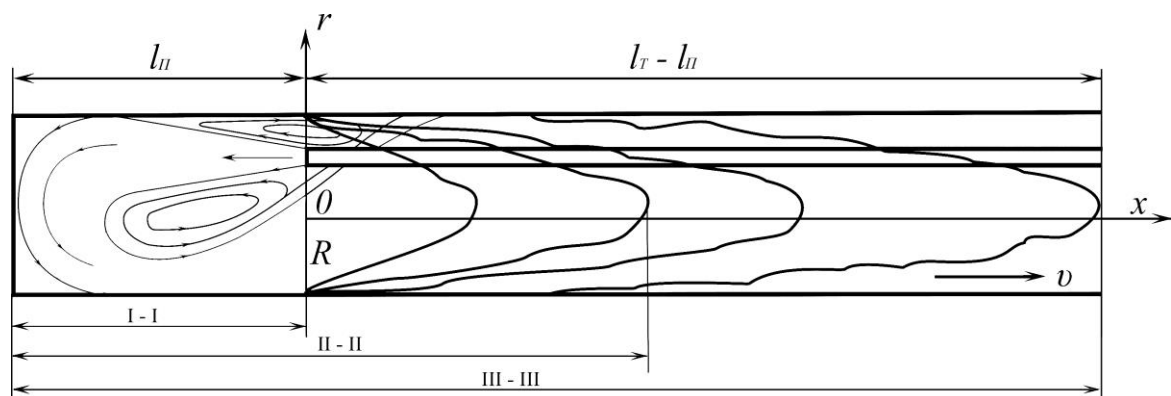


Рисунок 2.3 – Схема деформації і розтягування пилової хмари в тупиковій виробці при нестационарному процесі надходження пилу і нагнітальному способі провітрювання

Надалі, в зв'язку з подачею свіжого повітря в вибій по повітропроводу, пилова хмара рухається від забою, в результаті чого відбувається розрідження пилу, а, отже, і зміна його концентрації по довжині гірничої виробки (рис. 2.3, положення хмари в момент II-II). При цьому в результаті нерівномірного розподілу швидкостей руху повітря в перерізі (центральної частині потоку переміщуються швидше), а також дифузійних процесів газова хмара розтягується.

Через деякий час пил і газ з привибійної частини повністю видуваються і їх концентрація в ній стає рівною нулю. З цього моменту хмара відривається від вибою і починає рухатися уздовж виробки на ділянці $l_T - L_n$ (рис. 2.3, положення хмари в момент III-III).

Розтягування хмари при постійній кількості пилу в ньому призводить до зменшення його концентрації. На ступінь розрідження пилової хмари впливають також витоки повітря з вентиляційного трубопроводу.

Таким чином, на зміну концентрації пилу по довжині виробки впливають два основні процеси: деформація пилової хмари за рахунок дебіту свіжого повітря з кінця вентиляційного трубопроводу в привибійній частині (на ділянці $l_T - L_n$) і розрідження пилу в хмарі витоками повітря ($Q_{вит.хм.}$), які надходять з вентиляційного трубопроводу по довжині виробки.

Для визначення концентрації пилу з урахуванням деформації пилової хмари математично задача може бути представлена таким чином. Приймається, що початок циліндричної системи координат розташовано в площині вентиляційного трубопроводу, через який свіже повітря для провітрювання виробки нагнітається в привибійну частину виробки (рис. 2.3). У початковий момент часу, при $t = 0$, концентрація пилу є функцією радіуса виробки, $C = C_0 \varphi(r)$. Рівняння траєкторії частинок має вигляд (рис. 2.4):

$$x = \varphi(r)$$

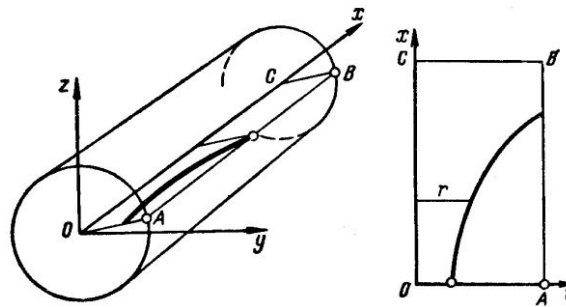


Рисунок 2.4 – Схема траєкторії частинки пилу при $v_s = 0$

Поточні точки траєкторії $x_i = \varphi(r_i)$ можна обчислити за виразом [7]:

$$x = 10 \int_0^r \frac{1 - \frac{r^2}{R^2}}{1 + 1,72 \left(\frac{r}{R}\right)^{3,6}} dr$$

де $x_c = f(R)$; ($r_c = R$) – стінка виробки.

Приймаємо припущення, що на поверхню виробки зважений пил не осідає. Швидкість повітря (v) дорівнює її середньому значенню. Концентрація пилу за межами привибійної зони залежить від радіуса виробки і змінюється за рахунок розширення хмари по експоненті:

$$C_v = C_0 \exp\left(-\frac{vt}{l_{II}}\right) \varphi(r)$$

З урахуванням прийнятих припущень зміна концентрації зваженого пилу за рахунок деформації пилогазової хмари вентиляційним потоком, який виходить з кінця трубопроводу в привибійній частині виробки і витоків повітря по довжині виробки можна описати рівнянням турбулентної дифузії:

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} + v \frac{\partial c_v}{\partial x} + K_{ym} C = D_x \left(\frac{\partial^2 c_v}{\partial x^2} \right) + D_r \left(\frac{1}{r} \frac{\partial c_v}{\partial r} + \frac{\partial^2 c_v}{\partial r^2} \right)$$

з граничними умовами:

$$C_V(0, r, x) = C_0\varphi(r),$$

$$C_V(t, r, 0) = C_0 \exp\left(-\frac{\nu t}{l_T}\right)\varphi(r),$$

$$\frac{\partial C_V(t, R, x)}{\partial r} = 0,$$

де D_x – коефіцієнт поздовжньої дифузії, що враховує і молекулярну і турбулентну дифузію, а також нерівномірність поля швидкостей;

D_y – коефіцієнт поперечної дифузії;

K_{sum} – величина, що враховує зміну концентрації зваженого пилу за рахунок витоків повітря з вентиляційного трубопроводу

$$K_{sum} = \frac{(Q_\kappa - Q_n) \nu}{Q_n x},$$

де Q_n – кількість повітря, що надходить в привибійний простір, м³/с;

Q_κ – кількість повітря на початку гірничої виробки, м³/с;

x – поточна довжина виробки.

Для вирішення поставленого завдання застосований метод кінцевого інтегрального перетворення Ханкеля [31] у вигляді:

$$\bar{C}_V(t, \varepsilon, x) = \int_0^R r C_V(t, r, x) I_0(\varepsilon r) dr$$

з формулою звернення:

$$C_V(t, r, x) = \frac{r}{R^2} \bar{C}_V(t, 0, x) + \frac{r}{R^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{I_0(\varepsilon_i r)}{I_0^2(\varepsilon_i R)} \bar{C}_V(t, \varepsilon_i, x)$$

Після чого з рівняння виключалася змінна r . Крім того, використовувалося інтегральне перетворення Лапласа по змінній t у вигляді:

$$C_v(p, \varepsilon, x) = \int_0^{\infty} \exp(-pt) \overline{C_v}(t, \varepsilon, x) dt$$

За допомогою таблиць [32] виконано перехід до оригіналу по змінній t .

Після зазначених перетворень отримано рішення задачі в безрозмірній критеріальній формі:

$$\begin{aligned} \frac{C_v}{C_0} = & 2 \int_0^1 y \Phi(y) dy \cdot \exp(-bFo) + \int_0^1 y F(y) dy \cdot \exp(0,5 \cdot xPe - \theta Fo) \left\{ \exp\left(-\sqrt{0,25 \cdot Pe^2 + b - \theta} x\right) \times \right. \\ & \times \operatorname{erfc}\left[\frac{0,5 \cdot x}{\sqrt{Fo}} - \sqrt{(0,25 \cdot Pe^2 + b - \theta)Fo}\right] + \exp\left(\sqrt{0,25 \cdot Pe^2 + b - \theta} x\right) \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{0,5 \cdot x}{\sqrt{Fo}} + \sqrt{(0,25 \cdot Pe^2 + b - \theta)Fo}\right] \left. \right\} - \\ & - \int_0^1 y \Phi(y) dy \cdot \exp(-bFo) \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{0,5 \cdot x}{\sqrt{Fo}} - 0,5 \cdot Pe\sqrt{Fo}\right) + \exp(Pe x) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{0,5 \cdot x}{\sqrt{Fo}} + 0,5 \cdot Pe\sqrt{Fo}\right) \right] + \\ & + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{I_0(\mu_i y)}{I_0^2(\mu_i)} \left[\int_0^1 y F(y) I_0(\mu_i y) dy \cdot \exp(0,5 \cdot xPe - \theta Fo) \right] \left\{ \exp\left(-\sqrt{0,25 \cdot Pe^2 + b - \theta + K\mu_i^2} x\right) \times \right. \\ & \times \operatorname{erfc}\left[\frac{0,5 \cdot x}{\sqrt{Fo}} - \sqrt{(0,25 \cdot Pe^2 + b - \theta + K\mu_i^2)Fo}\right] + \exp\left(\sqrt{0,25 \cdot Pe^2 + b - \theta + K\mu_i^2} x\right) \times \\ & \times \operatorname{erfc}\left[\frac{0,5 \cdot x}{\sqrt{Fo}} + \sqrt{(0,25 \cdot Pe^2 + b - \theta + K\mu_i^2)Fo}\right] \left. \right\} - \exp[-(b + K\mu_i^2)Fo] \times \int_0^1 y \Phi(y) I_0(\mu_i y) dy \times \\ & \times \left\{ \operatorname{erfc}\left(\frac{0,5 \cdot x}{\sqrt{Fo}} - 0,5 \cdot Pe\sqrt{Fo}\right) + \exp(Pe x) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{0,5 \cdot x}{\sqrt{Fo}} + 0,5 \cdot Pe\sqrt{Fo}\right) \right\} + \\ & + 2 \int_0^1 y \Phi(y) I_0(\mu_i y) dy \cdot \exp[-(K\mu_i^2 + b)Fo] \end{aligned} \quad (2.13)$$

де Fo – дифузний критерій Фур'є, який характеризує зміну швидкості потоку дифундууючої маси пилу в часі;

Pe – дифузний критерій Пекле, який характеризує співвідношення між конвективним і молекулярним процесами перенесення домішок (кількості руху, характеристик турбулентності) в турбулентному дисперсному потоці (співвідношення конвекції і дифузії);

θ – величина, яка характеризує ступінь зміни концентрації зваженого пилу на ділянці $l_T - L_n$ залежно від активності вільного струменя, обумовленої величиною витрат повітря, яке виходить з кінця вентиляційного трубопроводу;

b – величина, яка характеризує ступінь зміни концентрації зваженого пилу за рахунок витоків повітря по довжині вентиляційного трубопроводу;

$$Fo = \frac{D_x t}{R^2}; Pe = \frac{\nu R}{D_x}; K = \frac{D_r}{D_x}; x = \frac{l_T - l_{II}}{R}; y = \frac{r}{R}; b = K_{\text{внт.}} \frac{R^2}{D_x}; \quad (2.14)$$

$$\theta = \frac{\nu R^2}{l_{II} D_x} \text{ или } \theta = \frac{Q_{\kappa} R^2}{Sl_{II} D_x}; \mu_i = \varepsilon_i R; \Phi(y) = \frac{\varphi(r)}{C_0}; F(y) = \frac{f(r)}{C_0}.$$

При відсутності шкідливих домішок в підготовчій гірничій виробці перед початком вибухових робіт $C(0, y, x) = \Phi(y) = 0$. Як показали експериментальні дослідження [28], зміна концентрації зваженого пилу по висоті виробки залишається практично незмінною, отже можна припустити, що потік турбулентної дифузії спрямований лише в напрямі осі x . Тоді $F(x) = 1$ і рішення (2.13) може бути представлено в такому вигляді:

$$C_v = C_0 \frac{1}{2} \exp\left(\frac{Pe}{2} x - \theta Fo\right) \left\{ \exp\left(-\sqrt{\frac{Pe^2}{4} + b - \theta x}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Fo}} - \sqrt{\left(\frac{Pe^2}{4} + b - \theta\right) Fo}\right] + \right. \\ \left. + \exp\left(\sqrt{\frac{Pe^2}{4} + b - \theta x}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Fo}} + \sqrt{\left(\frac{Pe^2}{4} + b - \theta\right) Fo}\right] \right\} \quad (2.15)$$

Величина b в виразах (2.13) і (2.14) визначається за формулою:

$$b = K_{\text{внт.}} \frac{R^2}{D_x} = \frac{(Q_{\kappa} - Q_n)}{Q_n} \frac{\nu R^2}{xD_x}$$

Початкову запиленість повітря C_o в межах зони викиду продуктів вибуху можна визначити за такою формулою [33]:

$$C_o = K_{II} l_w f \frac{K_c}{K_g}, \quad (2.16)$$

де K_{II} – коефіцієнт пропорційності ($K_{II} = 60$ для початкової максимальної запиленості та $K_{II} = 20$ – для середньої запиленості);

K_c – коефіцієнт, що залежить від способу підривання (при електропідриванні $K_c = 0,5$, при вогневому способі $K_c = 1,0$);

K_g – коефіцієнт, що залежить від обводнення порід і виробки (для сухого забою $K_g = 0,5$; для забою з вологими породами $K_g = 1,0-3,0$);

f – коефіцієнт міцності порід за шкалою проф. М.М. Протод'яконова;

l_w – середня довжина шпуру, м.

З урахуванням (2.16) вираз (2.15) прийме вигляд:

$$\begin{aligned} C_v = & K_{II} l_w f \frac{K_c}{K_g} \frac{1}{2} \exp\left(\frac{Pe}{2} x - \theta Fo\right) \times \left\{ \exp\left(-\sqrt{\frac{Pe^2}{4} + b - \theta x}\right) \times \right. \\ & \times \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Fo}} - \sqrt{\left(\frac{Pe^2}{4} + b - \theta\right) Fo}\right] + \exp\left(\sqrt{\frac{Pe^2}{4} + b - \theta x}\right) \times \\ & \left. \times \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{Fo}} + \sqrt{\left(\frac{Pe^2}{4} + b - \theta\right) Fo}\right] \right\} \end{aligned} \quad (2.17)$$

При підстановці в (2.17) значень раніше визначених параметрів (2.14), отримаємо:

$$A = \left(\frac{Pe}{2} x - \theta Fo\right) = v \left(\frac{l_T - l_{II}}{2D_x} - \frac{t}{l_{II}}\right),$$

$$B = \sqrt{\frac{Pe^2}{4} + b - \theta} x = \sqrt{\frac{\nu^2 R^2}{4D_x^2} + \frac{K_{\text{sum.}} R^2}{D_x} - \frac{\nu R}{D_x} \frac{l_T - l_{II}}{l_{II}}},$$

$$C = \frac{x}{2\sqrt{Fo}} = \frac{l_T - l_{II}}{2\sqrt{D_x t}},$$

$$D = \sqrt{\left(\frac{Pe^2}{4} + b - \theta\right) Fo} = \sqrt{\left(\frac{\nu^2 R^2}{4D_x^2} + \frac{K_{\text{sum.}} R^2}{D_x} - \frac{\nu R^2}{l_{II} D_x}\right) \frac{D_x t}{R^2}}$$

Таким чином:

$$\frac{C_V}{C_0} = \frac{1}{2} \exp A \left[\frac{\operatorname{erfc}(C - D)}{\exp B} + \exp B \cdot \operatorname{erfc}(C + D) \right]. \quad (2.18)$$

У розгорнутому вигляді вираз (2.18) має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{C_V}{C_0} = \frac{1}{2} \exp \left[\nu \left(\frac{l_T - l_{II}}{2D_x} - \frac{t}{l_{II}} \right) \right] & \left\{ \frac{\operatorname{erfc} \left[\frac{l_T - l_{II}}{2\sqrt{D_x t}} - \sqrt{\left(\frac{\nu^2 R^2}{4D_x^2} + \frac{(Q_H - Q_K) \nu R^3}{(l_T - l_{II}) Q_H D_x} - \frac{\nu R^2}{l_{II} D_x} \right) \frac{D_x t}{R^2}} \right]}{\exp \sqrt{\frac{\nu^2 R^2}{4D_x^2} + \frac{(Q_H - Q_K) \nu R^3}{(l_T - l_{II}) Q_H D_x} - \frac{\nu R}{D_x} \frac{l_T - l_{II}}{l_{II}}}} + \right. \\ & \left. + \exp \sqrt{\frac{\nu^2 R^2}{4D_x^2} + \frac{(Q_H - Q_K) \nu R^3}{(l_T - l_{II}) Q_H D_x} - \frac{\nu R}{D_x} \frac{l_T - l_{II}}{l_{II}}} \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{l_T - l_{II}}{2\sqrt{D_x t}} + \sqrt{\left(\frac{\nu^2 R^2}{4D_x^2} + \frac{(Q_H - Q_K) \nu R^3}{(l_T - l_{II}) Q_H D_x} - \frac{\nu R^2}{l_{II} D_x} \right) \frac{D_x t}{R^2}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Встановлено, що при миттєвому імпульсному утворенні пилу його концентрація при провітрюванні тупикових виробок змінюється як в часі, так і по довжині виробки [10], [34], [35]. Зміна концентрації пилу відбувається під впливом турбулентної дифузії газу, коефіцієнт якої визначається за виразом (2.11).

Довжина виробок, що проводяться буропідливним способом, може досягати 1000 м і більше.

Для вирішення задачі про поширення пилу під час вибуху необхідно знати її кількість, яка викидається від грудей забою виробки, а також її розподіл відповідно до дисперсного складу.

Кількість пилу N (г), що надходить в гірничу атмосферу виробки при підживанні шпурового заряду вибухової речовини, можна визначити за формулою [36]:

$$N = 1,5 \cdot 10^{-3} A^3 f \sqrt{\frac{S}{l_u}}$$

Довжину виробки L приймаємо рівною 400 м, а площу її поперечного перерізу $S = 9 \text{ м}^2$. Після вибуху виробка провітрюється з середньою швидкістю $v=0,25 \text{ м/с}$. При цьому витрата повітря, що подається по трубопроводу, становить: на початку трубопроводу $Q_n = 3,4 \text{ м}^3/\text{с}$; в його кінці $Q_n = 2,25 \text{ м}^3/\text{с}$. Загальні витрати повітря з трубопроводу складають $Q_{\text{вит.з.}} = 1,15 \text{ м}^3/\text{с}$.

Під час вибуху утворюється полідисперсний пил, який відкидається вибуховою хвилею на довжину зони викиду $l_{з.о.}$ (для умов шахт Донбасу визначається за формулою (2.1) і дорівнює 50 м).

Витрата повітря і швидкість повітряного потоку змінюються по довжині виробки в зв'язку з витратами з трубопроводу. Приймаємо, що ці витрати розосереджені по довжині виробки рівномірно, отже приріст швидкості на одиницю довжини буде також рівномірним, а рух пилогазової хмари буде рівноприскореним.

Результати розрахунків, виконаних у відповідності з отриманим виразом (2.19) з використанням наведених чисельних значень, наведено на рис. 2.5.

Аналіз графіків свідчить про високу концентрацію дрібнодисперсного пилу.

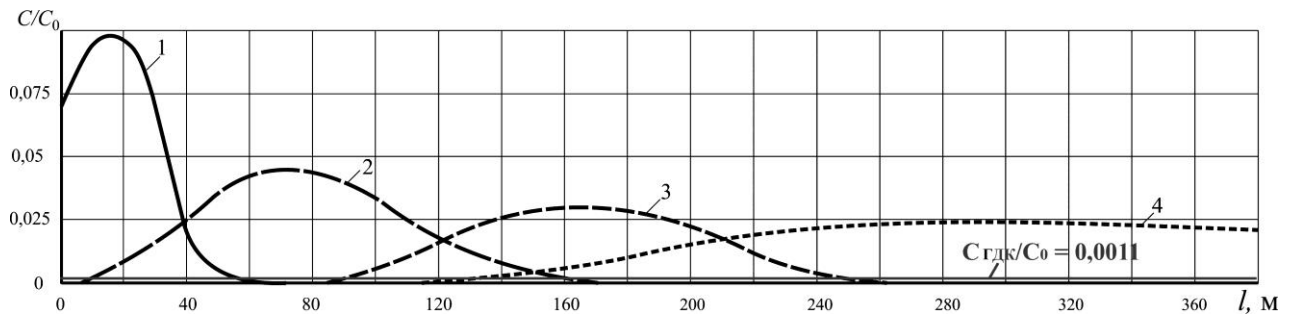


Рисунок 2.5 – Зміна відносної концентрації пилу по довжині тупикової виробки в задані моменти часу при провітрюванні: 1 – $t = 1$ хв; 2 – $t = 4$ хв; 3 – $t = 8$ хв; 4 – $t = 12$ хв

Оціночні розрахунки часу релаксації частинок пилу (τ_p) виконуються за відомою формулою [37]:

$$\tau_p = \frac{\rho_c d_c^2}{18\mu_c}, \quad (2.20)$$

де ρ_c – щільність частки, $\text{кг} / \text{м}^3$;

μ_c – динамічна в'язкість середовища, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

При щільності кварцових частинок $\rho_c = 2650 \text{ кг/м}^3$ і динамічної в'язкості повітря $\mu_c = 18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ розрахунки показують, що для дрібнодисперсних частинок пилу діаметром 10 мкм час релаксації τ_p складе $8,18 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, а для частинок розміром 5 мкм $2,045 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, тобто в 4 рази менше. При такій релаксації частинки розміром 10 мкм осідають через 112 м, а частинки розміром 5 мкм через 450 м. Це свідчить про те, що дрібнодисперсна фаза з частинок пилу розміром 5 мкм і менше проходить по всій довжині виробки до її устя і становить загрозу для здоров'я гірників, які працюють в даній виробці.

Концентрація пилу зменшується по довжині виробки (рис 2.6) за рахунок збільшення інтенсивності розрідження хмари витоками повітря [38].

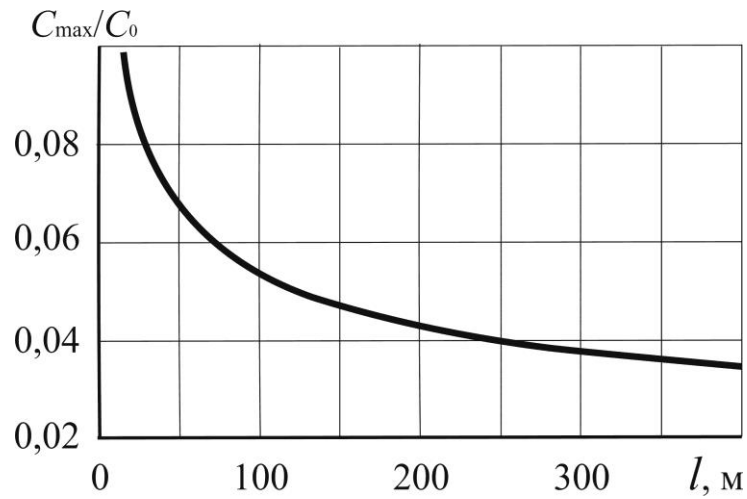


Рисунок 2.6 – Зміна концентрації пилу по довжині виробки

Збільшення швидкості повітряного струменя сприяє зниженню концентрації дрібнодисперсного пилу (рис. 2.7). Це пояснюється більш інтенсивним розчиненням пилу за рахунок витоків повітря, а також осадженням дрібнодисперсного пилу, так як турбулентність потоку зросла.

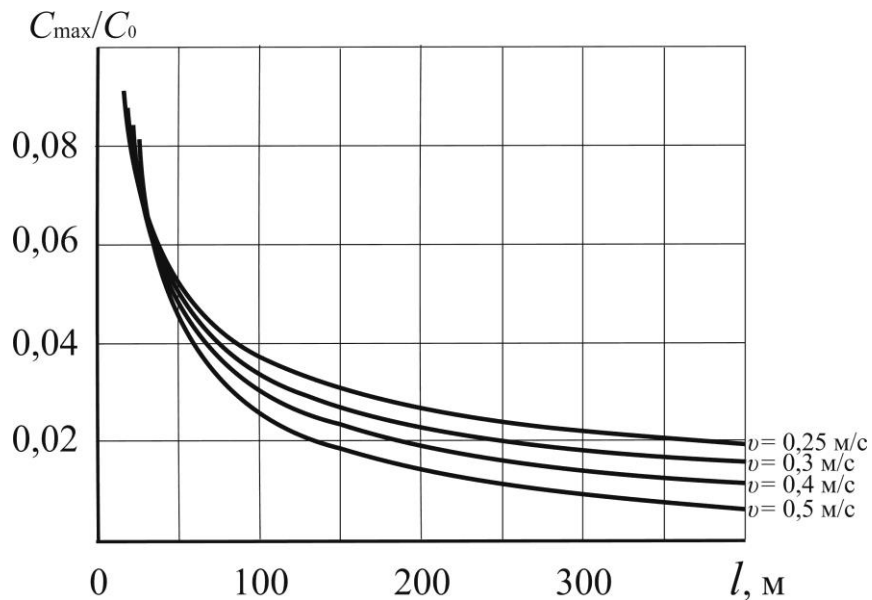


Рисунок 2.7 – Зміна максимальної концентрації пилу по довжині виробки при різних швидкостях руху повітря

2.3 Оцінка інтенсивності турбулентного осадження дрібнодисперсного пилу при русі пилової хмари в виробці

Одна з концепцій вільного інерційного руху частинок з турбулентного потоку до стінки зводиться до твердження, що в пристінній області турбулентного потоку має місце інерційний викид частинок з несучих турбулентних вихорів в напрямі стінки. Поблизу в'язкого підшару відбувається загасання турбулентності (за моделлю Ландау-Левича і у в'язкому підшару відбувається поступове згасання турбулентності), а зважені частинки в силу інерції продовжують свій шлях через в'язкий підшар аж до стінки [26].

Явище поперечної міграції частинок до поверхні каналу знаходиться в основі турбулентного - інерційного осадження [25]-[26], [39]. На підставі аналізу цього явища отримано відомий вираз для швидкості поперечного переміщення (турбулентної міграції) частинок [26]:

$$u_i = -\frac{1}{2} \tau_p \frac{dw^2}{dy}, \quad (2.21)$$

де w – швидкість поперечних пульсацій середовища, м/с;

y – поперечна координата, м.

Оціночні розрахунки [25] швидкості турбулентної міграції за формулою (2.21) з використанням емпіричних залежностей показують, що для дрібнодисперсних частинок, які повністю захоплюються турбулентними пульсаціями, при звичайних значеннях основних параметрів течії, прискорення в поперечному напрямі перевершує прискорення вільного падіння g від 3 до 3000 разів.

Отже, швидкість міграції може значно перевищувати швидкість гравітаційного осадження. Вираз (2.21) отримано в припущенні повного захоплення частинки турбулентними пульсаціями середовища.

В реальних умовах рух частинки складається з безлічі періодичних вільних інерційних пробігів частинки, здійснюваних нею в ході спільного руху з пульсаціями середовища з випадковою частотою і амплітудою швидкості, які в підсумку призводять до осадження частинки.

Турбулентна дифузія, що носить пульсаційний характер з безперервним зміною вектора і детермінованих сил з постійним напрямом і модулем (сили гравітаційного осадження, сили опору, аеродинамічні сили вентиляційного потоку), є одним з процесів, що надає істотний вплив на осадження дрібнодисперсного пилу з хмари.

Співвідношення зазначених сил різне для частинок різної маси, яке визначається її розміром і квазіщільністю (відношенням аеродинамічного активного об'єму частинки до її маси).

Також на співвідношення сил впливають швидкість повітряного потоку або перші похідні координат за часом [29].

У роботі [29] на підставі аналізу руху аерозолію під дією детермінованих сил отримано критерій для поділу фракцій в аерозолях на дві групи:

$$g^I = g - \frac{0,393 \cdot c_{\Pi} \rho_{\Pi} d_{\text{ч}}^2 v_{\text{возд.у}}^2}{m}, \text{ м/с}^2, \quad (2.22)$$

де c_{Π} – коефіцієнт підйомної сили;

ρ_{Π} – щільність повітря, кг/м³;

$v_{\text{пов.у}}$ – вертикальна складова швидкості повітря у виробці, м/с;

$d_{\text{ч}}$ – діаметр частинки, м;

m – маса матеріальної частинки.

Цей критерій встановлює співвідношення тільки між детермінованими силами і не змінюється при наявності сил дифузії. Частинки згідно (2.22) поділяються:

– на зважені, або турбулентно осаджені частинки, для яких сила ваги повністю компенсується аеродинамічними силами і прискорення вільного

падіння (g) менше або дорівнює прискоренню, яке надається частинці підйомними аеродинамічними силами. У цьому випадку (з урахуванням напрямку вектора швидкості осадження вниз) результуюче прискорення осадження частинок $g^1 < 0$;

- частинки, на осадження яких впливає сила гравітації ($g^1 > 0$);
- гравіметрично або турбулентно-гравіметрично осаджені фракції пилу.

У межах даної задачі визначення концентрації дрібнодисперсного зваженого пилу ($\leq 10\text{мкм}$) впливом детермінованих сил можна знехтувати без шкоди для точності. Тобто приймаємо, що дані фракції пилу є турбулентно осаджуваними частинками, для яких сила ваги повністю компенсується аеродинамічними силами. і прискорення вільного падіння менше або дорівнює прискоренню, яке надається частинці підйомними аеродинамічними силами.

Турбулентна дифузія призводить до безперервного обміну частинками між елементарними об'ємами повітря, тому координата Y для довільної частинки може імпульсивно змінитися як в сторону зменшення, так і в бік збільшення [29].

Інтегрально дію сил турбулентної дифузії направлено на вирівнювання концентрації домішок в умовному об'ємі повітря, при цьому частинки дрібних фракцій пилу розподіляються практично рівномірно по перерізу виробки.

Експериментальні дані [29] з деталізованим пофракційним аналізом процесів осадження пилу вказують на те, що маса осадженого пилу (зважених фракцій) прямо пропорційна швидкості повітря.

У цьому випадку зростає амплітуда турбулентних пульсацій, об'єм тонкого пилу, який виноситься в «осаджувальну» область, збільшується.

Сили зчеплення частинок з поверхнею (в діапазоні $v_{\text{пов}} < v_{\text{кр}}$) достатні для утримання турбулентно осаджених частинок, тому тонкі фракції, керовані тільки силами дифузії, осідають більш інтенсивно зі зростанням швидкості повітря.

Для турбулентно осаджених фракцій пилю зміна концентрації в диференціальній формі по довжині описується рівнянням [29]:

$$\frac{dC_T}{C_T} = (-k v_x) dx, \quad (2.23)$$

де k – відношення маси зваженого монодисперсного пилю в розглянутому елементарному об'ємі виробки до маси осадженого пилю на одиниці площі;

C_T – зміна концентрації зваженого пилю по довжині виробки обумовлене явищем турбулентної дифузії, мг/м³.

Рішення рівняння (2.23) для двох довільних перерізів, віднесених на відстань Δx з урахуванням відомої концентрації в початковій точці C_0 , дає залежність зміни концентрації фракцій аерозолу, схильних до процесів тільки турбулентного осадження [29]:

$$C_T(x) = C_0 \exp(-k \Delta x v_x), \quad (2.24)$$

де C_0 – концентрація пилю в привибійній зоні, мг/м³.

Рівняння (2.24) визначає процес убування концентрації монодисперсного аерозолу, що знаходиться у зваженому стані, тобто коли $g' < 0$ для розглянутих розмірів частинок. При цьому k є деяким інтегральним кореляційним коефіцієнтом, що враховує геометричні параметри виробки (діючі на потік повітря) і властивості дисперсійного середовища і дисперсних фаз. Цей коефіцієнт характеризує ступінь зниження концентрації дрібнодисперсного пилю на ділянці (Δx) виробки [29].

На підставі (2.24) можна зробити висновок, що величина, зворотна k , це ділянка виробки Δx , на якій концентрація пилю впаде в e раз.

Якщо уявити хаотичний рух частинок в турбулентному потоці повітря як дифузійний рух аерозолу, частинки якого мають меншу рухливість в K_d раз,

ніж частинки повітря, то для таких частинок можливе використання закону Фіка в формі гіпотези Буссінеска для щільності потоку частинок [25]:

$$j = -D_d \frac{dC}{dx},$$

а рівняння конвективного масопереносу частинок:

$$u_x \frac{dC}{dx} + u_y \frac{dC}{dy} + u_z \frac{dC}{dz} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_d \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_d \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_d \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (2.25)$$

з заміною коефіцієнта турбулентного обміну в газовій фазі D_T на коефіцієнт турбулентної дифузії частинок [25]:

$$D_d = K_d^2 D_T = \frac{1}{1 + \omega_E \tau_p} D_T,$$

де ω_E – частота енергоємних пульсацій, с^{-1} ;

C – концентрація частинок;

u_x, u_y, u_z – швидкості руху суцільної фази уздовж координат x, y і z відповідно.

Час релаксації визначається з виразу (2.20). Частоту енергоємних пульсацій можна визначити з виразу [25]:

$$\omega_E = \frac{u_*}{0,05 \cdot d_e}, \quad (2.26)$$

де u_* – динамічна швидкість тертя, м/с ;

d_e – еквівалентний діаметр каналу (виробки), м .

При вході в гірничу виробку вентиляційного потоку повітря з концентрацією дрібнодисперсної фази C_n і подальшому його русі відбувається

міграція до стінки дисперсної фази за рахунок різних механізмів. Так, довжина виробки на кілька порядків більше її діаметра, то можна звести тривимірну задачу (2.25) до одновимірної і розглядати зміну концентрацій частинок тільки по горизонтальній координаті OX , тобто від входу суміші до виходу. Тоді рівняння (2.25) прийме вигляд [25]:

$$u_x \frac{dC}{dx} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_d \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Частку осілих слабо інерційних частинок можна висловити величиною ефективності турбулентного осадження [25]:

$$n_t = 1 - \exp \left(-4 \frac{Lu_t}{d_s u_{сep}} \right), \quad (2.27)$$

де L – довжина гірничої виробки, м;

u_t – швидкість турбулентного осадження частинок ($u_t = \beta_d$), м/с;

$u_{сep}$ – середня швидкість газу в каналі, м/с.

Швидкість міграції u_t характеризує інтенсивність осадження частинок з турбулентного потоку на стінку каналу [26]:

$$u_t = j/c \text{ або } j = u_t c,$$

де j – питомий потік частинок до стінки, кг/(м²с);

c – середня за поперечним перерізом концентрація частинок, кг/м³.

Вираз $j = u_t c$ є аналогом рівняння масовіддачі [39]:

$$j = \beta \Delta c,$$

де β – коефіцієнт масовіддачі, м/с;

Δc – рушійна сила масовіддачі (різниця концентрацій в ядрі потоку та на поверхні).

Звідси випливає, що $u_t = \beta_d$ для процесу осадження дрібнодисперсних частинок.

Для розрахунку u_t (β_d) можна використовувати узагальнений вираз [25]:

$$u_t = 7,25 \cdot 10^{-4} u_* \left(\frac{\tau_+}{1 + \omega_E \tau_p} \right)^2, \quad (2.28)$$

де u_* – динамічна швидкість тертя, м/с;

τ_+ – безрозмірний час релаксації, $\tau_+ = \tau_p u_*^2 / \nu_\Gamma$;

ν_Γ – коефіцієнт кінематичної в'язкості газу, м²/с;

f – частота турбулентних пульсацій середовища, с⁻¹.

Для гірничої виробки динамічну швидкість можна визначити з рівняння балансу сил [40] $\Delta p S = \tau_{ст} F$:

$$u_* = \sqrt{\frac{\Delta p S}{\rho F}}, \quad (2.29)$$

де Δp – перепад тиску на ділянці виробки;

S – площа поперечного перерізу виробки, м²;

F – поверхня виробки, м²;

Δp записано в формі вираження Дарсі-Вейсбаха.

З урахуванням (2.26), (2.28), (2.29) і того, що $\tau_+ = \tau_p / \nu_\Gamma$, вираз (2.27) набуде вигляду:

$$n_t = 1 - \exp \left\{ -2,9 \cdot 10^{-3} \frac{L}{d_e u_{cep}} \left[\frac{\tau_p}{\left(1 + 20 \frac{\tau_p}{d_e} \sqrt{\frac{\Delta p S}{\rho F}} \right) \nu_\Gamma} \right]^2 \left(\frac{\Delta p S}{\rho F} \right)^{2,5} \right\}$$

З урахуванням (2.20):

$$n_t = 1 - \exp \left\{ -2,9 \cdot 10^{-3} \frac{L}{d_e u_{\text{сеп}}} \left[\frac{d_q^2}{18 \cdot \left(1 + 1,1 \cdot \frac{d_q^2}{d_e v_{\Gamma}} \sqrt{\frac{\Delta p S}{\rho F}} \right) v_{\Gamma}^2} \right]^2 \left(\frac{\Delta p S}{\rho F} \right)^{2,5} \right\} \quad (2.30)$$

Для стандартних умов густина повітря дорівнює $\rho_0 = 1,2 \text{ кг/м}^3$, а кінематична в'язкість повітря дорівнює $\nu = 14,91 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, тому вираз (2.30) можна записати у вигляді:

$$n_t = 1 - \exp \left\{ -1,84 \cdot 10^{-3} \frac{L}{d_e u_{\text{сеп}}} \left[\frac{d_q^2}{0,4 \cdot 10^{-8} \cdot \left(1 + 68,03 \cdot 10^3 \cdot \frac{d_q^2}{d_e} \sqrt{\frac{\Delta p S}{F}} \right)} \right]^2 \left(\frac{\Delta p S}{F} \right)^{2,5} \right\} \quad (2.31)$$

З отриманого виразу (2.31) видно, що основними чинниками, які впливають на осадження дрібнодисперсного пилу при поширенні пилової хмари, є геометричні параметри гірничої виробки (L , S , F і d_e) і аеродинамічні параметри вентиляційного потоку (Δp , $u_{\text{сеп}}$).

Розрахунки, зроблені за отриманим виразом (2.31), при значеннях параметрів $S = 9 \text{ м}$; $L = 400 \text{ м}$; $\Delta p = 500 \text{ Па}$; $u_{\text{сеп}} = 0,4 \text{ м/с}$ для дрібнодисперсного пилу $d < 10 \text{ мкм}$, свідчать про те, що частка осадженого дрібнодисперсного пилу по всій довжині тупикової виробки не перевищує 3,5% на 100 п.м виробки. З цього можна зробити висновок, що фактору турбулентного осадження дрібнодисперсного пилу розміром менше 10 мкм значно не впливає на зміну концентрації пилу даної фракції по довжині підготовчої тупикової виробки.

2.4 Вплив турбулентної коагуляції на величину концентрації дрібнодисперсного пилю

На процес осадження дрібнодисперсного пилю надає також вплив процес коагуляції дрібнодисперсних частинок, який відбувається в турбулентному пилогазовому потоці. Броунівська коагуляція відіграє значну роль лише для субмікронних частинок з радіусом менше десятих частинок мікрона. Для більш великих частинок її частка мала і не виходить за межі похибки досліду, тому її не завжди враховують [41]–[42].

Турбулентна коагуляція залежить також від рівня турбулентності потоку. Встановлено [37], [42], що для частинок радіусом 0,1 мкм ефект турбулентної коагуляції дуже малий, а при $r = 10$ мкм дуже великий.

При розвиненому турбулентному русі повітря, яке є характерним для гірничих виробок, швидкості потоку в даній точці простору представляють як [42]:

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad \omega = \bar{\omega} + \omega'.$$

де u, v, ω – миттєві значення швидкості потоку в даній точці, м/с;

$\bar{u}, \bar{v}, \bar{\omega}$ – осереднені в часі швидкості, м/с;

u', v', ω' – відхилення дійсних швидкостей від усереднених (пульсаційна швидкість або пульсації), м/с.

Узагальнюючою величиною, що характеризує такі потоки, є ступінь турбулентності, яка визначається як:

$$\varepsilon = \sqrt{(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2) / 3},$$

де $\varepsilon_x = \sqrt{u'^2} / \bar{u}$, $\varepsilon_y = \sqrt{v'^2} / \bar{v}$, $\varepsilon_z = \sqrt{\omega'^2} / \bar{\omega}$ – інтенсивності турбулентності у відповідних напрямках.

Величина прискорення потоків при турбулентному русі повітря залежить від величини пульсаційної швидкості і частотних характеристик пульсацій. Спрощено, при дослідженнях турбулентних потоків [43] вважають, що пульсаційна швидкість змінюється за гармонійним законом і визначається як:

$$u' = u'_a \cos 2\pi f t, \quad (2.32)$$

де u'_a – амплітуда пульсаційної швидкості, м/с;

f – частота коливань, с⁻¹.

При обтіканні повітряним потоком різних тіл частота коливань залежить від швидкості потоку, його в'язкості і геометричних розмірів цих тіл [44], наприклад розмірів елементів кріплення. При обтіканні тіла циліндричної форми цей зв'язок виражається через число Струхалія:

$$\text{Sh} = \frac{fd}{u},$$

де d – діаметр тіла, м.

При обтіканні тіл іншої форми число Струхалія може бути розраховане через приведений діаметр тіла [45].

З огляду на те, що при великих числах Рейнольдса число Струхалія прагне до $\text{Sh} = 0,2$ [43], частота коливань при обтіканні тіла діаметром d складе:

$$f = 0,2u / d \quad (2.33)$$

При величині пульсаційної швидкості рівній $0,1u$ її амплітуда складе $0,144u$. В такому випадку, виходячи з рівнянь (2.32) і (2.33), прискорення потоку дорівнюватиме:

$$a = \frac{du'}{dt} = 0,0576 \frac{\pi u^2}{d} \sin \frac{0,4\pi ut}{d}. \quad (2.34)$$

З використанням виразу (2.34) можна розрахувати амплітудне значення величини прискорення потоку, викликаного турбулентними пульсаціями при розмірі елементів кріплення $d = 0,2$ м. Так, при швидкості пилогазового потоку $u = 4$ м/с прискорення складуть $14,5$ м/с² при частоті коливань 4 с⁻¹.

Рівняння руху частинок пилу в загальному випадку можна описати векторним рівнянням типу [37]:

$$m \frac{d\bar{V}}{dt} = \sum \bar{F} \quad (2.35)$$

$$\sum \bar{F} = \bar{F}_{oc} + \bar{F}_g + \bar{F}_{zim} + \bar{F}_z,$$

де $\bar{F}_{oc} = k(\bar{U} - \bar{V})^\beta$ – сила опору середовища, що визначається параметрами середовища і частинок та швидкістю останньої по відношенню до середовища, H ;

$k = 6\pi\eta\rho$ – коефіцієнт пропорційності;

β – показник ступеня, що залежить від числа Рейнольдса;

η – в'язкість середовища;

U – швидкість потоку газу в місці знаходження частинок, м/с;

V – швидкість частинки пилу, м/с;

$\bar{F}_g = mg$ – гравітаційна сила, H ;

\bar{F}_{zim} – сила взаємодії частинок при їх зіткненнях, H ;

\bar{F}_z – сила гідродинамічного впливу частинок, H .

Число Рейнольдса для частинок пилу [37] визначається при цьому як:

$$R = \frac{\alpha \rho \gamma_c (\bar{U} - \bar{V})}{\eta},$$

де γ_c – щільність середовища, кг/м^3 .

При невеликих швидкостях руху частинок по відношенню до середовища, в межах $10^{-6} < \rho < 10^{-4}$ м рух частинок аерозолію протікає відповідно до закону Стокса і тому можна з достатнім ступенем точності прийняти $\beta = 1$ [37].

Розглядаючи процеси коагуляції аерозольних частинок в турбулентному потоці, гравітаційною силою, силою взаємодії частинок при їх зіткненнях і силою гідродинамічного впливу частинок можна знехтувати внаслідок їх малості в порівнянні з силою опору середовища. Тоді при одnobічному русі частинок і середовища в діапазоні розмірів частинок $10^{-6} < \rho < 10^{-4}$ м рівняння руху (2.35) можна записати у вигляді:

$$m \frac{dV}{dt} = 6\pi\eta\rho(U - V).$$

Рішення рівняння (2.35) для частинок сферичної форми щільністю γ_c в такому випадку має вигляд:

$$V = U \left[1 - \exp\left(-\frac{9\eta}{2\rho^2\gamma_c} t\right) \right]. \quad (2.36)$$

Числовий аналіз виразу (2.36) показує, що швидкість частинок аерозолію з $\rho < 2 \cdot 10^{-6}$ м, практично збігається зі швидкістю газового потоку. Тому в турбулентному потоці вони крім поступального руху по гірничій виробці будуть здійснювати коливальний рух, швидкість якого змінюється за

гармонійним законом і буде практично відповідати пульсаційній швидкості газового потоку (2.32). Частинки більшого розміру в силу їх інерційних властивостей в період гармонійних коливань, коли швидкість потоку в даній точці середовища зростає, рухаються повільніше, ніж дрібнодисперсні частинки, і, навпаки, в період гармонійних коливань, коли швидкість потоку в даній точці середовища зменшується - швидше, ніж дрібнодисперсні частинки. Відповідно амплітуда переміщень дрібнодисперсних і великих частинок аерозолу під впливом пульсаційної швидкості в турбулентних потоках буде істотно відрізнятися, а це в свою чергу сприяє періодичному зближенню дрібних і великих частинок аерозолу і їх коагуляції.

Теорія процесу броунівської коагуляції багато в чому схожа з теорією турбулентної коагуляції.

В обох випадках відносний рух частинок є по суті випадковим. Тому для випадку турбулентної коагуляції може бути застосовано вираз, отриманий Смолуховським на основі броунівського руху і Левичем [42], які вирішили цю задачу для випадку руху частинок під впливом турбулентних пульсацій:

$$n = \frac{n_0}{1 + Kn_0t}, \quad (2.37)$$

де K – константа швидкості коагуляції, $\text{м}^3/\text{с}$;

n – концентрація частинок в деякий момент часу t (кількість частинок в одиниці об'єму), $1/\text{м}^3$;

n_0 – початкова концентрація частинок, $1/\text{м}^3$.

При турбулентному русі газового потоку вирішальну роль в зустрічі частинок грають турбулентні пульсації. У турбулентному потоці можливі два механізми коагуляції. Перший реалізується при повному захопленні частинок аерозолу турбулентними пульсаціями. Цей механізм має переважне поширення при густині частинок, яка мало відрізняється від густини потоку. У разі аерозольних частинок, густина яких приблизно в 10^3 рази більше густини газів,

повного захоплення частинок не відбувається. Тому для аерозольних частинок цей механізм має другорядне значення. Найбільший коагуляційний ефект в турбулентному газопиловому потоці здійснюється завдяки другому механізму, який отримав назву механізм прискорення [46].

Коагуляція за рахунок механізму прискорення здійснюється завдяки розбіжності в густині газового потоку і частинок аерозолю [46]. Швидкості, придбані частинками, залежать від їх маси і мають суттєву різницю в полідисперсних системах. Завдяки відмінності в швидкостях руху частинок і відбувається зустріч цих частинок, що супроводжуються їх коагуляцією.

Швидкість турбулентної коагуляції за рахунок механізму прискорення визначається за формулою [46]:

$$N_{\text{уск}} = \pi \frac{\rho_q}{\rho_g} n_0^2 \frac{\varepsilon_T^{0,75}}{\nu_g^{1,25}} \beta d_q^4, \quad (2.38)$$

де β – коефіцієнт, що характеризує розподіл частинок за розмірами;

ρ_g – густина газу, кг/м³;

ε_T – величина, що характеризує турбулентний потік, м²/с³;

ν_g – кінематична в'язкість газу, м²/с.

З урахуванням того, що швидкість коагуляції в турбулентному потоці визначається механізмом прискорення, підставимо вираз (2.37) у вираз (2.38) замість K і отримаємо формулу для визначення концентрації дрібнодисперсного пилу в турбулентному потоці з урахуванням її коагуляції.

$$n = \frac{n_0}{1 + \pi \frac{\rho_q}{\rho_g} n_0^3 \frac{\varepsilon_T^{0,75}}{\nu_g^{1,25}} \beta d_q^4 t}, \quad 1/\text{м}^3 \quad (2.39)$$

Зазвичай ε_T становить 10² і більше [46]. При $\varepsilon_T = 100$ м²/с³ в газовому потоці $N_T > N_{\text{бр}}$ для частинок, розмір яких перевищує 0,1 мкм. Коагуляція ж

частинок з $d_{\text{ч}} \leq 0,1$ мкм визначається броунівською дифузією. Значення параметра β за даними досліджень [23], виконаних для гірничих виробок вугільних шахт, можна приймати рівним $\beta = 0,6885$. Таким чином, з урахуванням вищезазначеного, вираз (2.39) має вигляд:

$$n = \frac{n_0}{1 + 32,632 \cdot 10^3 \cdot n_0^3 d_{\text{ч}}^4 t}, 1/\text{м}^3. \quad (2.40)$$

Висловивши залежність (2.40) через довжину виробки отримаємо вираз для визначення лічильної концентрації частинок в газі на відстані l у вигляді:

$$n = \frac{n_0}{1 + 32,632 \cdot 10^3 \cdot \frac{n_0^3 d_{\text{ч}}^4 l}{\nu}}, 1/\text{м}^3.$$

Знаючи лічильну концентрацію аерозольних частинок, можна визначити масову концентрацію за формулою:

$$C = 5,23 \cdot 10^{-15} \cdot \rho_{\text{ч}} \frac{n_1 d_{\text{ч}1}^3 + n_2 d_{\text{ч}2}^3 + \dots + n_n d_{\text{ч}n}^3}{V}, \text{мг}/\text{м}^3$$

де V – об'єм повітря, м^3 ;

$n_1, n_2 \dots n_n$ – кількість частинок певного розміру;

$d_{\text{ч}1}, d_{\text{ч}2} \dots d_{\text{ч}n}$ – діаметр частинок певного розміру.

Висновки за розділом 2

У результаті теоретичних досліджень отримано спільне рішення задачі щодо просторово-часового розподілу дрібнодисперсного пилу в тупиковій гірничій виробці. Розглянуто конкретні приклади поширення дрібнодисперсного пилу після вибуху, що дозволяє застосувати кількісний

підхід і з високим ступенем об'єктивності оцінювати ризики виникнення професійних захворювань, порівнювати їх з нормативними і, за необхідності, вживати заходи щодо їх зниження як на стадії проєктних робіт, так і для умов діючого виробництва.

Розроблено математичну модель турбулентного переносу дрібнодисперсного пилу, що відрізняється від відомих тим, що враховує вплив деформації пилової хмари на величину концентрації пилу по довжині виробки, яка проводиться буропідричним способом, і може бути використана для обґрунтування ефективності способів і засобів зниження концентрації пилу при виконанні вибухових робіт.

У результаті теоретичного аналізу процесу турбулентної міграції дрібнодисперсних частинок отримані розрахункові рівняння, що дозволяють визначати концентрацію пилу на будь-якій відстані від миттєвого (імпульсного) джерела пилоутворення залежно від параметрів вибуху, петрографічного складу вуглепородного масиву і умов провітрювання підготовчої тупикової виробки.

На підставі теорії турбулентно-інерційного осадження дрібнодисперсної твердої фази з двофазних газодисперсних систем і явища поперечної міграції частинок до поверхні каналу, отримано вираз для оцінки частки слабо інерційних дрібнодисперсних частинок, які осіли, що дозволяє визначити величину ефективності турбулентного осадження частинок пилу при русі пилової хмари в гірничій виробці після проведення вибухових робіт у привибійній зоні тупикової виробки.

На підставі кінетики коагуляції в турбулентному потоці, яка встановлюється механізмом прискорення, отримано вираз для визначення концентрації дрібнодисперсного пилу в турбулентному потоці з урахуванням її коагуляції.

Таким чином, в результаті виконаних досліджень встановлено, що утворений дрібнодисперсний пил при виконанні вибухових робіт в тупиковій виробці, поширюючись по ній під дією аеродинамічних сил вентиляційного

поток, частково осідає по довжині виробки, за рахунок явища поперечної міграції частинок пилу до поверхні виробки і процесу турбулентної коагуляції частинок. При цьому ефективність осадження частинок за рахунок цих явищ, для умов провітрювання тупикових виробок, знаходиться на рівні 3,5% на 100 п.м виробки. Однак зазначені фактори істотно не впливають на стан рудникової атмосфери в період проведення підривних робіт, в результаті чого газопилова хмара, при поширенні її по всій довжині виробки, містить в своєму складі дрібнодисперсну фазу, що несе загрозу для здоров'я гірників, які працюють в даній виробці і в прилеглих сусідніх виробках шахтної вентиляційної мережі.

У зв'язку з вищевказаним виникає необхідність в розробці способів і засобів зниження кількості утворення дрібнодисперсної фази пилу при виконанні вибухових робіт.

Список використаних джерел в розділі 2

1. Михайлов В.А. Боротьба з пилом і отруйними газами при БПР в кар'єрах / В.А. Михайлов, П.В. Бересневич та ін .– Опубл. Надра, 1971. – 184 с.
2. Петрунін Г.О. Обґрунтування параметрів вентиляції та пиловловлювання в підготовчих виробках при проведенні БПР. дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: спец. 26.05.01 "Охорона праці" / Г.О. Петрунін – 2009. – 24 с.
3. Шевцов Н.Р. Руйнування гірських порід вибухом / Н.Р. Шевцов, П.Ю. Таранов, В.В. Левіт, А.Г. Гудзь .– Донецьк: ДонНТУ, 2003. – 253 с.
4. Єфремов Є.І. Проблеми екології масових вибухів у кар'єрах / [Є.І. Єфремов, П.В. Бересневич, В.П. Мартиненко, В.І. Борисов]. – Дніпропетровськ: Січ, 1996. – 177 с.
5. Про вплив фракційного складу кварцовмісних порід на вміст силікозонебезпечного пилу в продуктах їх руйнування / Є.І. Єфремов,

В.Д. Петренко, В.С. Шевченко [та ін.] // Доп. АН України. – 1993.– №5. – С. 45–49.

6. Голінко В.І. Вплив поверхнево-активних речовин на дисперсність кварцового пилу при вибуховому руйнуванні вугільнопородного масиву / В.І. Голінко, Д.В. Савельєв, Я.Ю. Лебедєв // Розробка родовищ- 2014: щорічний науково-технічний збірник ДВНЗ "НГУ" – Д.: ТОВ Лізунов Прес, 2014. – С.431-434.

7. Кратковський І.Л. Ступінь орієнтації дефектів у структурі кристалічних порід та характер їх руйнування під дією навантажень [текст]. Зб. наук. пр. "Геотехнічна механіка" / І.Л. Кратковський. – Дніпропетровськ : ІГТМ НАН України, 2003. –Том. 42. – С. 115-122.

8. Єфремов Є.І. Експериментальні результати руйнування полімінеральних середовищ при вибуховому та механічному впливі. Конф. "Високоенергетична обробка матеріалів" / Є.І. Єфремов, В.Д. Петренко, І.Л. Кратковський, В.В. Шеленок. – Дніпропетровськ, 1995. – С. 44-49.

9. Дьяков В.В., Ковальов В.І. Протипилові режими вентиляції в шахтах / В.В. Дьяков, В.І. Ковальов – Опубл. Надра, 1984. – 200 с.

10. Ярембаш І.Ф. Очищення рудничної атмосфери після вибухових робіт. Опубл. Надра, 1979. – – 191 с.

11. Ярембаш І.Ф. Визначення довжини зони відходів при вибухонебезпечних роботах у підготовчих виробках / І.Ф. Ярембаш // – Проектування та будівництво вугільних підприємств. ЦНІЕІвугілля. 1966. №12. – С. 44 – 45.

12. Бахтін В.В. Дослідження деяких параметрів вентиляції та очищення шахтної атмосфери після вибухових робіт: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: спец. 05.26.01 «Охорона праці» / В.В. Бахтін – Донецьк, 1971. – 24 с.

13. Визначення довжини зони газоподібних продуктів / В.Ю. Балтайтис, В.С. Сергєєв, І.Ф. Ярембаш та ін // Безпека найважливіших робіт у вугільних шахтах.- МакНІІ. 1971. – С. 91 – 97.

14. Кузьмічов В.Є. Опубл. Законд, 1989. – 864 с.
15. Бородін А.І. Лекції з технічної термодинаміки : Навчальний посібник А.І. Бородіна, 2007. 160 с.
16. Воронін В.М. Основи рудничної аерогазодинаміки / В.Н. Воронін – Опубл. Вуглетехвидав, 1951. – 490 с.
17. Математичне моделювання динамічних явищ у сумішах газових і твердих частинок / [А.В. Федоров, Н.М. Федорченко, І.А. Федорченко та ін.] // Інститут теоретичної та прикладної механіки. 2. 2001. – 36 с.
18. А.В. Федоров, Н.Н. Федорова, І.А. Федорченко – Інститут теоретичної та прикладної механіки АН. – Том 6, ч. 2, спецвипуск – 2001. – С. 642 – 649.
19. Гостєєв Ю.А. Про розрахунок підйому пилу попутною ударною хвилею / Ю.А. Гостєєв, А.В. Федоров Фізика горіння і вибуху. 2002. Т. 38, №3. Р. 80-84.
20. Гостєєв Ю.А. Гостєєв Ю.А., Федоров А.В. Фізика горіння та вибуху. 2003. Т. 39, №2. – Р. 67-74.
21. Поздняков Г.А., Петрунін Г.О. Динаміка концентрації пилогазових аерозолів у довгих тупикових виробках, що ведуться буровим та вибуховим методом // Гірничий інформаційно-аналітичний вісник. Окремий випуск №12. – 2007. – С. 296-302.
22. Ушаков К. З. Газова динаміка шахт. – Опубл. МДУ, 2004. – 481 с.
23. Ксенофонтова А.І., Бурчаков А.С. Теорія і практика боротьби з пилом у вугільних шахтах. Опубл. Надра, 1965. – 227 с.
24. Лаптєв А.Г., Фарахов Т.М. Моделі турбулентного транспорту та масопереносу дисперсної фази в рідинах / Global Journal of Researches in Engineering © Chemical Engineering Volume 14 Issue 2 Version 1.0 Year 2014 Type: Double Blind Peer Reviewed International Research Journal Publisher: Global Journals Inc. (USA) Online ISSN: 2249-4596 & Print ISSN: 0975-5861
25. Медніков Е.П. Турбулентне перенесення і осадження аерозолів / Є.П. Медніков – Опубл. Наука, 1981. – 174 с.

26. Лаптев А.Г. Явища турбулентного транспорту дрібнодисперсних частинок у рідкій фазі динамічних сепараторів. / Науковий вісник КГАУ, 2011. – №68(04) / <http://ej.kubagro.ru/2011/04/pdf/43.pdf>.

27. Лаптев А.Г., Фарахов М.І., Мінєєв Н.Г. Поділ різнорідних систем у насадочних апаратах / А.Г. Лаптев, М.І. Фарахов, Н.Г. Мінєєв –Державний енергетичний університет, 2006. – 342 с.

28. Недін В.В. Боротьба з пилом в шахтах / В.В. Недін, О.Д. Нейков, Опубл. Надра, 1965. – 223 с.

29. Динаміка пилу у вугільних шахтах / С.Б. Романченко, Ю.В. Савченко – «Гірнична справа», ТОВ «Кіммерійський центр», 2011. – – 256 с.

30. Impurity concentration test while moving highly dispersive systems / V. Golinko, D. Saveliev, Y. Lebedev & T. Morozova // Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining. – Netherlands: CRC Press / Balkema, 2014. – pp. 131-136.

31. Пікулін В.П., Похожаєв С.І., 2-ге вид., Практичний курс з рівнянь математичної фізики. 2004. – 208 с.

32. Діткін В.А. Довідник з оперативного числення / В.А. Діткін, А.Я. Прудников – Вища школа, 1965. – 159 с.

33. Янов А.П. Захист шахтної атмосфери від забруднення / А.П. Янов, В.С. Ващенко – Опубл. Надра, 1977. – 78 с.

34. Савенко С.К., Морозов Є.Г., Бережний В.І. Аерогазодинаміка масових вибухів у шахтах. – Опубл. Надра, 1976. – 184 с.

35. Голишев А.М., Серебренніков О.В., Давидов А.В., Піщикова Є.В. Розподіл шкідливих газів у тупиковій гірничій виробці // Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць ДВНЗ «Криворізький національний університет» вип. 33, 2012. – С. 225-228.

36. Воронін В.М. Керівництво з проектування і практичної реалізації протипилових режимів вентиляції в шахтах / В.Н. Воронін, Л.Д. Вороніна, А.Д. Багриновський. Укрінформ., 1960. – 47 с.

37. Фукс Н.А. Механіка аерозолів / Н.А. Фукс – Опубл. АН, 1955. – 351 с.

38. Савельєв Д.В. Утворення та розподіл високодисперсних пилових аерозолів у гірничих виробках при проведенні БПР. // Вісті Дон. гірн. інст. Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю. – 2014. – №1(34) – 2(35). – С. 117-124.

39. Медніков Є.П. Міграційна теорія осадження частинок аерозолію з турбулентного потоку на стінках труб і каналів / Є.П. Медніков // Опубл. АН, т.206, №1. – 1972– С. 51-54.

40. Лаптев, А.Г. Математичні моделі та розрахунок гідродинамічних характеристик прикордонного шару / А.Г. Лаптев, М.І. Фарахов // Науковий вісник САУ – 2012. – №82(08). – С. 1-35.

41. Белоусов В.В. Теоретичні основи газоочисних процесів, 1988. – 256 с.

42. Левич В.Г. Фізико-хімічна гідродинаміка / В.Г. Левич – М: Державне видавництво фізико-математичної літератури, 1959.–699 с.

43. Лойцянский І.Г. Механіка рідини і газу. Опубл. Наука, 1973. – 847 с.

44. Краснов Н.Ф. Аеродинаміка. Вища школа, 1980. – 495 с.

45. Фролов М.А. Деякі питання теорії і практики моделювання пилоповітряних потоків у вибоїнах вугільних шахт / М.А. Фролов, В.І. Бородай // Боротьба з силікозом. 1970 – Т 8. – С. 43 – 54.

46. Лаптев А.Г., Фарахов М.І., Міндаєв Р.Ф. Очищення газів від аерозольних частинок сепараторами з соплами. – К: Видавництво «Печатний двір», 2003. – 120 с.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІРСЬКИХ ПОРІД, ОЦІНКА ВПЛИВУ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН І КОНСТРУКЦІЇ ЗАРЯДУ НА ВИХІД ДРІБНОДИСПЕРСНОГО ПИЛУ ПРИ РУЙНУВАННІ ВУГЛЕПОРОДНОГО МАСИВУ ПІДРИВАННЯМ

3.1 Методика проведення експериментальних досліджень

Для вивчення і оцінки концентрації дрібнодисперсних фракцій зруйнованих вибухом зразків порід вуглепородного масиву, оброблених ПАР, розроблено спосіб моделювання руйнування вибухом зразків гірських порід в лабораторних і полігонних умовах [1]–[2], реалізації якого здійснювалася на лабораторному стенді, наведеному на рис. 3.1.

У запропонованому способі моделювання вибухового руйнування гірських порід ефективність досягається введенням нових технологічних параметрів і операцій, які впливають на характер руйнування оброблених ПАР моделей вуглепородного масиву зарядами ВР різних конструкцій.

Застосування нових технологічних операцій дозволяє отримати якісну картину руйнування оброблених ПАР моделей і встановити концентрацію пилоподібних фракцій, які викидаються в навколишнє середовище до і після проведення заходів щодо зниження пилоутворення і, як наслідок, обґрунтувати ефективність, безпечних методів і способів проведення підготовчих виробок на глибоких горизонтах шахт.

Методикою досліджень впливу ПАР на характер руйнування міцних пісковиків і вугілля було заплановано кілька серій експериментів [3].

У межах гірничого відводу ш. Сташкова «ДТЕК Павлоградвугілля» з вуглепородного масиву були відібрані зразки вугілля у вигляді штуфів з розміром ребра 350 мм (зб. штрек, М66 + 8,8 м, борт. штрек М66 + 5,6 м, пласт С₆, $f = 3-4$ за шкалою М.М. Протод'яконова) і міцного піщанику ш. Дніпровська «ДТЕК Павлоградвугілля» (110У зб. штрек, покрівля пласта С₁₀, $f = 12-15$ за шкалою М.М. Протод'яконова) – найбільш небезпечною за фактором силікозу.

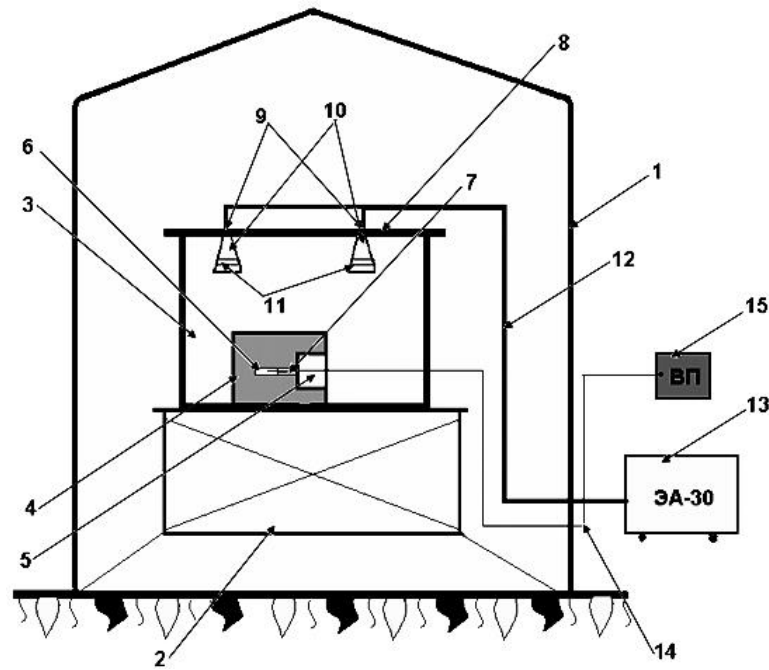


Рисунок 3.1 – Схема лабораторного стенда для моделювання вибухового руйнування гірських порід:

1 – бункер; 2 – майданчик для зразків і устаткування; 3 – вибухова камера (контейнер); 4 – зразок (модель); 5 – порожнина гірничої виробки; 6 – заряд ВВ; 7 – забійка; 8 – кришка вибухової камери (контейнера); 9 – отвори для алонжів; 10 – алонжі; 11 – фільтри АФА-ВП; 12 – трубки; 13 – пристрій для відкачування пилу – електроаспіратори ЕА-30; 14 – вибухова мережа; 15 – вибуховий прилад ВПК для ініціювання зарядів ВР

Підготовлені зразки експериментальних серій на 24 години поміщалися в різні розчини ПАР. В якості ПАР використовувалися речовини, які мають лужну реакцію, це 10% розчин бікарбонату натрію NaHCO_3 , 10% розчин кальцинованої соди Na_2CO_3 і вапняне молоко, яке зазвичай отримується шляхом розведення 1 частини негашеного вапна в 9 частинах води. Крім того, одна експериментальна серія зразків насичалася намагніченою водою, яку отримували при пропусненні звичайної води через побутовий намагнічувач.

Контрольні зразки, які не піддаються дії ПАР, протягом 24 годин висушувалися в лабораторній сушильній шафі при температурі 50°C. Далі в герметичному дослідному бункері 1 (див. рис. 3.1) готували майданчик 2, де розміщувалося все обладнання і матеріали для проведення експериментів (вибухова камера 3 з моделлю 4 і обладнання для ініціювання зарядів і вимірювання концентрації пилу).

Для формування моделі 4 гірського масиву в забої виробки відбиралися зразки породи або вугілля і в лабораторних умовах за допомогою машини для різання каменю готувалася модель кубічної форми розміром 200x200x200 мм. Далі в центрі однієї з поверхонь (граней) кубічної моделі 4 формувалися дві порожнини (для імітації гірничої виробки 5 і для розміщення заряду ВР 6 з ініціатором). Порожнина, яка імітує виробку 5, виконувалася висотою $0,5/h_{\text{мод}}$ і глибиною $0,5l_{\text{мод}}$, а вибухова порожнина 6 - діаметром 5 мм і глибиною $0,5h_{\text{вироб}}$. Устя порожнини, де розміщувався заряд ВР 6, герметизувався набійкою 7.

Проводилось кілька серій експериментів з руйнування моделей з гірської породи і вугілля з різними конструкціями зарядів:

- заряд з набійкою з кварцового піску з розміром фракції 0,25 мм;
- з набійкою з суміші, яка твердіє, для зарядів ВР при співвідношенні - $l_{\text{наб}}/l_{\text{вр}}$ 2,5; 4,0 і 6,0 відповідно;
- оброблені і необроблені поверхнево-активними речовинами.

Підготовлена модель 4 встановлювалася у вибухову камеру 3 з кришкою 8, яка мала отвори 9 для розміщення алонжів 10 з фільтрами 11 типу АФА-ВП-10. Алонжі 10 з фільтрами 11 з'єднувалися трубками 12 з приладом 13 для відкачування пилу з камери 3, які перед установкою зважувалися, а результати заносилися в журнал спостережень.

Далі комутувалась вибухова мережа 14, підключалася до вибухового приладу 15 і вибухали набой ВР 6.

Після підриву зарядів 6 включався прилад для відсмоктування пилу 13 (електроаспіратори ЕА-30) і протягом 30 хв відсмоктувався пил з камери 3 з протягуванням забрудненого повітря через фільтри 11.

Після завершення відсмоктування пилу відкривалася кришка 8 камери 3, знімалися фільтри з пилом 11 з алонжів 10 і зважувалися на аналітичних вагах з точністю 0,01%.

За граничними показниками, знятими за результатами відбору проб запиленого повітря, проводились розрахунки концентрації пилу за залежністю:

$$C = 1000 \frac{P_n}{Q_v}, \text{ мг/м}^3,$$

де P_n – маса пилу, що осів на фільтрі при протяганні через нього запиленого повітря, мг;

Q_v – об'єм повітря, м³.

$$Q_v = gt,$$

де g – продуктивність приладу для відсмоктування повітря (для електроаспіраторів ЕА-30-30 л/хв);

t – час протягання запиленого повітря, 30 хв,

$$P_n = (m_1 - m_0),$$

де m_0 , m_1 – маса фільтра до і після протягання запиленого повітря, відповідно, мг.

За отриманими показниками будувалися графіки залежності концентрації пилу від конструкції заряду ВВ при руйнуванні моделі з гірської породи і вугілля.

Зруйновані частини моделі витягували з вибухової камери і проводили її гранулометричний аналіз за відомими методиками [4].

Для цього використовували набори лабораторних сит (рис. 3.2) з отворами розміром 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0; 7,0; 10,0 12,0; 16,0; 20,0; 26,0; 30,0; 40,0; 50,0; 60,0; 70,0; 80,0 мм.

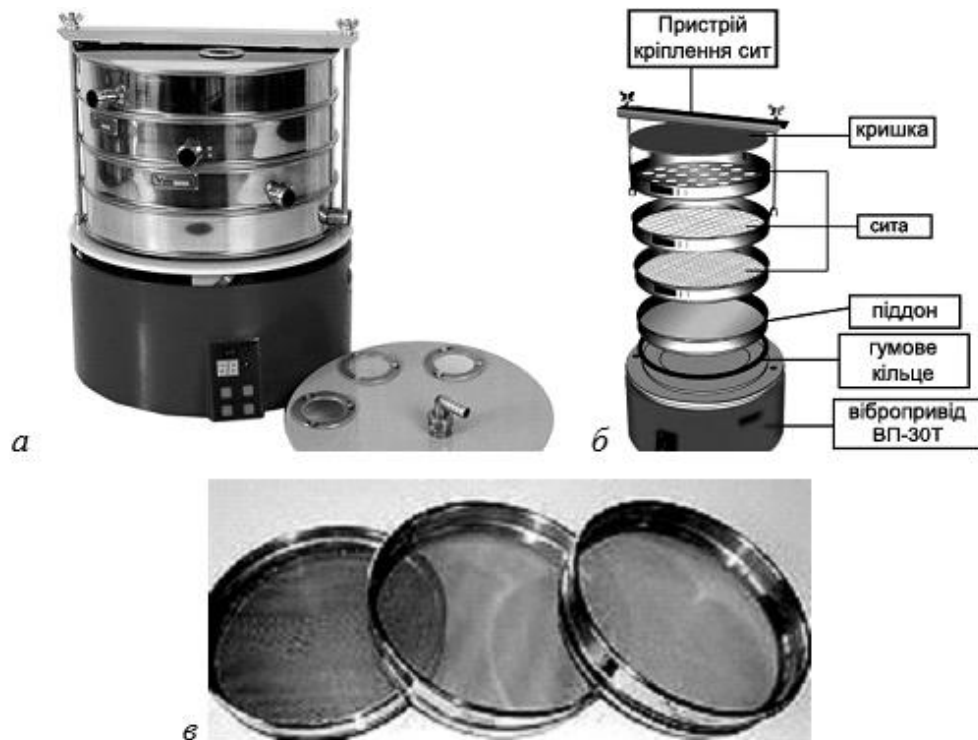


Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд (а), структурна схема аналізатора ситового А30 (б) і набір лабораторних сит СЛ-200 №58 (в)

Сита встановлювали зверху вниз від великих розмірів до дрібних. Частишки зруйнованої моделі 4 поміщали на верхнє сито і весь набір струшували протягом 10 хвилин.

З отриманого розподілу виділялися фракції, які пилять, в діапазоні: +00 – 0,5 мм.

Отримані фракції розміщували в сита з отворами розміром 0,05; 0,1; 0,16; 0,315; 0,4 мм і далі струшували.

Залишки фракції на кожному ситі зважували на аналітичних вагах з точністю 0,01%. Отримані результати заносили в таблиці, обробляли їх, а

гранулометричні характеристики розподілу дрібнодисперсних частинок оцінювали за співвідношенням:

$$\bar{d} = \sum_i^n d_i f_i, \text{ мкм},$$

де \bar{d} – середньозважений розмір частинок фракції, яка досліджується;

d_i – розмір i -ї фракції в інтервалі 0-100 мкм з інтервалом в 10 мкм;

f_i – частота i -ї фракції в частках одиниці

$$S_0 = \sqrt{\frac{Q_{75}}{Q_{25}}}, \quad S_k = \frac{Q_{75} Q_{25}}{Q_{50}^2},$$

де S_0 – коефіцієнт сортування частинок за розміром, що характеризує рівномірність руйнування середовища при впливі на неї різного роду навантажень (ударних, вибухових), який знаходиться в діапазоні 1-3;

S_k – коефіцієнт асиметрії, показує симетричність розподілу частинок щодо їх середньозваженого розміру;

Q_{75} , Q_{25} і Q_{50} кватильне значення розмірів дрібнодисперсних (пилоподібних) частинок, що становлять відповідно 75, 25 і 50% від загального об'єму фракцій в інтервалі 0-100 мкм.

За отриманими результатами будували інтегральні (кумулятивні) криві гранулометричного складу дрібнодисперсних частинок продуктів руйнування C від їх розміру d зруйнованої моделі вибухом заряду вибухової речовини і проводили їх оцінку.

За розподілом дрібнодисперсних частинок встановлювали гранулометричні характеристики характеру руйнування моделі.

Використання розробленого методу моделювання вибухового руйнування гірських порід дозволяє отримувати достовірні та обґрунтовані дані концентрації пилу і гранулометричні характеристики зруйнованої частини моделі зарядами ВР різної конструкції.

Запропонований спосіб і методика проведення досліджень можуть бути використані для обґрунтування раціональних параметрів зарядів в шпурах і розташування їх у забої при проведенні підготовчої виробки, і, тим самим, знизити енергетичні витрати при руйнуванні гірських порід і забезпечити безпеку робіт на глибоких горизонтах шахт і рудників.

Після вибуху, шляхом відбору проб дрібнодисперсних частинок, за допомогою аспіратора визначали концентрацію пилу за залежністю:

$$C = 1000P_H / Q_g, \quad (3.1)$$

де $P_H = (m_1 - m_2)$ – маса пилу, що осів на фільтрі після аспірації запиленого повітря, мг/м³;

m_1, m_2 – маса фільтра до і після аспірації запиленого повітря, мг;

$Q_g = gt$ – об'єм повітря, м³;

g – продуктивність електроаспіратора ЕА-30 (30 л/хв);

t – час аспірації, хв.

Потім продукти руйнування витягували з контейнера, поділяли на фракції розсіюванням їх на лабораторних ситах з розмірами вічок від 50 до 400 мкм, визначали масу кожної фракції, а гранулометричний склад найменшої пилоподібної фракції (0-100 мкм) додатково вивчали за допомогою поляризаційного мікроскопа МП-2, укомплектованого об'єктивами зі збільшенням 20× і 40×, інтеграційним столиком ІСА і відліковим 8× окуляром, що дозволяло встановлювати розміри окремих частинок зруйнованої породи (зерен і їх уламків, мінеральних агрегатів і т.п.) з точністю до 1 мкм при збільшенні 240× і 480×.

Крім того, в полі зору мікроскопа при збільшенні 480× за характерними оптичними константами визначали мінералогічний склад пилоподібної фракції пісковика і аналізували форму частинок, що утворилися при руйнуванні зразків вуглепородного масиву.

Дані мікрогранулометрії обробляли методом наближення експериментальних кривих до двопараметричних залежностей, використовуючи стандартні програми на мові BASIC.

За даними ситового аналізу в автоматичному режимі будувалися гістограми фракційного складу пилоподібної фракції (0-100 мкм) і визначалися основні параметри гранулометрії: середній діаметр зерен – d_{cp} , їх медіанний розмір – Md , кватильні розміри Q_{75} і Q_{25} , а також коефіцієнти рівномірності дроблення – S_0 і асиметрії – S_k , які обчислюють за формулами:

$$S_0 = \sqrt{Q_{75} / Q_{25}}, \quad (3.2)$$

$$S_k = (Q_{75} \cdot Q_{25}) / Md^2. \quad (3.3)$$

3.2 Дослідження зміни фізико-механічних характеристик і структури гірських порід при взаємодії з поверхнево-активними речовинами

3.2.1 Фізико-механічні характеристики і структурні особливості гірських порід у забої підготовчої виробки

Значний вплив на зміну міцнісних властивостей порід має їх гранулометричний склад. Характер цього впливу для всіх типів порід, незалежно від їх ступеня літіфікації, в основному аналогічний. Різниця полягає лише у величині стрибків при переході від одного гранулометричного складу до іншого.

Характеристики міцності одних і тих же літологічних різновидів порід змінюються залежно від типу і складу цементу. Найбільш міцними представлені породи з контактово-поровим типом цементу і менш міцними – з базальним цементом. Міцність їх знижується при переході від цементу карбонатного складу до глинистого цементу.

Зі збільшенням глибини залягання до 1800 м і більше міцність високометаморфізованих пісковиків в 1,5 рази вище, ніж на глибині 400 м,

міцність вугілля з низьким ступенем вуглефікації на цій глибині змінюється в 2,5 рази.

Розробка вуглепородного масиву на глибоких горизонтах шахт ускладнюється такими факторами. Збільшення міцності вуглевміщуючих порід пов'язане з процесами літіфікації, діагенезу, зміною петрографічного складу, зокрема переважанням кварцвмісних порід, а також структурними перетвореннями, що відбуваються у вуглевмісній товщі під дією літостатичного тиску, а саме: катаклазу, що включає дроблення, грануляцію та розтріскування окремих мінеральних зерен або локальних зон в межах агрегату. Даний фактор при розробці корисних копалин з використанням енергії вибуху (проходка капітальних і підготовчих гірничих виробок у вуглепородному масиві) призводить до утворення дрібнодисперсного кварцового (силікозонебезпечного) пилу внаслідок розкриття численних дефектів будови (мікротріщин) в кварцових зернах на контакті «ВР-порода» [5], а також пневмокніозонебезпечного пилу при динамічному впливі на вугільний пласт.

Складний напружено-деформований стан вуглепородного масиву, що виявляється в переважанні до певної глибини горизонтальних напружень над вертикальними, призводить до зменшення КВШ і, як наслідок, збільшення маси вибухових речовин, які використовуються для руйнування порід, що в свою чергу збільшує об'єм дрібнодисперсного пилу і газоподібних продуктів вибуху в шахтній атмосфері.

З метою аналізу гірничо-геологічних умов проведення гірничих виробок, з вуглепородного масиву у вигляді кернів геологорозвідувальних свердловин були відібрані зразки вугілля (пласт, $f = 2-3$ за шкалою М.М. Протод'яконова) і міцного піщанику (пласт, $f = 14-15$ за шкалою М.М. Протод'яконова) – найбільш небезпечного за фактором силікозу породи.

З кернів свердловин, вибурених алмазною коронкою діаметром 59 мм, були виготовлені 12 циліндричних зразків висотою 30 мм. У всіх зразках через центр основи свердлили наскрізні отвори діаметром 5 мм. Крім того, з цих же

кернів виготовлялися петрографічні шліфи для встановлення під мікроскопом мінералогічного складу і структури породи, яка руйнується вибухом.

Вивчення за допомогою поляризаційного мікроскопа МП 2 на прозорих петрографічних шліфах порід вугленосної товщі, які вміщують кварц (табл.3.1), їх структурних особливостей дозволило встановити наступне.

Пісковик сірий, псамітовий, кварцово-полевошпатовий крупнозернистий (ш. Скочинського ПАТ «Донвугілля », гор.1200 м, свердловина 11495, Донбас).

Обкатаність зерен (ступінь обкатаності) – клас 1-2 бали (гострокутні і слабо обкатані, до 3-х). Цемент – карбонатний, контактний.

Мінералогічний склад: кварц, польові шпати, карбонатний цемент, пірит, слюди (в основному мусковит). Кварц – ступінь обкатаності 1-2 бали. Розмір зерен 50-300 мкм (0,05-0,3 мм – максимальний). Згасання – пряме, іноді хвилясте. Добре видно ознаки катаклазу у вигляді грануляції та розтріскування окремих кварцових зерен. Контакт з іншими мінералами: прямі звивисті лінії, сутурні (ефект вдавнення). Практично всі зерна містять газорідкі включення у вигляді смужок бульбашок газу («бульбашкові» мікротріщини). Усередині зерен іноді зустрічаються вкраплення циркону (розмір зерен 10-20 мкм).

Таблиця 3.1 – Відомості про зразки порід вугленосної товщі, відібраних для досліджень фізико-механічних властивостей і енергоємності руйнування

Тип породи	Місце відбору проб	Характеристика породи
Пісковик середньо- і дрібнозернистий	ш. Дніпровська «ДТЕК Павлоградвугілля», збірний штрек, покрівля пл. С ₁₀	Пісковик світло-сірий, середньозернистий, міцний
	ш. Сташкова «ДТЕК Павлоградвугілля», 519 збірний штрек, покрівля пласта С ₅	Пісковик сірий дрібнозернистий, горизонтально-шаруватий, міцний
	ш. Благодатна «ДТЕК Павлоградвугілля», 2-й західний магістральний відкаточний штрек, покрівля пласта С ₅ , гор. 250 м	Пісковик світло-сірий, крупнозернистий, переривчасто-шаруватий, міцний

Тип породи	Місце відбору проб	Характеристика породи
Пісковик крупнозернистий	ш. Скочинського «ПАТ Донвугілля», гор.1200 м, свердловина 11495	Пісковик сірий, крупнозернистий, горизонтально-шаруватий, міцний
Вугілля	ш. Сташкова «ДТЕК-Павлоград-вугілля», зб. штрек, М66+8,8 м, борт. штрек М66+5,6 м, пласт С ₆	Вугілля горизонтально-шаруватий (шари вітрону, фюзену, кларену і дюрену)
	ш. Свердлова ПАТ «ДТЕК-Свердловантрацит», пл. k ₅ ¹ конвеєрний штрек, гор. 1115 м	Вугілля горизонтально-шаруватий (шари вітрону, фюзену, кларену і дюрену)

Польові шпати. Представлені плагіоклазом і мікрокліном (плагіоклаз – смугасті полісинтетичні двійники; мікроклін – гратчасті). Розмір зерен – від 250 до 1000 мкм.

Кальцит. Зустрічається як у вигляді окремих зерен, так і у вигляді цементу на контакті з іншими мінералами. У порівнянні з кварцом зерна кальциту обкатані сильніше, ніж зерна кварцу (обкатаність 2-3 бали). Рельєф зерен – високий.

Пірит. Представлений у вигляді зерен складної форми. Розмір зерен: від 10 до 100 мкм (максимальний).

Слюди. Мусковіт (дуже мало) у вигляді деформованих елементів. Розмір зерен: товщина 20-30 мкм; довжина 400 мкм (максимальний розмір).

Співвідношення мінеральних компонентів у %: кварц – 50-55%; польові шпати (плагіоклаз + ортоклаз) – 20-25%; карбонати (кальцит) – 20-25%; слюди (переважно мусковіт) – 1-2%; пірит (ймовірно, марказит) – не більше 3%.

Мікроскопічна опис. Даний зріз породи характеризується переважанням обкатаних зерен (3-3,5 бала) над гострокутними.

Цемент в основному карбонатний, переважає над контактним цементом в співвідношенні 4:1 (рис. 3.3).

Пісковик міцний («ДТЕК Павлоградвугілля», ш. Дніпровська, покрівля пласта С₁₀) дрібнозернистої структури кварцово-полевошпатовий з невеликою ~5% -ю кількістю зерен розміром 0,2-1,0 мм.

Фація – річковий піщаник, в нижній частині русла річки, ближче до дельти. Обкатаність зерен – клас 1-3 бали. Цемент – карбонатний (С_с) і контактовий.

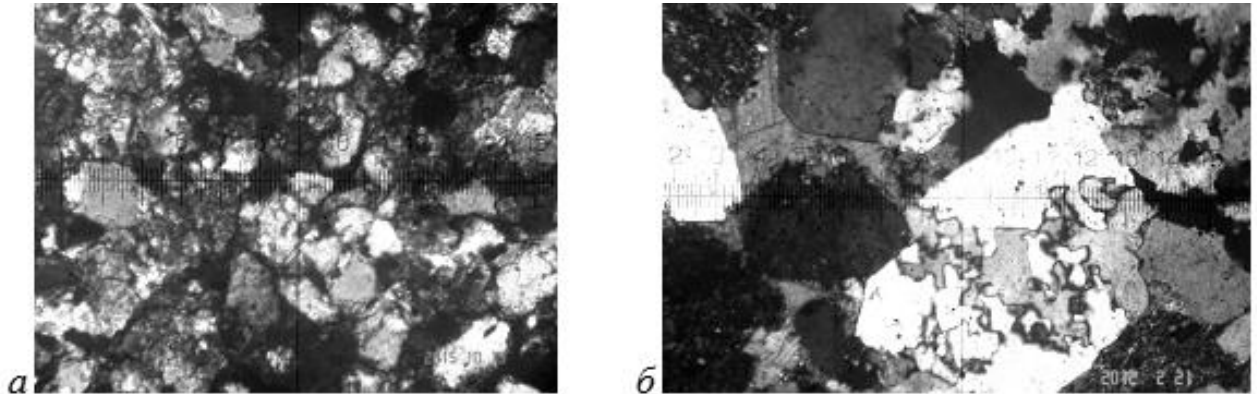


Рисунок 3.3 – Структура пісковика сірого крупнозернистого (шахта ім. Скочинського ПАТ «Донвугілля», гор.1200 м, свердловина 11495, Донбас). Прозорий шліф, мікрофотографія, поляризоване світло, збільшення 120× (а), збільшення 600× (б)

Мінералогічний склад: кварц, польові шпати, карбонатний цемент, пірит, слюди (в основному мусковіт).

Кварц – ступінь обкатаності 1-2 бали. Розмір зерен 1000-1500 мкм (1,0-1,5 мм – максимальний). Згасання хмарне і пряме.

Контакт з іншими мінералами: прямі лінії, сутурні (ефект вдавнення). Практично всі зерна містять «с» мікротріщини. Усередині зерен іноді зустрічаються вкраплення циркону (розмір зерен 40-50 мкм).

Польові шпати. Представлені плагіоклазом і мікрокліном (плагіоклаз – смугасті полісинтетичні двійники; мікроклін – гранчасті). Ступінь обкатаності

– 1-2 бали (до 3-х). Розмір зерен – від 250 до 1000 мкм (під мікроскопом). Контакт з іншими мінералами: прямі та звивисті лінії.

Кальцит. Зустрічається як у вигляді окремих зерен, так і у вигляді цементу на контакті з іншими мінералами. Рельєф зерен – високий.

Пірит. Представлений у вигляді зерен складної форми. Розмір зерен: від 10 до 100 мкм (максимальний).

Слюди. Мусковіт (дуже мало) у вигляді деформованих елементів.

Розмір зерен: товщина 20-30 мкм; довжина 400 мкм (максимальний розмір).

Мікроскопічний опис. Співвідношення контактового і карбонатного цементу приблизно порівну (50/50) (рис.3.4).

Вапняк – Центральний кар'єр Докучаєвського флюсодоломітного комбінату. Порода – вапняк перевідкладений спочатку хемогенного походження з вкрапленнями фауни (уламки раковин молюсків). Дрібнозернистий, розмір зерен, встановлений під мікроскопом, – 0,5-1,5 мм.

Структура породи під мікроскопом – псамітова, тобто дрібноуламкова). Уламки мінералу кальциту й ін. зцементовані кальцитовим цементом.

Головні породоутворюючі мінерали: Кальцит (уламки, обкатані і напівобкатані) – 95%; Домішки – найдрібніші уламки зерен кварцу (не більше 5%) добре окатані з розміром 0,1-0,5 мм;

Уламки кальциту і кварцу зцементовані кальцитовим цементом. Мікротріщини в породі практично відсутні. Наявні мікротріщини щільнозамкнуті, зцементовані кальцитом, що характеризується оптичним орієнтуванням, яке відрізняється від оптичного орієнтування зерен, які перетинаються мікротріщинами. Пори в породі відсутні (рис. 3.5).

Брикетований полірований зразок вугілля – ш. Сташкова «ДТЕК Павлоградвугілля», збірний штрек, М66 + 8,8 м, борт. штрек М66 + 5,6 м, пласт С₆.

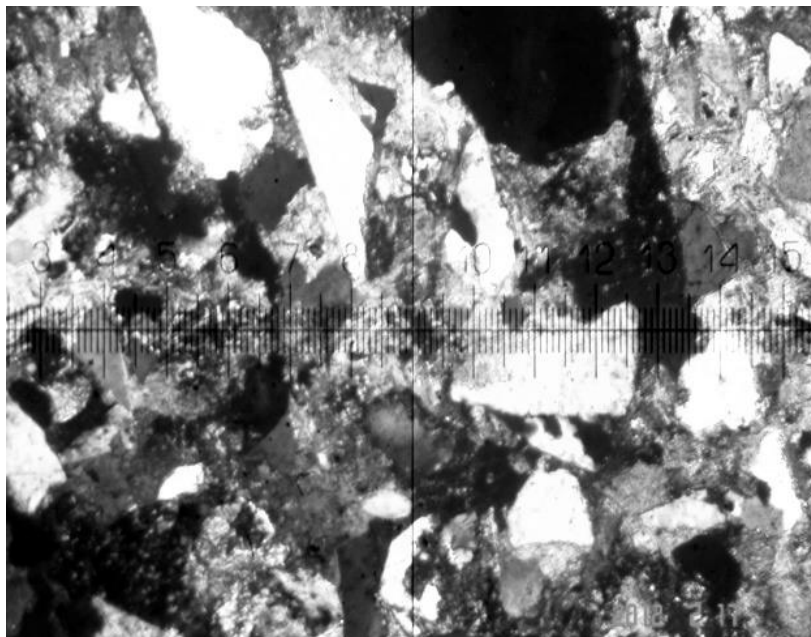


Рисунок 3.4 – Структури пісковика міцного дрібнозернистого («ДТЕК Павлоградвугілля», ш. Дніпровська, покрівля пласта С₁₀). Прозорий шліф, мікрофотографія, збільшення 120×

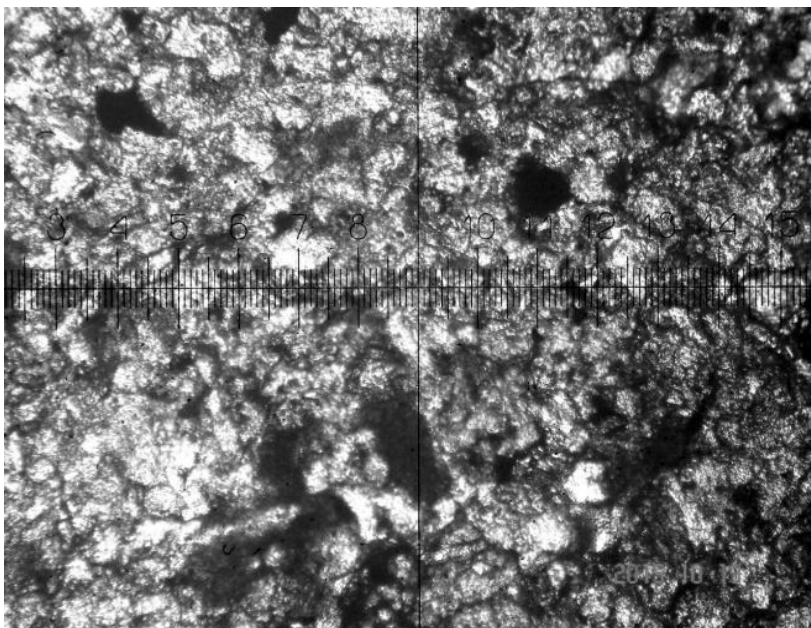


Рисунок 3.5 – Структура вапняку (Центральний кар'єр ПрАТ «ДФДК»). Прозорий шліф, мікрофотографія, поляризоване світло, збільшення 120×

У полі зору мікроскопа МПС-2 (збільшення 60×) у відбитому світлі діагностуються основні компоненти вугілля по відбивній здатності: вітрен, фюзен, кларен і дюрен. Переважний компонент – кларен.

Вітрен, що володіє максимальною відбивною здатністю, діагностується за наявністю тріщин (максимально крихкий компонент).

Фюзен сажистий, речовина практично чорна (рис.3.6).

Пісковик кварцово-полевошпатовий, крупнозернистий, Східний Донбас, свердловина 1535 (шліф потовщений без покривного скла).

Фація: піщаний річкової фації в верхній течії палеоріки.

Цемент - контактний. Обкатаність зерен – 1-2 бали.

Мінералогічний склад: кварц, польові шпати, кальцит (цемент контактний і карбонатний), кальцит у вигляді окремих зерен (дуже мало), мусковіт (мало).

Кварц представлений гострокутними уламками окремих зерен і їх агрегатів. Розміри зерен – 1-4 мм. Розміри зерен під мікроскопом – 40-500 мкм. Згасання зерен: пряме, дуже рідко – хмарне.

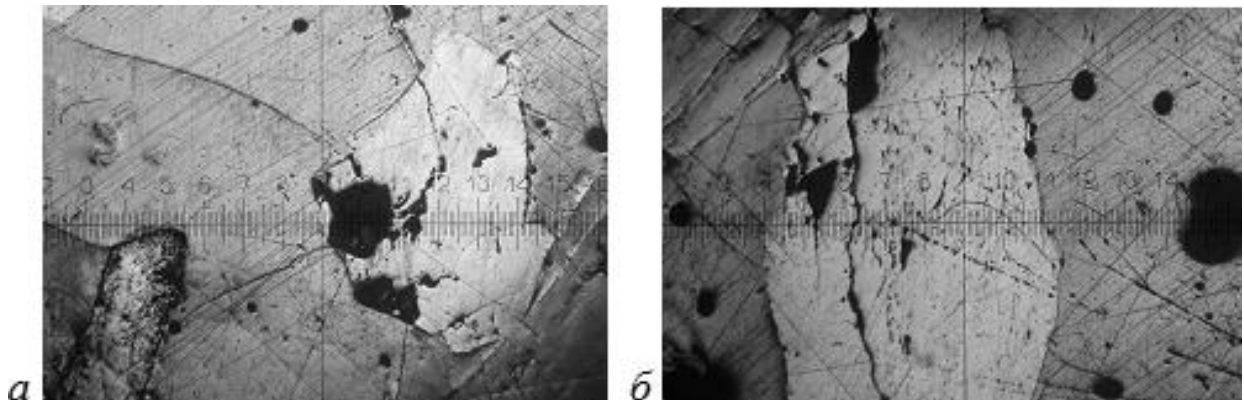


Рисунок 3.6 – Структури вугілля (ш. Сташкова «ДТЕК Павлоградвугілля», пласт С₆). Мікрофотографія, аншліфу, відбите світло, збільшення 30× (а), збільшення 75× (б)

Мікротріщинуватості: «бульбашкові» мікротріщини зустрічаються практично у всіх зернах кварцу. Контракт з іншими мінералами: точковий (мало); суцільний з базальним цементом карбонатного складу.

Польові шпати. У відсотковому відношенні менше, ніж кварц. Розмір зерен – 30-150 мкм.

Польові шпати представлені в основному ортоклазом і плагіоклазом (рідко) розміром 50-80 мкм.

Кальцит – в інтерстиціях між зернами кварцу і польового шпату.

Рельєф цементу високий. Мусковіт (мало).

Лейсти мусковиті слабо деформовані. Товщина – 20-30 мкм, довжина – 550-600 мкм. Пірит (мало). Даний мінерал присутній в порах або у вигляді примазок неправильної форми (ширина 10-50 мкм, довжина до 100-200 мкм) (рис. 3.7).

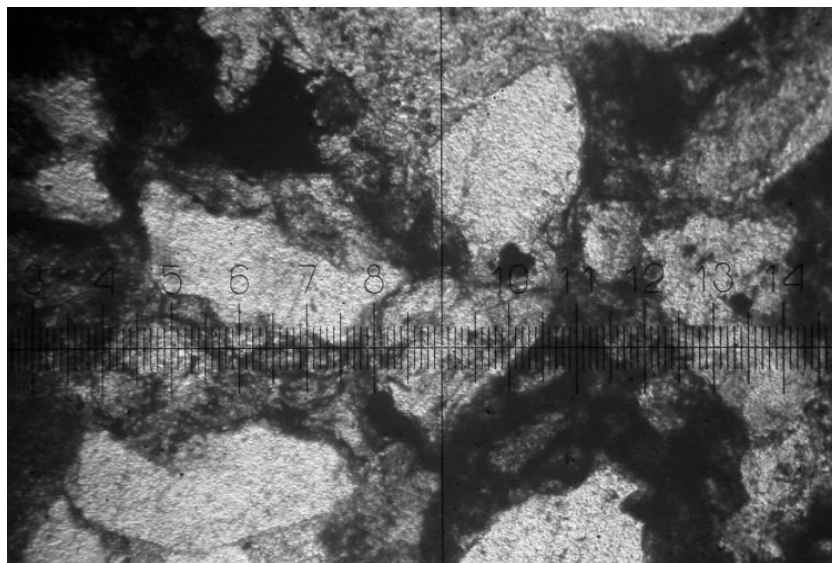


Рисунок 3.7 – Структура пісковика кварцово-полевошпатового, крупнозернистого (Східний Донбас, свердловина 1535). Прозорий шліф, мікрофотографія, збільшення 120×

Пісковик дрібнозернистий, шахта Дніпровська, «ДТЕК Павлоградвугілля», покрівля пласта C^B_{10} .

Фація – річковий піщаник в нижній частині русла річки, ближче до дельти. Пісковик кварцово-полевошпатовий, дрібнозернистий. Обкатаність зерен – клас 1-3 бали. Цемент – карбонатний (C_c) і контактовий.

Мінералогічний склад: кварц, польові шпати, карбонатний цемент, пірит, слюди (в основному мусковіт).

Кварц обкатаністю 1-2 бали. Розмір зерен 1000-1500 мкм (1,0-1,5 мм – максимальний). Згасання – хмарне і пряме.

Контакт з іншими мінералами: прямі лінії, сутурні (ефект вдавнення). Практично всі зерна містять «бульбашкові» мікротріщини). У середині зерен іноді зустрічаються включення циркону (розмір зерен 40-50 мкм).

Польові шпати. Представлені плагіоклазом і мікрокліном (плагіоклаз – смугасті полісинтетичні двійники; мікроклін – гранчасті). Ступінь обкатаності – 1-2 бали (до 3-х). Розмір зерен – від 250 до 1000 мкм (під мікроскопом). Контакт з іншими мінералами: прямі і звивисті лінії.

Кальцит. Зустрічається як у вигляді окремих зерен, так і у вигляді цементу на контакті з іншими мінералами. Рельєф зерен – високий.

Пірит представлений у вигляді зерен складної форми. Розмір зерен від 10 до 100 мкм.

Слюда (мусковіт) дуже мало у вигляді деформованих лейст. Розмір зерен: товщина 20-30 мкм; довжина 400 мкм.

Мікроскопічний опис. Співвідношення контактового і карбонатного цементу приблизно порівну (50/50).

Мінералогічний склад і структура аналогічні для шліфа № 7 (звичайний шліф з покривним склом).

Відмінна особливість. У потовщеному шліфу більш чітко видно сліди катаклазу у вигляді розтріскування зерен кварцу (найбільш крихкий компонент в складі пісковику) (рис.3.8).

Вивчення мінералогічного складу і структурних особливостей темно-сірого пісковику показало, що його головні мінерали представлені уламковим кварцом – 30-40%, уламками польового шпату (в основному уламками кислого плагіоклазу) – 50-55%.

Другорядні мінерали представлені глинистими мінералами груп каолініту, монтморилоніту і слюд – 5-10%.

Ступінь обкатаності уламків 1-2 бали (незграбні й округлено-незграбні).

Цемент контактний, а також цемент регенерації (порода частково окварцована), співвідношення видів цементу приблизно 1:1.

Структура породи – дрібнозерниста, розмір зерен коливається від 10 до 1000 мкм (рис. 3.9).

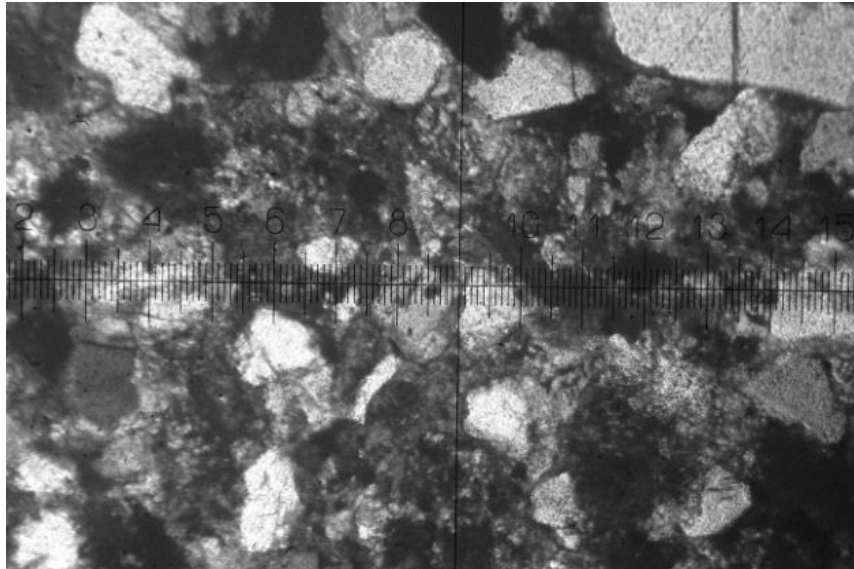


Рисунок 3.8 – Структура пісковика дрібнозернистого (шахта Дніпровська, «ДТЕК Павлоградвугілля», покрівля пласта). Прозорий шліф, мікрофотографія, поляризоване світло, збільшення 120х

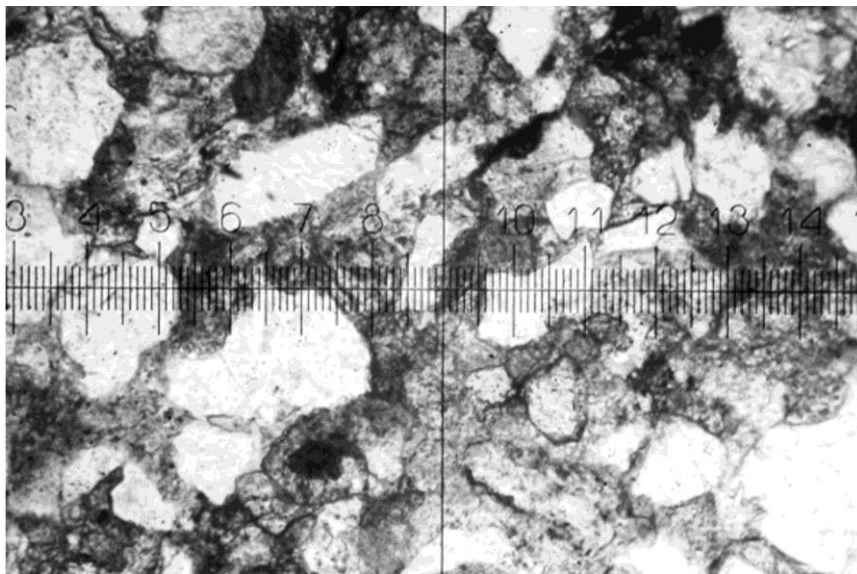


Рисунок 3.9 – Мікрофотографія темно-сірого пісковика. Прозорий шліф, збільшення 96х, поляризоване світло (1 поділка вимірювальної шкали дорівнює 10 мкм)

Таким чином, петрографічний аналіз фізико-механічних характеристик і структурних особливостей гірських порід у забої підготовчої виробки, виконаний на шліфах кварцвмісних порід вугленосної товщі свідчить про те, що однією з основних причин утворення дрібнодисперсного силікозонебезпечного пилу в період руйнування гірських порід динамічними навантаженнями (удар, вибух), є високий вміст кварцу в руйнованому масиві гірських порід (до 55%).

3.2.2 Вплив поверхнево-активних речовин на вихід дрібнодисперсної фракції пилу при руйнуванні гірських порід в забої виробки

Результати експериментальних досліджень з руйнування зразків піщанику і вугілля, ослаблених дією ПАР, наведено в табл. 3.2.

Аналіз гранулометричних характеристик продуктів руйнування, ослаблених дією ПАР, показує, що намагнічена вода ($pH = 7$) не має істотного впливу на характер і механізм руйнування полімінеральної породи [3].

Можливо, під дією намагніченої води відбувається деяке зниження міцності зразка – в характері руйнування це проявляється в незначному збільшенні середнього діаметра дрібнодисперсних частинок (до 15-17%) у порівнянні з дрібнодисперсними частинками сухих (контрольних) зразків.

Таблиця 3.2 – Гранулометричні характеристики продуктів вибухового руйнування піщанику, обробленого ПАР

Поверхнево-активна речовина	d_{cp} , мкм	Медіани і кuartилі, мкм			S_0	S_k
		Md	Q_{75}	Q_{25}		
Сухі зразки	10,09	1,23	3,60	0,19	2,97	0,98
Магнічена вода	12,32	1,96	5,65	0,66	2,94	0,98
10% розчин $NaHCO_3$	13,43	2,12	8,57	1,03	2,90	0,97
10% розчин Na_2CO_3	19,64	5,11	14,64	1,74	2,91	0,97
Вапняне молоко	17,36	4,56	12,94	1,57	2,92	0,98

У продуктах руйнування пісковиків (рис. 3.10) дрібнодисперсна фракція (0-100 мкм) представлена виключно гострокутними уламками мінералу кварцу (90-95%), що свідчить про те, що руйнування даної породи вибуховими навантаженнями відбувається в основному за численними дефектами в зернах кварцу.

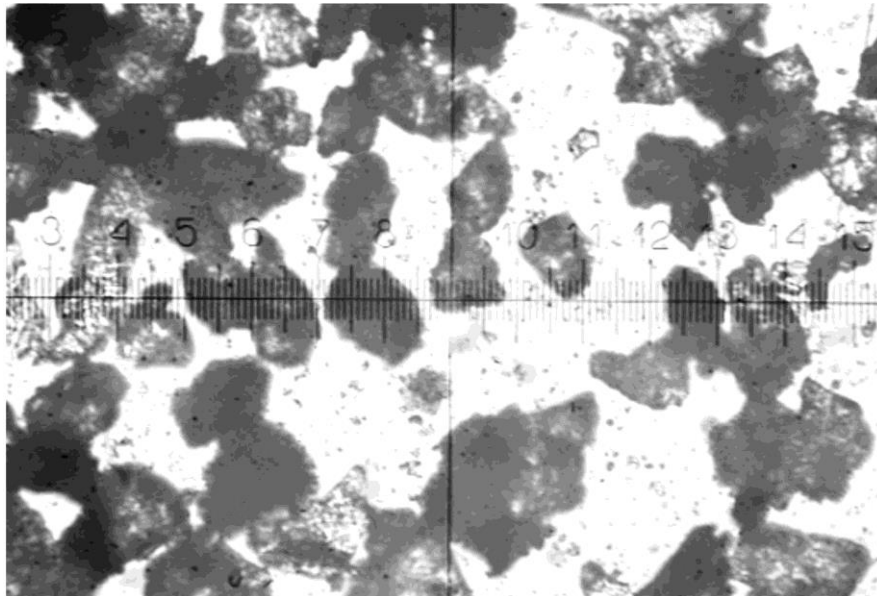


Рисунок 3.10 – Гострокутні уламки кварцових частинок в продуктах вибухового руйнування міцних пісковиків. Збільшення 240× (1 поділка вимірювальної шкали дорівнює 5 мкм)

Ці дефекти спостерігаються в полі зору мікроскопа у вигляді смужок бульбашок газу – площин газорідких включень. Даний факт підтверджується оцінкою таких новостворених уламків за ступенем обкатаності. Вона знаходиться в інтервалі 0-1 бали (гострокутні і незграбні), в той час як спочатку (в шліфі) ступінь обкатаності мінеральних частинок, що складають піщаник, становить 1-2 (незграбні й округлено-незграбні).

Насичення зразків пісковика 10% розчином бікарбонату натрію (NaHCO_3) призводить до того, що характер руйнування полімінеральної породи під дією вибухових навантажень змінюється за схемою, показаною на рис. 3.11.

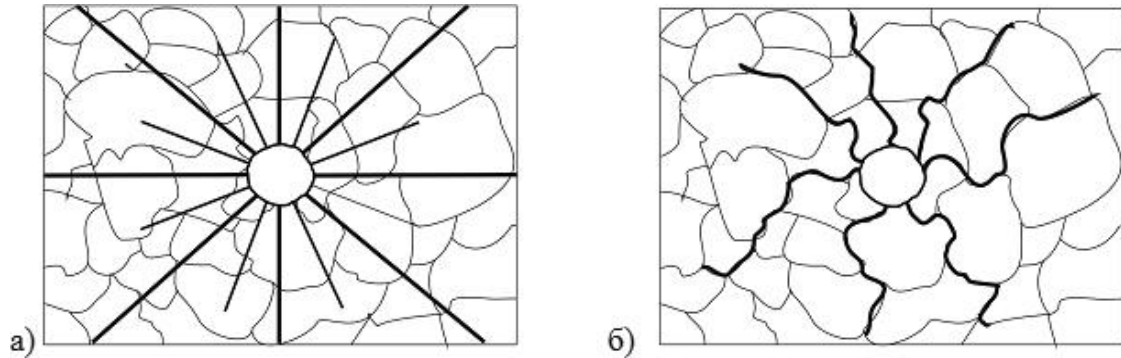


Рисунок 3.11 – Схеми руйнування вуглепородного масиву з формуванням новостворених поверхонь:

а – по внутрішньозерновим дефектам породоутворюючих мінералів; б – по контактам зерен породоутворюючих мінералів

Зокрема, середній діаметр дрібнодисперсних (пилоподібних) частинок фракції 0-100 мкм збільшується в 1,33 рази (в порівнянні з сухими зразками).

Дослідження морфології уламків під мікроскопом показало, що новоутворені на контакті «ВР-порода» поверхні формуються по контактам зерен мінералів і за дефектами будови (в зернах кварцу та площинах спайності в зернах польового шпату) в співвідношенні приблизно 4 до 1 [6].

При впливі на міцні пісковики 10% розчину кальцинованої соди (Na_2CO_3) характер і механізм вибухового руйнування полімінеральної породи, що містить в своєму складі до 40% уламкового кварцу, істотно змінюється.

Середній діаметр дрібнодисперсних частинок збільшується майже вдвічі: 10,09 мкм – сухі зразки, 19,64 мкм – зразки пісковика, оброблені розчином кальцинованої соди, яка має більш сильну лужну реакцію в порівнянні з розчином бікарбонату натрію.

Морфологічний аналіз дрібнодисперсних уламків фракції 0-100 мкм, виконаний під мікроскопом при збільшенні 480×, дозволив встановити, що новоутворені вибухом поверхні розвиваються тільки по контактам зерен.

Вплив 10% розчинів NaHCO_3 , Na_2CO_3 , намагніченої води і вапняного молока призводить до збільшення середнього діаметра дрібнодисперсних продуктів вибухового руйнування вугілля (фракція 0-100 мкм) в середньому в 2 рази в порівнянні з необробленим ПАР зразками (рис. 3.12).

При цьому хімічний склад і рН розчинів практично не впливають на крупність пилоподібних частинок (табл. 3.3).

У даному випадку, ймовірно, проявляється ефект П.А. Ребіндера [5], який викликає адсорбційне зниження міцності вугілля за рахунок зменшення міжфазної поверхневої енергії при проникненні рідини в мікротріщини.

Слід зазначити, що в пилоподібних продуктах руйнування зразків, оброблених намагніченою водою, а також десятивідсотковими розчинами харчової та кальцинованої соди, в невеликій кількості містяться уламки кварцових зерен, кількість яких звичайно не перевищує 1-3% (рис. 3.13, а).

У продуктах вибухового руйнування вугілля, оброблених вапняним молоком, кварцові зерна відсутні (рис. 3.13, б).

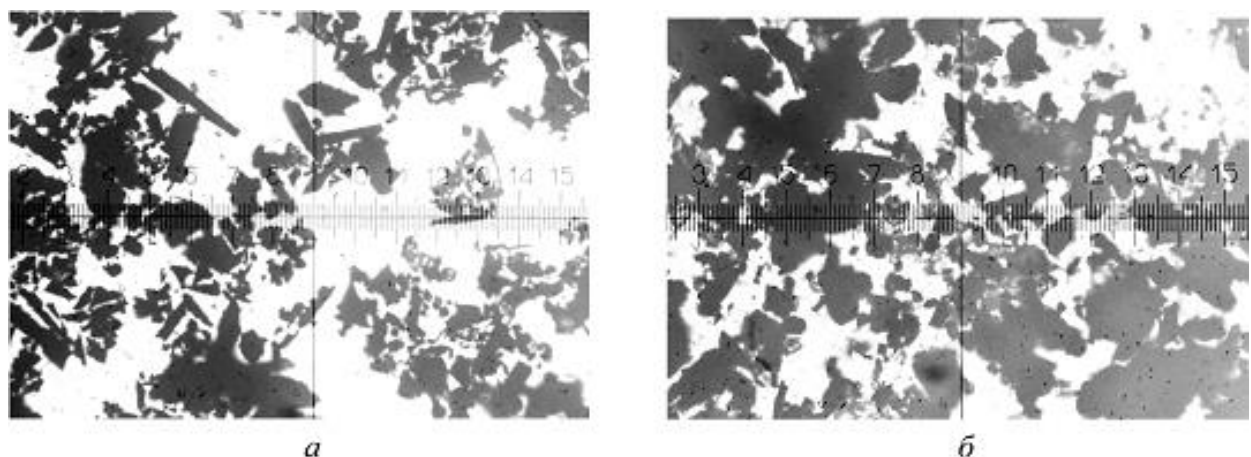


Рисунок 3.12 – Мікрофотографія уламків частинок в продуктах вибухового руйнування вугілля шахти Дніпровська в сухих зразках (а) і після впливу ПАР (б). Збільшення 240× (1 поділка шкали дорівнює 5 мкм)

Таблиця 3.3 – Гранулометричні характеристики продуктів вибухового руйнування вугілля, обробленого ПАР

Поверхнево-активна речовина	d_{cp} , мкм	Медіани і кватилі, мкм			S_0	S_k
		Md	Q_{75}	Q_{25}		
Сухі зразки	14,93	3,29	9,24	1,14	2,85	0,95
Намагнічена вода	29,40	15,41	34,35	5,81	2,43	0,84
10 % розчин Na_2CO_3	29,47	15,52	34,70	5,85	2,44	0,83
10 % розчин $NaHCO_3$	29,84	15,69	34,87	5,92	2,42	0,84
Вапняне молоко	30,67	16,12	35,85	6,17	2,43	0,84

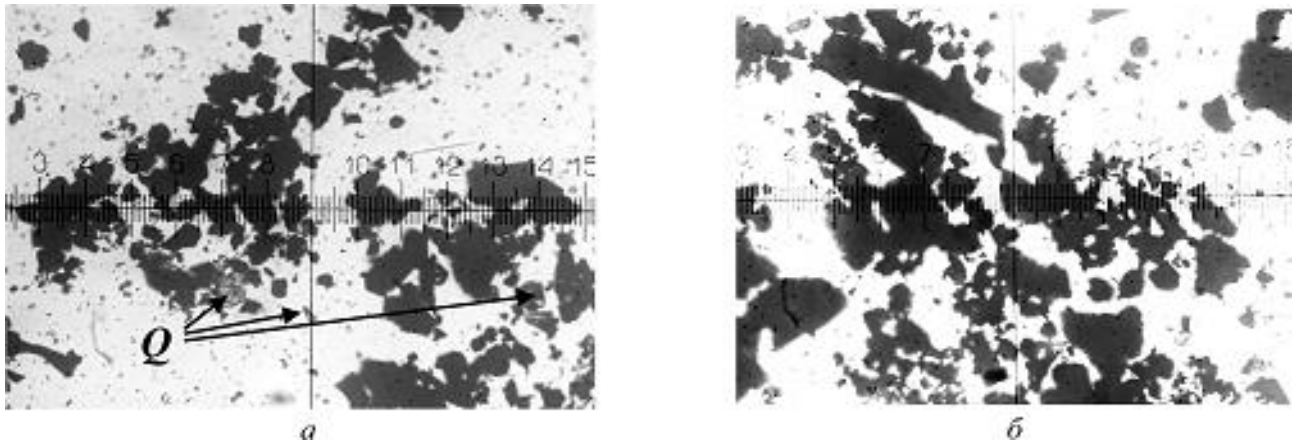
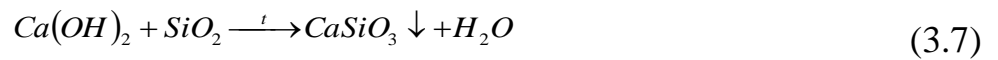
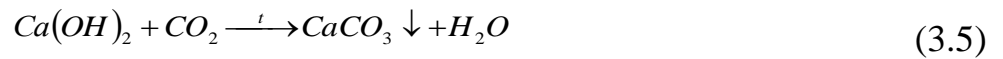


Рисунок 3.13 – Присутність кварцу (Q) в дрібнодисперсних продуктах руйнування вугілля до (а) і після обробки зразків вапняним молоком (б).

Збільшення 240× (1 поділка шкали дорівнює 5 мкм)

Мінералогічний склад продуктів руйнування вугілля в даному випадку пояснюється тим, що під впливом високих температур вибухових газів водний розчин гашеного вапна, розташований в інертних проміжках (ампулах), перетворюється в суміш оксидів кальцію (3.4) і вуглекислого кальцію (3.5), яка взаємодіє з дрібнодисперсними кварцовими частинками і утворює силікати кальцію (3.6 і 3.7) у вигляді великих агрегатів, які швидко осідають.

Процеси, які при цьому відбуваються, можна виразити такими рівняннями:



За результатами досліджень побудовано залежності концентрації пилу від виду ПАР, використовуваного для обробки зразків пісковика і вугілля, які наведені на рис. 3.14.

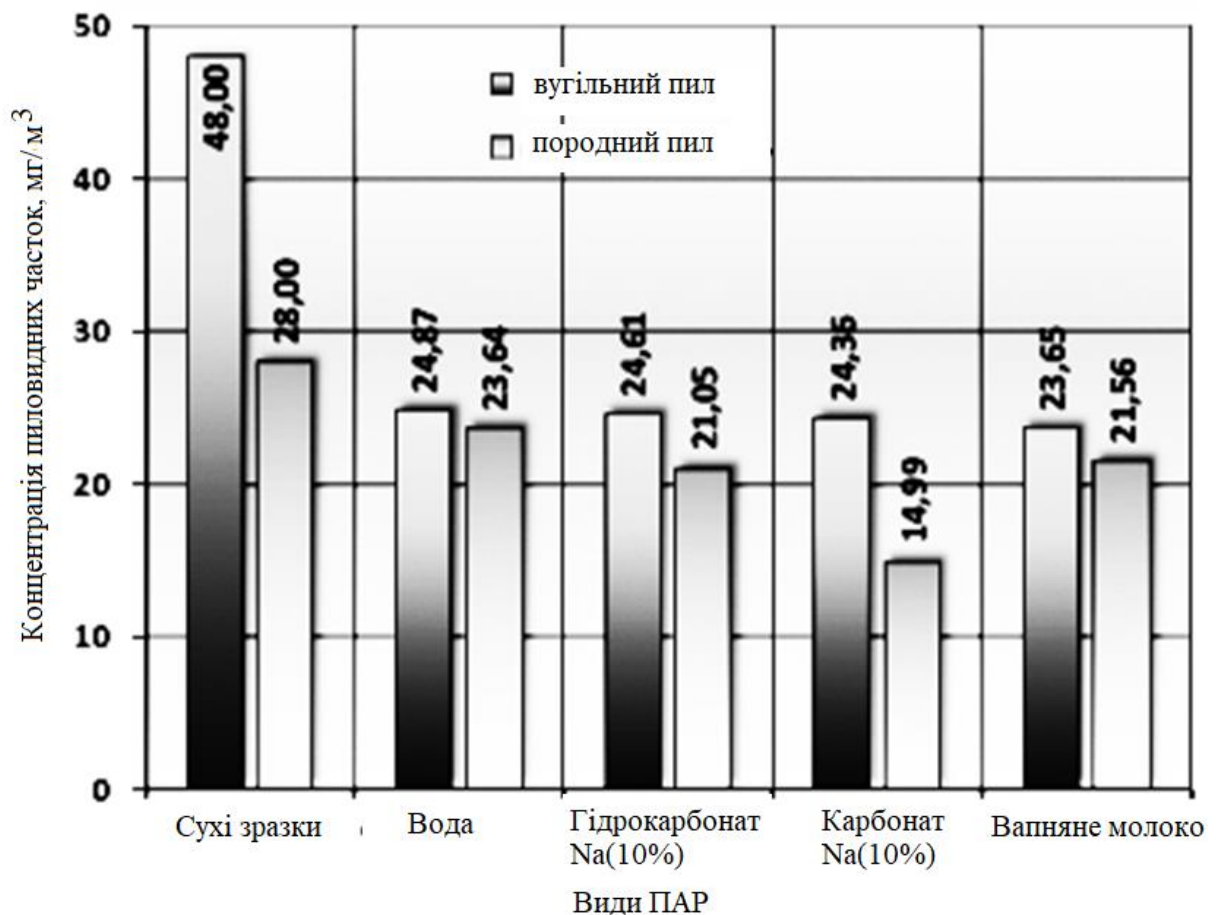


Рисунок 3.14 – Гістограма розподілу дрібнодисперсної фракції пилу зруйнованих моделей гірських порід, оброблених різними типами ПАР, зарядом високобризантного ВР

Аналіз гістограми, наведеної на рис. 3.14, показує, що при використанні ПАР для обробки порід при їх вибуховому руйнуванні, концентрація дрібнодисперсних частинок в об'ємі вибухової камери зменшується майже в 2 рази.

3.3 Оцінка вмісту надмалих частинок в продуктах руйнування вуглепородного масиву методом рентгеноструктурного аналізу

Як показують дослідження [7], в легенях хворих на антракоз і силікоз знаходиться приблизно 95% пилу розміром менше 2 мкм, 5% – 2-4 мкм і незначна кількість – понад 5 мкм. Тому оцінка вмісту надмалих частинок, які містяться в атмосфері гірничих виробок, вельми актуальна.

Сучасні петрографічні поляризаційні мікроскопи можуть забезпечити максимальне збільшення до 3375× при використанні 90-кратного імерсійного об'єктива і 25-кратного окуляра. Однак хроматичні і сферичні аберації, обумовлені хвильовою природою світла, не дозволяють по оптичним константам діагностувати мінеральний склад і адекватні вимірювання частинок, розмір яких менше 1 мкм. Крім того, при великих збільшеннях (починаючи з 2000× і вище) під мікроскопом надмалі пилоподібні частинки розміром 1 мкм і менше можуть бути сплутані з дефектами поверхні предметного скла, на якому зазвичай розміщують пробу досліджуваного пилу.

У зв'язку з цим світлооптичний метод дослідження гранулометричного складу найдрібніших пилоподібних продуктів руйнування обмежений у своїх можливостях і не дозволяє оцінити вміст цих частинок в продуктах руйнування гірського масиву і в шахтній атмосфері.

У даний час не розроблені достовірні методи визначення масової частки пилоподібних частинок мікронного і субмікронного розмірів в лабораторних пробах, проте представляється можливим на якісному рівні (більше або менше) виявити їх присутність в продуктах руйнування вуглепородного масиву методом рентгеноструктурного аналізу, що дозволить здійснювати

порівняльний аналіз проб вуглепородного масиву, зруйнованого динамічними навантаженнями різної інтенсивності.

Рентгеноструктурний або дифракційний метод є, як відомо [8], одним з ефективних методів діагностики кристалів. Однак в силу обмеженості точності рентгенівської апаратури часто буває важко сказати, чи є тверде тіло кристалом з дуже дрібними кристалами або склом з аморфною структурою. При дослідженні даним методом найменших кристалічних частинок, наприклад частинок кварцового пилу, на рентгенівському спектрі чітко виділяється так звана зона «аморфізації». Чим більше надмалих частинок є в аналізованій пробі, тим вище інтенсивність, вимірювана, зазвичай, в імпульсах на секунду, відбитого від частки рентгенівського пучка. На рентгеноструктурних діаграмах зона «аморфізації», пов'язана зі надмалими частинками породного пилу, на осі абсцис обмежена значеннями кута $2\theta = 5-20^\circ$.

Рентгеноструктурні дослідження проводилися на установці ДРОН-3 за стандартною методикою, при цьому як джерело рентгенівського пучка використовувалася трубка з Cu-K_α випромінюванням.

В якості зразків були обрані породи вугленосної товщі, руйнування яких здійснюється з використанням енергії вибуху, тобто міцні мономінеральні вапняки з невеликою кількістю домішок, зазвичай кварцу і полімінеральних пісковиків, до складу яких входить кварц (50-55%), польові шпати (плагіоклаз + ортоклаз – 20-25%), карбонати (кальцит – 20-25%), слюди (переважно мусковіт – 1,2%) і пірит (марказит – не більше 1-2%).

Так як в основу рентгеноструктурного аналізу покладено закон Брегга, що описує дифракцію рентгенівських променів в кристалічній речовині, то дослідження на вугіллі, яке також руйнується менш інтенсивними динамічними навантаженнями (як правило, ударними) або різанням, не проводилися, оскільки вугілля не має кристалічної структури і є аморфною речовиною.

Відібрані зразки порід кубічної форми з розміром ребра 40 ± 2 мм піддавалися вибуховому руйнуванню зарядом ВР бризантної дії масою 150 мг. Вибуховими навантаженнями руйнували сухі зразки і зразки ослаблені дією

різних ПАР (10% розчини NaHCO_3 і Na_2CO_3 , вапняне молоко – щільність $1,12 \text{ г/см}^3$ при 20°C , концентрація 18,9% гідроксиду кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Пиловидну фракцію (0-50 мкм) вивчали після розсіювання на лабораторних ситах продуктів руйнування.

На рис. 3.15 і 3.16 наведено рентгенівські дифрактограми продуктів руйнування вапняку і пісковика.

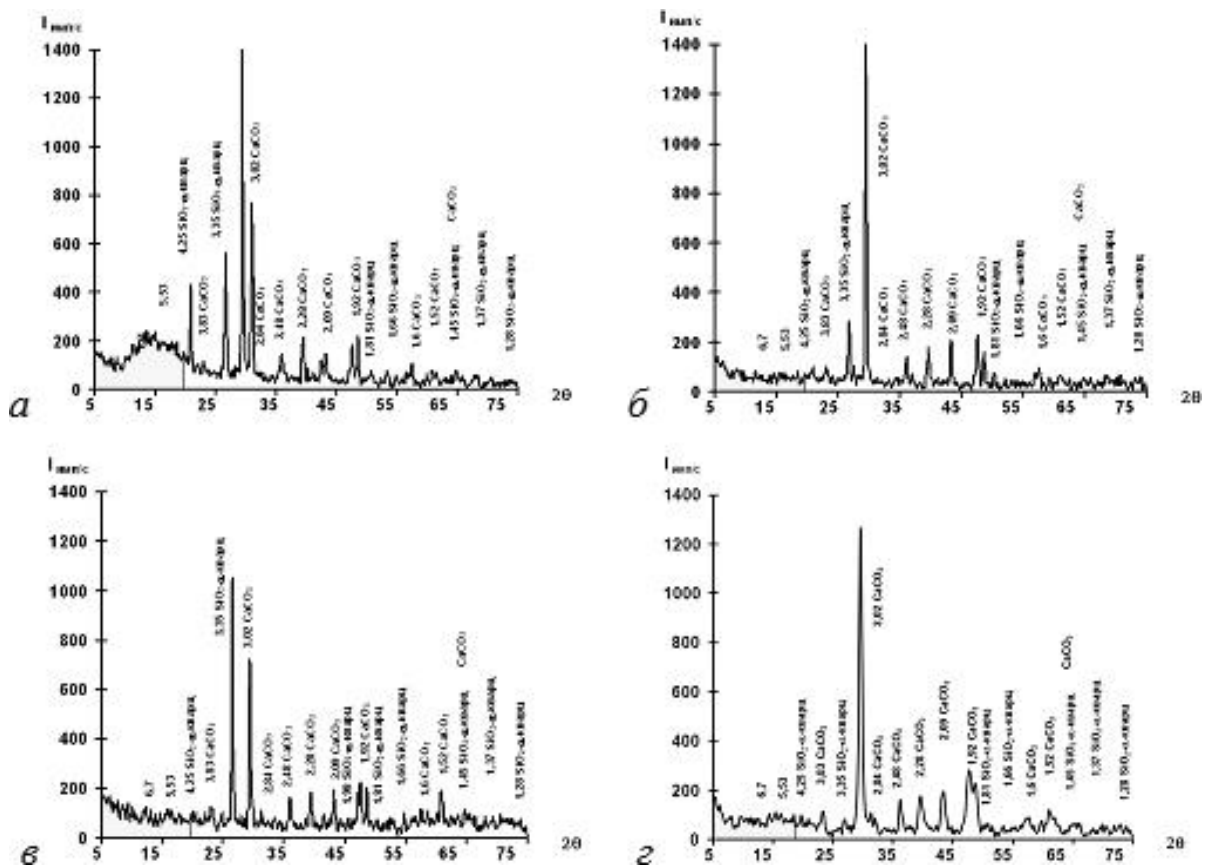


Рисунок 3.15 – Рентгенівські дифрактограми наддрібних частинок вапняку ПАТ «ДФДК» (Cu-K_α випромінювання), зруйнованого зарядом тена, масою

150 мг:

а – сухий зразок; б, в – зразки, насичені, відповідно 10% розчином Na_2CO_3 і 10% розчином NaHCO_3 ; г – зразок, насичений вапняним молоком. Затемнена область – зона «аморфізації»

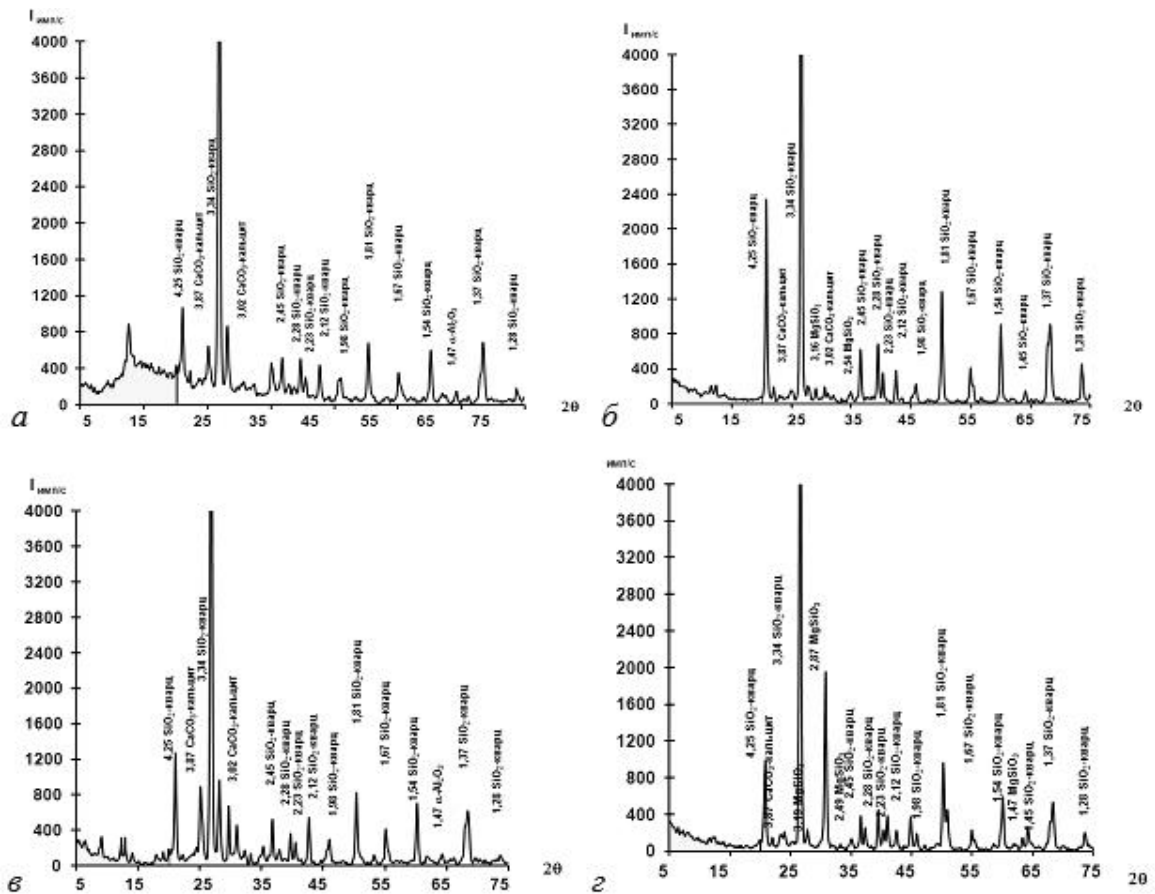


Рисунок 3.16 – Рентгенівські дифрактограми наддрібних частинок пісковиків шахти Дніпровська (Cu-K_α випромінювання), зруйнованого зарядом тена, масою 150 мг:

а – сухий зразок; б, в – зразки, насичені відповідно 10% розчином Na₂CO₃ і 10% розчином NaHCO₃; г – зразок, насичений вапняним молоком. Затемнена область – зона «аморфізації»

Аналіз рентгенівських дифрактограм зруйнованих вибухом зразків вапняку і пісковиків, оброблених різними видами ПАР проводили шляхом порівняння сумарної інтенсивності відбитого рентгенівського пучка в зоні «аморфізації», що знаходиться в інтервалі кутів $2\theta = 5-20^\circ$.

Величину сумарної інтенсивності (імп/с) визначали на рентгенівських дифрактограмах, побудованих в середовищі Microsoft Office Excel. Результати аналізу наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати рентгеноструктурного аналізу зразків вапняку і пісковика, оброблених ПАР і зруйнованих вибухом заряду тена масою 150 мг

Тип породи і місце відбору зразка	Поверхнево-активна речовина	Сумарна інтенсивність відбитого рентгенівського пучка в зоні «аморфізації» ($2\theta = 5-20^\circ$), імп/с
1	2	3
Вапняк дрібнозернистий, ПрАТ «Докучаєвський флюсодоломітний комбінат», Центральний кар'єр	Сухий зразок	23377,96
	Вапняне молоко (водний розчин 18,9 % $\text{Ca}(\text{OH})_2$).	12532,57
	10 % розчин NaHCO_3	14641,20
	10 % розчин Na_2CO_3	9998,65
Пісковик дрібнозернистий, шахта «Дніпровська»	Сухий зразок	49995,91
	Вапняне молоко (водний розчин 18,9 % $\text{Ca}(\text{OH})_2$).	17518,26
	10 % розчин NaHCO_3	16961,45
	10 % розчин Na_2CO_3	12425,96

Аналіз рис. 3.15 і 3.16, а також даних, наведених в табл. 3.4, дозволив встановити:

– найбільша сумарна інтенсивність відбитого рентгенівського пучка в зоні «аморфізації» ($2\theta = 5-20^\circ$) спостерігається для сухих (необроблених ПАР) зразків, зруйнованих дією вибуху, причому, для надмалих частинок пісковика вона більш ніж в 2 рази більше, ніж для вапняку;

– при вибуховому руйнуванні зразків вапняку і пісковика, насичених різними видами ПАР, сумарна інтенсивність відбитого рентгенівського пучка істотно знижується, при цьому максимальне зменшення сумарної інтенсивності спостерігається для вапняку і пісковика, оброблених 10% розчином бікарбонату натрію (Na_2CO_3), в 2,34 рази для вапняку і в 4 рази для пісковика.

Оцінка об'єму надмалих частинок в продуктах руйнування вуглепородного масиву методом рентгеноструктурного аналізу в цілому показала наступне.

Утворення найдрібніших частинок, розмір яких менше 1 мкм, в міцних гірських породах вуглепородного масиву, таких як вапняки і пісковики, при їх

руйнуванні інтенсивними динамічними навантаженнями обумовлене особливостями механізму дії вибуху в полімінеральних середовищах. При цьому на характер руйнування полімінерального середовища основний вплив надають два фактори: перший фактор – явище розгалуження зростаючої мікротріщини на хвильовій стадії вибуху, коли швидкість росту тріщини перевищує величину, рівну $0,6c_s$ – швидкості поперечної хвилі в породі, яка руйнується [9], і другий фактор – наявність дефектів в будові мінеральних зерен у вигляді внутрішньозернових і міжзернових мікротріщин, площин спайності мінералів, міжзернових контактів і різного роду включень (найдрібніших бульбашок газу і рідини), по яким розвиваються новоутворені поверхні руйнування.

У вапняках, як показав мікроструктурний аналіз, проведений нами на прозорих петрографічних шліфах, дефектами внутрішньої будови породи є в основному міжзернові контакти, в пісковиках дефектів внутрішньої будови значно більше і присутні вони як у вигляді контактів між зернами породоутворюючих мінералів, так і в самих мінеральних зернах у вигляді внутрішньозернових мікротріщин, площин газорідких включень в кварці і площин спайності в польових шпатах.

За даними роботи [10], в 1 см^3 кварцу – одного з головних породоутворюючих мінералів пісковіку – може бути присутнім до 2×10^9 різного роду включень (дефектів будови). Оскільки дефекти будови мінералів є однією з основних причин утворення надмалих частинок на контакті «вибухова речовина-порода», то їх сумарний об'єм в зруйнованому піщанику повинен істотно перевищувати об'єм найдрібніших продуктів руйнування у вапняку, що підтверджується даними рентгеноструктурного аналізу.

У породах, насичених ПАР, реалізація дефектів будови в тріщини при динамічному впливі на середовище, що руйнується, найімовірніше відбувається в значній мірі по лінії контактів мінеральних зерен і, можливо, по внутрішньозерновим мікротріщинам. Внутрішньозернові дефекти будови (інтрагранулярні

мікротріщини, площини спайності і т.п.) не надають в ослабленій дією ПАР породі впливу на характер її вибухового руйнування.

Виходячи з вищевикладеного, об'єм надмалих частинок в продуктах руйнування полімінеральних порід може бути істотно зменшений при їх обробці поверхнево-активними речовинами, а рентгеноструктурний аналіз може слугувати в якості одного з надійних способів контролю ефективності різних видів ПАР, застосовуваних для зниження рівня запиленості атмосфери шахт і рудників надмалими частинками породи.

3.4 Експериментальні дослідження впливу конструкцій зарядів ВР на вибухове руйнування твердих порід на моделях з оптично активних матеріалів

Одним із важливих факторів, які визначають умови і ефективність вибуху шпурових зарядів, є внутрішня набійка. Її величина та якість значною мірою визначають ступінь використання енергії вибуху для руйнування гірського масиву, рівномірність його подрібнення. Численні дослідження різних конструкцій набійки та застосованих матеріалів дозволили зробити висновок, що шляхом збільшення довжини набійки можливо збільшити час дії вибуху на масив, який руйнується (замикаючий ефект), і при цьому значно знизити максимальну швидкість вильоту продуктів вибуху із устя свердловини.

Більшість розроблених методів управління подрібненням гірських порід оснований на рішеннях, в основі яких лежить зміна коефіцієнта передачі енергії вибуху заряду вибухової речовини в частину масиву, яка руйнується. В цьому відношенні різні конструкції зарядів і склад набійки є важливими. В результаті досліджень встановлено, що поведінка і ефективність набійки під час вибуху залежать від фізико-механічних властивостей матеріалу набійки, розміру його частинок, стисливості, зчеплення зі стінками зарядної порожнини та ін. Відомо, що одним з основних чинників, які визначають вихід пилу при руйнуванні порід вибухом, є кількість заряду вибухової речовини, яка знаходиться в прямій

залежності від ефективності вибуху зарядів. Вона визначається, в свою чергу, конструкцією і складом внутрішньої набійки шпурів.

При розробці корисних копалин з використанням енергії вибуху (проходка капітальних і підготовчих гірничих виробок в скельних породах) відбувається утворення дрібнодисперсного кварцового (силікоzoneбезпечного) пилу внаслідок розкриття численних дефектів будови, мікротріщин в кварцових зернах на контакті «вибухова речовина-порода». Це пов'язане зі збільшенням міцності вуглевмісних порід при процесах літіфікації діагенезу і зміні петрографічного складу.

Одним з головних недоліків при руйнуванні порід вибухом є утворення значної кількості дрібнодисперсного пилу розміром 0,5-5 мкм. Цей пил важко пригнічується і є найбільш небезпечним для людини. Адсорбція на його поверхні отруйних газів підвищує агресивність цього пилу і сприяє швидкому розвитку у працюючих в шахтах професійних захворювань, в тому числі пов'язаних з органами дихання – пневмоконіозу і хронічного пилового бронхіту.

Головним питанням при руйнуванні порід вибухом є процес підвищення рівня промислової безпеки, що пов'язано з впровадженням нових вибухових матеріалів та технологій.

У початковий момент розвитку вибуху відбувається ущільнення набійкового матеріалу за рахунок впливу на торець набійки ударної хвилі і поршневого тиску продуктів детонації.

В результаті такого ущільнення на контакті набійки зі стінками шпуру виникають сили бокового розпору. Оскільки ці сили більше опору зсуву набійкового матеріалу, то під час вибуху набійка не ковзає по стінках шпуру, а зрізається по циліндричній поверхні. Тому процес викидання набійки зі шпуру можна представити таким чином:

З моменту початку вибуху газоподібні продукти детонації, впливаючи на торець набійки, прагнуть зрушити її. До тих пір, поки не відбудеться її зрушення, опір виштовхувальній дії продуктів детонації виявляється більше сил

внутрішнього тертя і зчеплення частинок набійкового матеріалу за рахунок інерції спокою власної маси набійки. Але відразу ж після ущільнення набійкового матеріалу відбувається зрушення набійки і надалі її переміщенню перешкоджають тільки вага і сили внутрішнього тертя. Проміжок часу з моменту завершення детонації до початку відриву і зсуву порід залежить від величини тиску продуктів детонації в шпурі та швидкості детонації вибухової речовини, характеру руйнуючих порід (їх міцність і тріщинуватість) і ін.

Нехай для деяких конкретних умов час відриву і зсуву порід визначається величиною t_p (рис. 3.17). Конструкцію набійки, а отже, і час її руху в шпурі з моменту початку детонації до повної розгерметизації шпуру можна підібрати такою, що він буде збігатися з моментом відриву і зсуву порід (т. 1 на рис.3.17).

Якщо конструкція набійки така, що сумарний опір сил тертя зсуву набійки менше сили, що виштовхує продукти детонації, то спостерігається підвищення швидкості її руху в шпурі. У цьому випадку повний час вильоту набійки t_1 буде менше t_p на величину Δt_1 (т. 2 на рис.3.17).

Отже, в цьому випадку продукти детонації будуть впливати на масив не весь час t_p , а тільки в проміжку часу $t_1 = t_p - \Delta t_1$. В результаті цього частина енергії вибуху, що витрачається на руйнування гірського масиву, буде менше максимально можливої. У цих умовах швидкість виходу продуктів детонації з шпуру значно зростає. Крім цього, частина заряду вибухової речовини не встигає детонувати, викидається з шпуру і догорає після вибуху, підвищуючи концентрацію вибухових газів в атмосфері гірничої виробки. Руйнування гірських порід в цьому випадку буде незадовільним.

Якщо конструкція набійки така, що сумарний опір сил тертя по поверхні зсуву набійки більше виштовхує її сили продуктів детонації, то час її вильоту з шпуру t_2 буде більше часу t_p на величину $\Delta t_2 = t_2 - t_p$ (т. 3 на рис.3.17).

Таким чином, до моменту відриву і зрушення порід верхня частина зарядної камери Δl залишається заповненою набійкою. Стінки зарядної камери в цій зоні не будуть піддаватися безпосередньому впливу продуктів детонації і,

отже, подрібнення масиву в цьому місці буде незадовільним, що призводить до підвищення виходу негабариту гірської породи після вибуху.

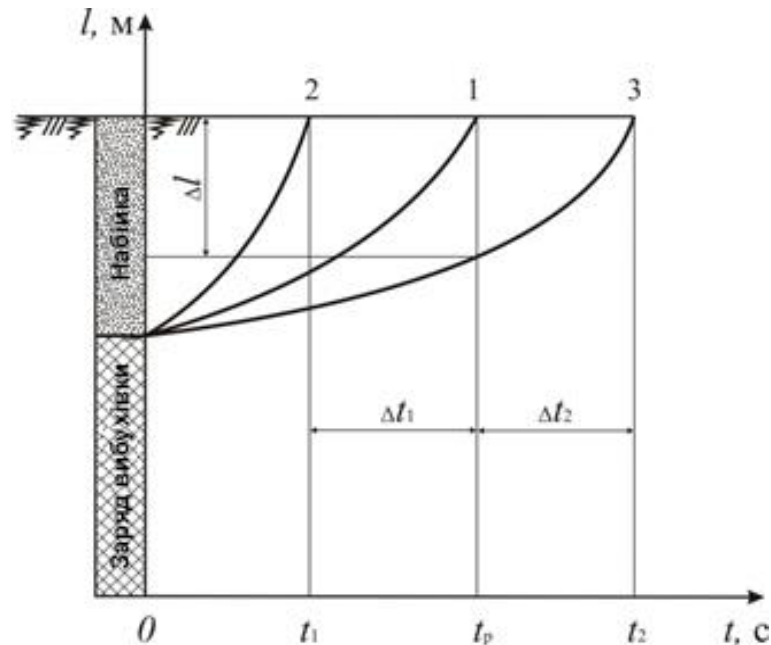


Рисунок 3.17 – Час вильоту набійки зі свердловини при зміні її параметрів

Тому дослідження конструкцій набійки шпурових зарядів, що підвищують якість вибуху, є актуальним завданням.

Традиційним шляхом зниження утворення пилу при проведенні підготовчих виробок у вугільних шахтах є використання таких конструкцій шпурових зарядів, що дозволяють збільшити час вибухового впливу на масив, який руйнується. Зокрема, при використанні набійок, які розширюються, відбувається перерозподіл енергії вибухової речовини по всій колонці заряду і зниження питомого імпульсу в ближній зоні вибуху, що є основним джерелом утворення дрібнодисперсного пилу.

У Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» розроблено новий склад набійки, яка розширюється при затвердінні [13], що дозволяє значно скоротити витрати на її виготовлення. Випробування набійки з новим складом при вибуховому руйнуванні моделей, виготовлених з міцного піщанику за спеціальною методикою, дозволило встановити її ефективність.

Вивчення характеру руйнування твердих середовищ залежно від матеріалу набійки в конструкції заряду ВВ проводилося в лабораторних умовах на об'ємних моделях з органічного скла відповідно до апробованих методами досліджень руйнування твердих середовищ вибухом [11].

Розмір моделей був вибраний виходячи з необхідності усунення впливу вільних поверхонь на розвиток зони тріщиноутворення за рахунок дії відбитих хвиль напружень. Період часу, необхідний для формування зони тріщиноутворення, не повинен бути менше (більше) подвоєного часу проходження хвилі стиснення до меж зразка, а лінійний розмір моделі повинен бути в 2 рази більше зони тріщиноутворення.

Для якісного вивчення процесу виникнення і поширення хвиль напружень, а також характеру тріщиноутворення в об'ємних моделях з органічного скла при їх руйнуванні вибухом заряду вибухової речовини різної конструкції проведено лабораторні дослідження з використанням методу швидкісної фотореєстрації процесу в поєднанні з поляризаційно-оптичним методом дослідження напружень в режимі затримки часу, згідно з розробленою методикою.

Характер руйнування моделі реєстрували з використанням спеціального стенда, який складається з фотореєструючої установки СФР-2М, імпульсної лампи ІСШ-300, системи лінз, фокусуючих світловий потік, пульта управління, вибухової камери, батареї накопичувальних конденсаторів і електронного приладу для синхронізації вибуху заряду ВР у моделі зі спалахом імпульсної лампи. Загальний вигляд стенда наведено на рис. 3.18.

Відповідно до розробленої методики досліджень експерименти проводилися в лабораторних умовах на моделях призматичної форми розміром 200x200x150 мм, яка була обрана виходячи з розміру поля зору камери СФР-2М. Основні вимоги до моделі середовища – можливість вивчати процес тріщиноутворення і зрушення в часі середовища, що руйнується вибухом заряду вибухової речовини різних конструкцій.

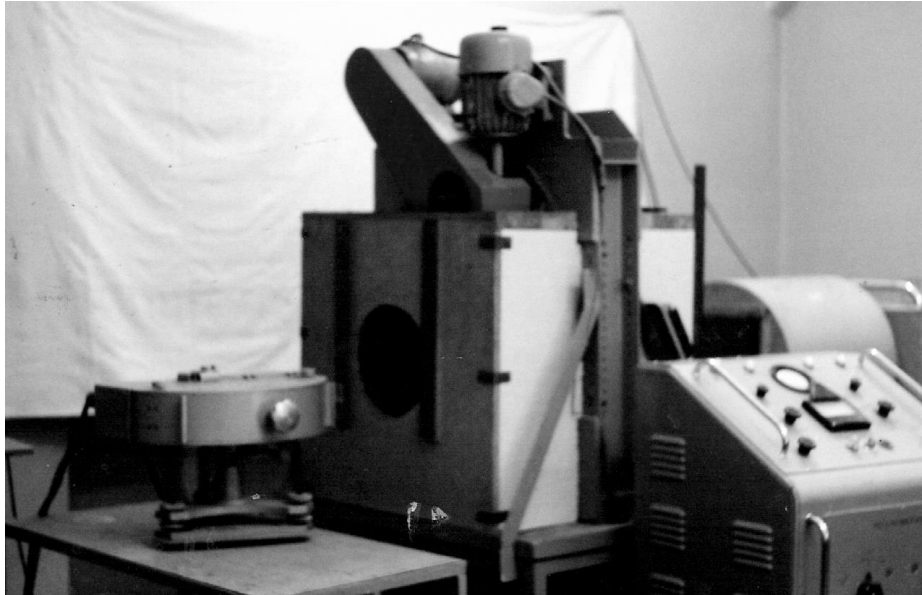


Рисунок 3.18 – Стенд для швидкісної фотореєстрації швидкопротікаючих процесів

У підготовлених до досліджень моделях в центрі однієї з граней свердлили шпур довжиною 105 мм і діаметром 6 мм. Так як використання штатних сумішевих ВР, застосовуваних в промислових умовах, не забезпечує стабільність детонації зарядів в експериментальних вибухах через великі значення критичного діаметра, то в якості ВР використовували сумішеві заряди на основі тена, який має малий критичний діаметр (2-4 мм) . Для збільшення довжини колонки заряду і зміни детонаційних характеристик базового ВР – тена, в нього додавалося тверде ракетне паливо (ТРП). По заміреним швидкостям детонації сумішей розраховувалися параметри ВР, що характеризують їх вплив на середовище, і визначалися оптимальні параметри сумішевих співвідношень зарядів по стійкості детонації [12]–[13].

У даному випадку вибрано співвідношення рівне 80% тена + 20% ТРП. Експериментальні дані і результати розрахунків наведено в табл. 3.5.

При зміні масової частки ТРП щільність сумішей лишалася незмінною, рівною щільності чистого тена, який має швидкість детонації $D_{BP} = 5250$ м/с і щільність $\rho_{BP} = 935$ кг/м³.

Таблиця 3.5 – Основні характеристики сумішевих складів зарядів ВР

Масова частка ТРП в сумішах з тенном	Швидкість детонації сумішей, D_{BP} , м/с	Розрахунковий тиск на стінки зарядної порожнини, P_c , ГПа	Розрахункова теплота вибуху Q , кДж/кг	Щільність, ρ_{BP} , кг/м ³	Акустичний імпеданс ВР, $\rho_{BP} D_{BP} \cdot 10^{-7}$, кг/(м ² ·с)
0	5250	3,22	5635	935	0,49
0,1	5150	3,10	5120		0,48
0,2	4900	2,81	4910		0,46
0,3	4500	2,37	4140		0,42
0,4	3700	1,60	2800		0,35
0,5	2800	0,92	1603		0,26

Маса сумішевого заряду у всіх експериментах становила 200 мг, а його довжина 20-22 мм. Ініціювання зарядів виробляли за допомогою ніхромового містка з навішуванням азиду свинцю масою 10 мг. Методикою експериментів передбачалося встановлення параметрів зйомки. Так, допустиме зміщення зображення на фотоплівці розраховували за формулою:

$$\Delta = \frac{1}{0,7N},$$

де N – роздільна здатність плівки.

Швидкість зсуву зображення на фотоплівці визначали відповідно до рівняння:

$$v_{cm} = v\beta,$$

де v – швидкість розвитку вибуху;

β – масштаб зйомки (поперечне збільшення).

Звідси час експонування одного кадру можна знайти з виразу:

$$t_{ek} = \frac{\Delta}{v_{cm}} = \frac{1}{v\beta N \cdot 0,7}.$$

Слід розрізняти час експонування одного кадру $t_{ек}$ і період зміни сусідніх кадрів T .

Практично час $t_{ек}$ завжди буде менше періоду T , в зв'язку з чим слід ввести поняття свердловинності, яке визначається за рівнянням:

$$\mu = \frac{T}{t_{ек}}.$$

Отже, формула для визначення частоти зйомки набуде вигляду:

$$\nu = \frac{1}{\mu t_{ек}} = \frac{0,7}{\mu} \nu \beta N.$$

Вважаючи, що на час закінчення зйомки зображення заповнить весь кадр, висловимо масштаб зйомки через:

$$\beta = \frac{b_2}{D_{ма}} = \frac{f_k}{L},$$

де b_2 – розмір кадру;

$D_{ма}$ – максимальний об'єкт зйомки;

f_k – фокусна відстань камери;

L – відстань до об'єкта зйомки.

Беручи абсолютну похибку вимірювання на плівці, яка дорівнює величині $\Delta = 1/N$ і визначається фотографічним дозволом камери, висловимо середню відносну похибку вимірювання як:

$$\delta_{cp} = \frac{\Delta}{b_2/2} 100\% = \frac{200}{b_2 N}, \%$$

З огляду на β і δ_{cp} у формулі для визначення частоти зйомки, отримаємо:

$$\nu = \frac{1,4\nu}{\mu \cdot D_{\max} \delta_{cp}}.$$

Повний час реєстрації t_n , виходячи з швидкості поширення процесу ν і частоти зйомки ν визначається з виразу:

$$t_n = \frac{D}{2\nu_{cp}}$$

а загальну кількість кадрів:

$$P = \frac{t_n}{\mu t_{\text{эк}}}$$

Розрахунки за наведеними формулами дають такі значення параметрів зйомки:

– для хвильового процесу (при $\nu = 2800$ м/с, $D = 0,15$ м, $\mu = 1,2$; $\delta_{cp} = 2\%$)
 $\nu = 1 \cdot 10^6$ кадр/с, $t_n = 2,7 \cdot 10^{-5}$ с, $P = 27$ кадрів;

– для процесу утворення тріщин (при $\nu = 840$ м/с) $\nu = 3,3 \cdot 10^5$ кадр/с,
 $t_n = 9 \cdot 10^{-5}$ с, $P = 30$ кадрів. В процесі експериментів було встановлено, що оптимальна швидкість кінозйомки для аналізу процесу руйнування середовища, часу початку вильоту набійки, характеру тріщиноутворення середовища від вибуху заряду ВР склали відповідно $\nu = 15000$ кадр/с і $\nu = 30000$ кадр/с.

Підрив і синхронізація процесу реєстрації вибуху заряду ВР в середовищі, яке руйнується, здійснювалися шляхом включення в схему роботи стенда спеціального електронного приладу для синхронізації роботи камери і імпульсної лампи, до виходу її на режим з затримкою за часом підриву електродетонаторів. Структурна схема системи наведена на рис. 3.19.

Принцип роботи схеми: від високовольтного джерела живлення 2 заряджаються до напруги 3 кВ конденсатори 6; в момент подачі з пульта управління 1 камери СФР-2М імпульсу, який підпалює від високовольтного генератора, відбувається розряд конденсаторів 6 на імпульсну газонаповнену лампу 5 ІСШ-300 з наступним запуском приладу синхронізації і затримки 3 котушкою 4, в якій наводиться ЕРС від імпульсу струму, що протікає через контур і включає імпульсну лампу. Електродетонатором 7, шляхом регулювання часу затримки, виконується ініціювання заряду вибухової речовини в моделі.

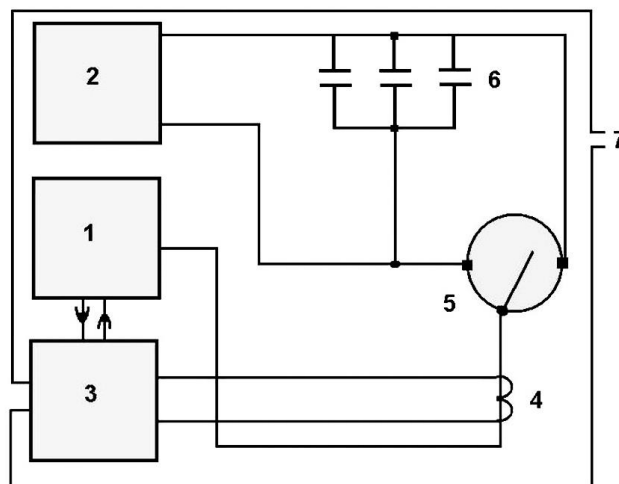


Рисунок 3.19 – Блок-схема фотореєстрації процесу руйнування напружених середовищ вибухом: 1 – пульт управління камери СФР-2М; 2 – джерело високої напруги; 3 – прилад синхронізації і затримки підриву електродетонаторів; 4 – котушка запуску приладу синхронізації; 5 – імпульсна лампа ІСШ-300; 6 – магазин конденсаторів; 7 – електродетонатор

У пробурених зарядних порожнинах моделей формувалися різні конструкції зарядів: з піщано-глинистої набійкою, піщаною та сумішевою набійкою, яка розширюється при твердінні, основним компонентом якої є піщано-глиниста суміш з додаванням доломітового пилу, алюмокалієвих квасців, водного розчину лігносульфонатів [3].

Довжина досліджуваної набійки в шпурі перебувала в межах 6-10 діаметрів заряду ($\approx 20-22$ мм).

Кінограми процесу руйнування моделей зображені на рис. 3.20 і рис. 3.21. Як видно з рисунків, для всіх серій експериментів, на перших кадрах реєстрації процесу, через 10 мкс після детонації заряду, фронт ударної хвилі, що поширюється попереду, відбиваючись від стінки шпуру і впливаючи на середовище, яке руйнується, створює хвилю напружень, які поширюються уздовж осі заряду до вільних поверхонь моделі, сприяє розвитку системи тріщин. І вже до 68 мкс формується мережа тріщин уздовж всієї колонки заряду.

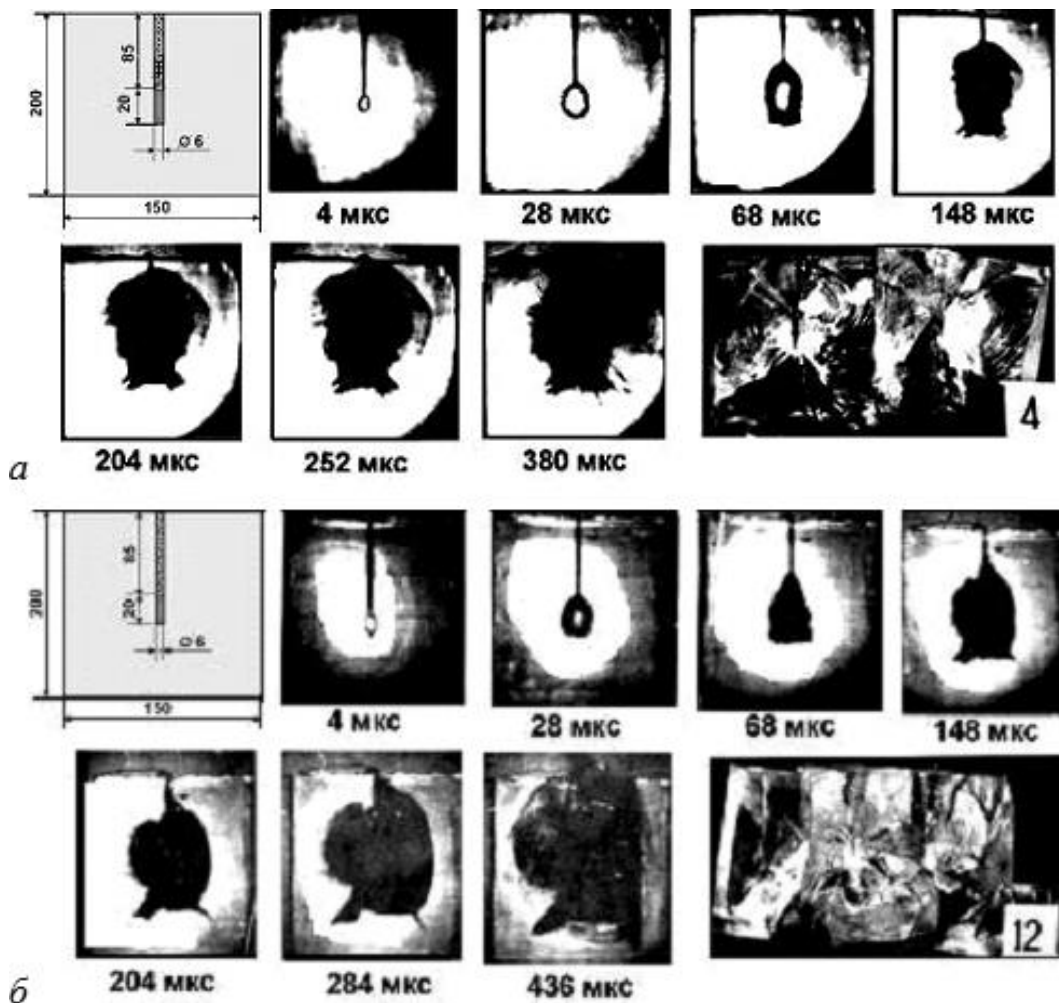


Рисунок 3.20 – Кінограми процесу руйнування моделі вибухом сумішевого заряду вибухової речовини масою 200 мг: а – набійка піщано-глиниста; б – набійка з піску довжиною $l_{наб} = 5,4 l_{вр}$

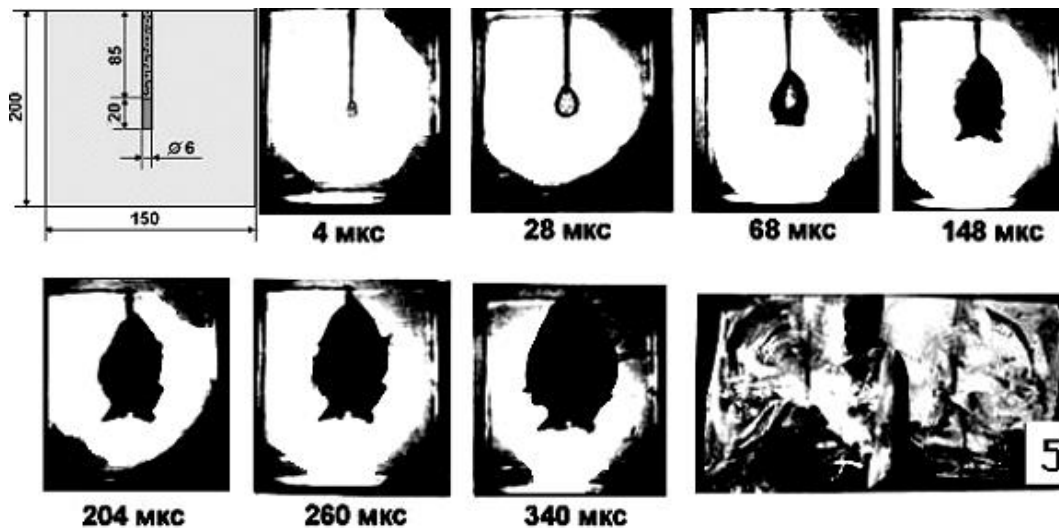


Рисунок 3.21 – Кінограми процесу руйнування моделі вибухом сумішевого заряду вибухової речовини масою 200 мг (набійка твердіюча $l_{наб}=5,4 l_{вр}$)

Подальші кадри показують наростання утворення тріщин і збільшення порожнини руйнування моделі, починаючи від торця зарядної порожнини як в глиб моделі, так і в напрямку до її устя.

Об'єми порожнини руйнування залежать від типу застосовуваної набійки в конструкції заряду ВР.

Встановлено, що граничний час початку її вильоту з піску, глини та піщано-глинистої суміші відповідає 340-380 мкс, а для набійки з суміші, яка твердіє, – 450-480 мкс.

Аналіз вибухів суцільного заряду (рис. 3.20, а), наприклад з піщано-глинистою набійкою, показує, що фронт руйнування середовища набуває овальної форми спочатку розвитку процесу (4-68 мкс), а в донній частини шпуру – формуються і поширюються явно виражені тріщини в глиб забою за область проектного руйнування на глибину до трьох-п'яти діаметрів шпуру.

Дещо інша картина процесу руйнування середовища спостерігалася під час вибуху заряду з піщаною набійкою (рис. 3.20, б).

Тріщини в глиб моделі зменшуються і мають тенденцію відхилення від осі шпуру, тоді як в сторону устя шпуру збільшується об'єм передбачуваної воронки руйнування з утворенням розвиненої системи тріщин різної спрямованості.

При руйнуванні моделей зарядами ВР з набійкою з суміші, яка твердіє (рис. 3.21), спостерігається формування трапецієподібного фронту руйнування з розвитком тріщин як в глиб моделі, так і збільшення воронки руйнування до устя шпуру.

Зовсім інша картина руйнування моделі спостерігається на завершальному етапі розвитку процесу. Так, фронт руйнування, що рухається по моделі від вибуху сумішевого заряду вибухової речовини з набійкою з суміші, яка твердіє, має складну конфігурацію, що складається з орієнтованої системи тріщин в торцевій частині заряду, що має форму усіченого конуса, спрямовану більшою основою в глиб моделі під кутом $45-50^\circ$, зі збільшенням зони руйнування до 20-30 радіусів заряду і радіусу воронки викиду в зоні устя шпуру. Порівняльні результати експериментальних вибухів зарядів ВР з різними типами набійок наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати експериментальних вибухів сумішевого заряду вибухової речовини з різними типами набійки

Тип набійки	Довжина набійки	Час початку тріщиноутворення, мкс	Час початку вильоту набійки, мкс	Об'єм воронки руйнування V , 10^{-6} м^3
Піщано-глиниста	5,4 $l_{\text{ВВ}}$	116	188	0,65
Пісок	5,4 $l_{\text{ВВ}}$	116	200	0,78
Твердіюча суміш	5,4 $l_{\text{ВВ}}$	116	252	1,04

Таким чином, виконаними дослідженнями встановлено, що набійка з твердіючою сумішшю на 20% збільшує час перебування її в шпурі в порівнянні з іншими конструкціями зарядів, створюючи надійне замикання продуктів детонації. Це дозволяє збільшити тривалість впливу енергії вибуху на середовище, що руйнується. При цьому тривалість замикання газоподібних продуктів детонації в зарядній камері зростає до 100 мкс, що на 64 мкс більше в

порівнянні з набійкою з глини і на 52 мкс в порівнянні з набійкою з піску, тобто в 1,5-2,0 рази.

Використання ПАР сприяє зменшенню силікозо- і пневмокніозонебезпечності і концентрації пилу в гірничій виробці, що утворюється під час проведення підричних робіт, за рахунок зміни механізму руйнування вуглепородного масиву, що забезпечує істотне зменшення виходу дрібнодисперсної фракції в момент підривання породи в зв'язку зі зростання середнього діаметра дрібнодисперсних частинок, що утворюються на контакті «ВР-порода».

Висновки за розділом 3

Під час руйнування вибуховими навантаженнями зразків міцного темно-сірого пісковика і вугілля ш. Дніпровська (Західний Донбас) при цілеспрямованому зменшенні їх міцності шляхом обробки ПАР, які характеризуються лужною реакцією, встановлено:

У необроблених ПАР пісковиках новоутворені поверхні руйнування формуються в основному по внутрішньозерновим дефектам будови кварцу.

У насичених лужними розчинами ПАР пісковиках, де вміст мінералу кварцу перевищує 40%, зміна механізму руйнування відбувається на мікрорівні, при цьому новоутворені поверхні формуються по контактам зерен кварцу з іншими мінералами в породі.

Зі зменшенням міцності пісковика і вугілля, що пов'язано з дією ПАР, зростає середній діаметр дрібнодисперсних частинок, що утворюються на контакті «ВР-порода».

При обробці вугілля вапняним молоком в продуктах руйнування діаметр дрібнодисперсних частинок збільшується і, крім того, практично відсутні уламки кварцових зерен, що спостерігаються в пилоподібних фракціях при насиченні зразків намагніченою водою, харчовою та кальцинованою содою.

Зміна механізму руйнування вуглепородного масиву під дією ПАР сприяє зменшенню силікозо- і пневмоконіозонебезпечності і зниження концентрації пилу в гірничій виробці, що утворюється під час проведення підричних робіт, за рахунок швидкого осідання пилоподібних частинок під дією сил гравітації.

Вперше для оцінки об'єму надмалих частинок (менше 1 мкм) в продуктах руйнування вуглепородного масиву застосовано метод рентгеноструктурного аналізу, який дозволив встановити:

- найбільша сумарна інтенсивність відбитого рентгенівського пучка в зоні «аморфізації» ($2\theta=5-20^\circ$) спостерігається для сухих (необроблених ПАР) зразків, зруйнованих дією вибуху, причому, для надмалих частинок пісковику вона більша в 2 рази, ніж для вапняку;

- при вибуховому руйнуванні зразків вапняку і пісковику, насичених різними видами ПАР, сумарна інтенсивність відбитого рентгенівського пучка істотно знижується, при цьому максимальне зменшення сумарної інтенсивності спостерігається для вапняку і пісковику, оброблених 10% розчином бікарбонату натрію (Na_2CO_3), в 2,34 рази для вапняку і в 4 рази для пісковику;

- об'єм надмалих частинок в продуктах руйнування полімінеральних порід може бути істотно зменшений при їх обробці поверхнево-активними речовинами, а рентгеноструктурний аналіз може слугувати в якості одного з надійних способів контролю ефективності різних видів ПАР, що використовуються для зниження запиленості атмосфери шахт і рудників надмалими частинками породи.

Список використаних джерел в розділі 3

1. Пат. № 91042 Україна МПК7 F 42 D 3/04 Спосіб моделювання вибухового руйнування гірських порід / В.І. Голінько, Я.Я. Лебедев, Д.В. Савельєв, К.С. Іщенко, І.Л. Кратковський; заявник і власник патенту ДВНЗ «НГУ». – № u2013 12831 від. 04.11.13; Опубл. Надра. 25.06.2014, Бюл. № 12.

2. Пат. № 109313 Україна МПК7 F 42 D 3/04. Спосіб моделювання вибухового руйнування гірських порід / В.І. Голінько, Я.Я. Лебедєв, Д.В. Савельєв, К.С. Іщенко, І.Л. Кратковський; заявник і власник патенту ДВНЗ «НГУ». – № а2013 11765 від. 07.10.13; Опубл.Надр. 10.08.2015, Бюл. № 15.

3. Golinko, V.I. Features of destruction of the coal-rock massif saturated with Surfactants / V.I. Golinko, D. V. Saveliev, Y.Y. Lebedev // Науковий вісник Національного гірничого університету. –Дніпропетровськ: 2015.–№5. – С. 98-104.

4. Барон Л.І. Кусковатість і методи їх вимірювання. – Видавництво АН, 1960. – 124 с.

5. Єфремов Є.І., Петренко В.Д., Кратковський І.Л., Шевченко С.В. Щодо впливу фракційного складу кварцовмісних порід на вміст силікозного пилу в продуктах їх руйнування [Текст] / Є.І. Єфремов, В.Д. Петренко, І.Л. Кратковський, С.В. Шевченко // Доповіді Академії наук України. – 1993. – №5. – С. 45-49.

6. Савельєв Д.В., Кратковський І.Л., Іщенко К.С. Вплив поверхнево-активних речовин на енергоємність руйнування масиву вугільних порід динамічними навантаженнями //Наука і виробництво. – 2015. – Випуск 1/2015(15). – С. 25-40.

7. Ярембаш І.Ф. Очищення шахтної атмосфери після вибухових робіт / І.Ф. Ярембаш. – Надра, 1979. – 191 с.

8. Томсон Р.М., Зейтс Ф.М. Будова твердих тіл. Мир, 1973. – Т.1. – С. 15-111.

9. Петч Н. Металографічні аспекти руйнування. Мир, 1973. – Т.1. – Р. 375-420.

10. Реддер Є. Геохімія гідротермальних рудних родовищ. Під редакцією Г. Л. Барнса. Мир, 1982. – С. 535-577.

11. Моделювання руйнівної дії вибуху в гірських породах / В.М. Комір, Л.М. Гейман, В.С. Кравцов, Н.І. Мячіна. Опубл. Наука, 1972. – 212 с.

12. Савельєв Д.В., Кратковський І.Л., Іщенко К.С. Вплив поверхнево-активних речовин на енергоємність руйнування вугільно-породного масиву динамічними навантаженнями // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. Науково-виробничий журнал. – 2015. – Випуск 1/2015(15). – С. 25-40

13. Пат. № 107156 Україна МПК 7 F42D 1/08, C04B33/20. Суміш для забивки шпурових зарядів / В.І. Голінько, Я.Я. Лебедев, Д.В. Савельєв, К.С. Іщенко, І.Л. Кратковський; заявник і власник патенту ДВНЗ «НГУ». – 2013 11763 від. 07.10.13.

4 РОЗРОБКА І ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБІВ І ЗАСОБІВ ЗНИЖЕННЯ ВИХОДУ ДРІБНОДИСПЕРСНОГО ПИЛУ ПРИ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ЕНЕРГІЄЮ ВИБУХУ

4.1 Обґрунтування складу набійки для зниження виходу дрібнодисперсної фракції пилу при вибухових роботах

Відомо, що одним з основних чинників, що визначає вихід пилу при руйнуванні порід вибухом, є кількість заряду ВР [1]–[2], яка в свою чергу залежить від ефективності вибуху свердловинних зарядів в цілому (залежить від конструкції і складу внутрішньої набійки свердловин).

Для підвищення якості набійки шпурових зарядів за рахунок поліпшення її фізико-механічних характеристик виконано дослідження по розробці раціонального складу пружно-пластичної суміші, яка розширюється при твердінні, і основними компонентами якої була обрана піщано-глиниста суміш з співвідношенням компонентів 1:3 і вода.

Пошук і обґрунтування оптимального співвідношення компонентів, які входять до складу суміші набійки, проводився з використанням лінійної моделі планування експериментів при пошуку оптимальних умов [3].

Для обґрунтування оптимального співвідношення компонентів піщано-глинистої суміші і води в складі набійки і виду добавок, що вводяться, а також процентного співвідношення їх до загальної маси готового набійкового матеріалу необхідно було встановити вплив цих співвідношень на якість суміші.

З цією метою до піщано-глинистої суміші додавали: 18,5% доломітового пилу фракції 0-0,2 мм; 13,5% лігносульфонатів; 4,5% алюмокалієвих квасців ($Kal(SO_4)_2 \cdot 10H_2O$) і до 100% доповнювали цю суміш водою.

Після затвердіння суміші визначалася її густина відповідно до чинних норм [4] за формулою:

$$\rho = \frac{M}{V}, \quad (4.1)$$

де M – маса суміші; V – об'єм суміші.

Оптимізацію складу набійки проводили зі зміни густини суміші шляхом введення різних співвідношень добавок до суміші: доломітового пилу фракції 0-0,2 мм і лігносульфонатів вологістю 13-15%. Зміна густини набійки при різних співвідношеннях добавок в суміші наведена в табл.4.1.

Таблиця 4.1 – Зміна густини набійки при різних співвідношеннях добавок

Тип добавок	Вміст добавок в суміші, %		
Доломітовий пил	17,0	18,5	20,0
Лігносульфонати	12,0	13,5	15,0
Величина густини $\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	2,10– 2,13	2,15–2,17	1,93–2,0

Як видно з табл.4.1, зі збільшенням співвідношення добавок, що вводяться в суміш, щільність затверділої маси зменшується. Це пояснюється тим, що при збільшенні співвідношення добавок, що вводяться до загальної маси суміші, збільшується її пористість через збільшення площі нової поверхні, що веде в свою чергу до зменшення густини упакування зерен, погіршення якості набійкового матеріалу і збільшення фільтраційних властивостей суміші.

За результатами експериментальних досліджень була розроблена технологія виготовлення твердіючої набійкової суміші, в якій в якості в'язучого компонента, що заповнює простір між частинками піщано-глинистої суміші, використовується доломітовий пил фракції 0-0,2 мм і вологістю 13-15%, а водний розчин лігносульфонатів дозволяє сформувати стабільну суміш високої густини, пластичності і рухливості при її транспортуванні, алюмокалієві галуни – високу міцність при її твердінні.

Отже, в результаті змішування наведених компонентів при оптимальному їх співвідношенні в суміші формується склад зі стійкими деформаційними і фізико-механічними характеристиками. Оскільки в поставленому завданні

необхідно було створити набійки, здатні розширюватися при твердінні, були випробувані для цих цілей лігносульфонати [5] – солі лігносульфонової кислоти – які досить дешеві і є відходами сульфитного способу отримання целюлози. Товарна назва цього продукту – «концентрати сульфитів-дріжджової бражки – КБТ, КБЖ».

Після підбору всіх компонентів, що входять до складу пропонованого набійкового матеріалу, необхідно встановити раціональне їх співвідношення, для чого використовувалася лінійна модель планування експерименту основана на варіюванні чинників за трьома рівнями [3].

Необхідна кількість дослідів N для реалізації всіх можливих поєднань рівнів чинників визначається за формулою:

$$N = n^k \quad (4.2)$$

де n – кількість рівнів;

k – кількість факторів.

В якості факторів, прийнятих в дослідженнях з обґрунтування оптимальних співвідношень компонентів у суміші, є процентний вміст доломітового пилу фракції (0-0,2 мм), води і лігносульфонатів, які змінюються за трьома рівнями –1; 0; +1 – при мінімальних, оптимальних і максимальних значеннях.

Результати розрахунків співвідношення основних компонентів в набійках наведено в табл. 4.2, 4.3.

На підставі табл. 4.2 і 4.3 було підготовлено 9 сумішей і проведено порівняльний аналіз за критерієм «максимальне розширення при твердінні і мінімальний час початку схоплювання суміші».

За результатами проведених досліджень отримано раціональне співвідношення компонентів, що входять до складу твердіючої суміші, що містить піщано-глиниста суміш, доломітовий пил, лігносульфонати, алюмокалієві галуни і воду при такому співвідношенні, в мас, %: піщано-

глиниста суміш –50-45; доломітовий пил фракції $d = 0,2$ мм вологістю 13-15% – 17-20; лігносульфонати –12-15; алюмокалієві галуни ($Kal (SO_4)_2 \cdot 10H_2O$) – 6-3 і вода –18-20.

Таблиця 4.2 – Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактор	Кодова позначка	Рівень		
		-1	0	+1
Вміст доломітового пилу фракції $d=0-0,2$ мм в суміші, мас. %	X1	17,0	18,5	20,0
Вміст лігносульфонатів в суміші, мас. %	X2	12,0	13,5	15,0
Вміст рідини в суміші, в мас. %	X3	18,0	19,0	20,0

Таблиця 4.3 – Значення співвідношень компонентів в суміші, в мас.%, при повному факторному експерименті

№ досліду	Код	Рівні	Вміст доломітового пилу фракції $d=0-0,2$ мм в суміші, мас. %	Код	Рівні	Вміст лігносульфонатів в суміші, мас. %	Код	Рівні	Вміст рідини в суміші, в мас. %
1	X1	-1	17,0	X2	-1	12,0	X3	+1	20,0
2		+1	20,0		-1	12,0		-1	18,0
3		-1	17,0		+1	15,0		-1	18,0
4		+1	20,0		+1	15,0		+1	20,0
5		-1	17,0		-1	12,0		-1	18,0
6		+1	20,0		-1	12,0		+1	20,0
7		-1	17,0		+1	15,0		+1	20,0
8		+1	20,0		+1	15,0		-1	18,0
9		–	18,5		–	13,5		–	19,0

За результатами повного факторного експерименту обґрунтовано раціональне співвідношення компонентів розроблених сумішей і визначено їх фізико-механічні характеристики [6]–[7]: щільність ρ , швидкість поздовжніх хвиль C_p , міцність на одноосьовий стиск і інші показники відповідно до чинних норм [4], [8]–[10], які наведено в табл. 4.4.

Застосування розробленого складу набійки із заданими характеристиками забезпечує перерозподіл енергії ВВ по всій колонці заряду і зниження питомого імпульсу в ближній зоні вибуху. Саме в цій зоні відбувається інтенсивне подрібнення породи з утворенням великої кількості дрібнодисперсного пилу, який потрапляє в рудникову атмосферу.

Таблиця 4.4 – Фізико-механічні характеристики розробленого складу суміші для набійки шпурів

Найменування показника	Одиниця виміру	Значення показника
Густина, ρ	кг/м ³	2150,0
Коефіцієнт внутрішнього тертя, $K_{вн}$.	-	0,53
Зчеплення, C	МПа	0,035
Коефіцієнт Пуассона, ν	-	0,35
Модуль Юнга, $E \cdot 10^3$,	МПа	2,34
Міцність суміші на одновісне стиснення P ,	МПа	10-15
Тиск набухання на контакт «Суміш - поверхня шпуру»	МПа	5-10

4.2 Динаміка концентрації дрібнодисперсного пилу з урахуванням використання ПАР при вибуховому руйнуванні гірських порід

Для перевірки ефективності розроблених способів і засобів зниження виходу дрібнодисперсного пилу при руйнуванні гірських порід енергією вибуху і адекватності математичної моделі, яка встановлює зв'язок між параметрами, що впливають на зміну концентрації дрібнодисперсного пилу по довжині виробки при її провітрюванні, були проведені порівняльні випробування в гірничих виробках на шахті «Покровська». Для проведення досліджень були обрані гірничі виробки, які проводяться по піщаниках із застосуванням буропідривних робіт.

Параметри провітрювання виробок (табл. 4.5) були розраховані відповідно до «Керівництва з проектування ...» [11] і вимог ПБ [12].

Таблиця 4.5 – Характеристика проведених виробок

Характеристика	Значення
Масив, який руйнується	Пісковики
Спосіб проведення виробки	Буропідривний
Площа перерізу виробки, м ² :	
- в проходці	11,2
- в світлі	9,0
Тип кріплення	СВП-27
Довжина виробки, м	400
Тип ВР	ПЖВ-20
Витрата ВР за цикл, кг	35
Способи боротьби з пилом:	Гідрознепилення; буріння з промиванням; зрошення приви́бійної зони; водоповітряні завіси

Методика виконання роботи полягала в наступному. Перед проведенням вибухових робіт у виробці (рис. 4.1) визначалися фактичні аеродинамічні параметри (табл. 4.6): швидкість руху вентиляційного струменя на виході з трубопроводу (v_1) і витрата (Q_1) на відстані 100 м від забою (v_2 , Q_2).

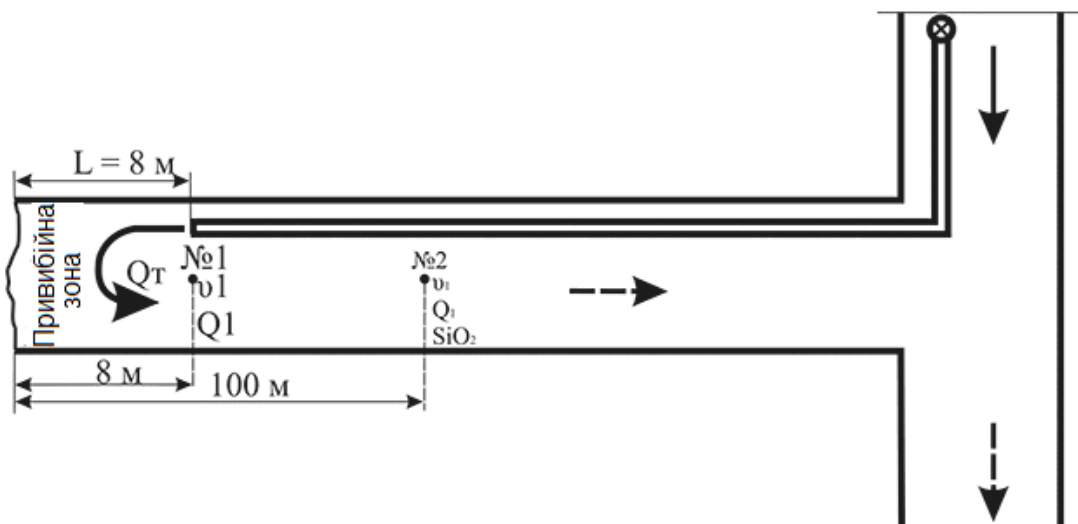


Рисунок 4.1 – Схема розташування вимірювальних пунктів за нагнітальною схемою провітрювання: L – відстань від забою до вентиляційного трубопроводу; Q_T – витрата повітря на виході з труби; №1, №2 – вимірювальні пункти; Q_1 , Q_2 – витрата повітря в перерізах №1, №2 відповідно

Таблиця 4.6 – Параметри провітрювання виробки

Показник	Значення
Тип вентилятора місцевого провітрювання	СВМ-6
Спосіб провітрювання	Нагнітальний
Кількість повітря, м ³ /с:	
- подається в виробку	3,40
- подається в привибійну зону	2,25
- витoku повітря з трубопроводу	1,15
Швидкість повітря в призабойній зоні, м/с	0,25

Заміри аеродинамічних параметрів і концентрацій пилу проводилися співробітниками шахти і ДВГРС під методичним керівництвом автора роботи.

Результати досліджень динаміки пилової хмари після вибуху наведено на рис. 4.2.

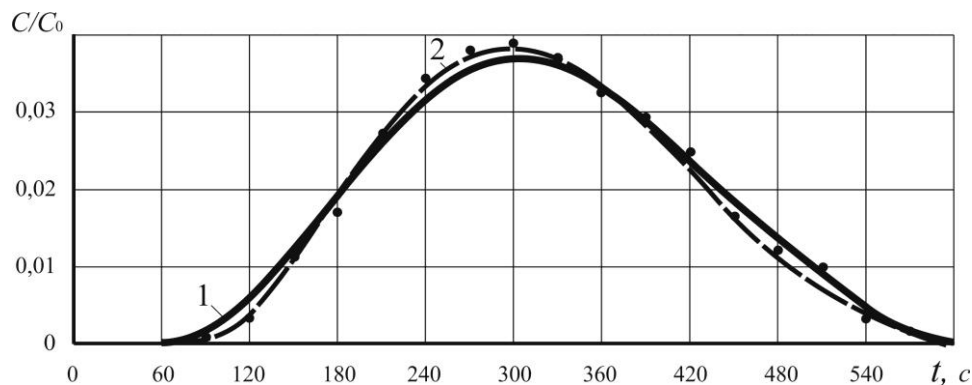


Рисунок 4.2 – Графік, що характеризує динаміку концентрації дрібнодисперсного пилу в пилогазовій хмарі залежно від часу після висадження на відстані 100 м від призабойної зони:

1 – розрахункова крива; 2 – експериментальна крива

З графіка на рис. 4.2 видно, що концентрація пилу змінюється по кривій лінії близької до розрахункової. Похибка становить 5-10%, що свідчить про адекватність отриманої математичної моделі зміни концентрації пилу в гірничій виробці реальним фізичним процесам, які протікають в натурних умовах.

Для визначення зміни концентрації пилу по довжині гірничої виробки заміри швидкості повітря і концентрації пилу проводилися в 10 точках через кожні 25 м виробки.

З метою перевірки ефективності розроблених способів і засобів зниження концентрації пилу в рудниковій атмосфері за рахунок зменшення виходу дрібнодисперсного пилу при руйнуванні гірських порід енергією вибуху за допомогою зменшення міцності середовища на контакті «ВР-порода» [13], а також розробленого складу набійки, яка розширюється [14], були проведені експериментальні вибухи з використанням вищевказаних способів і засобів. Результати вимірів наведено на рис. 4.3.

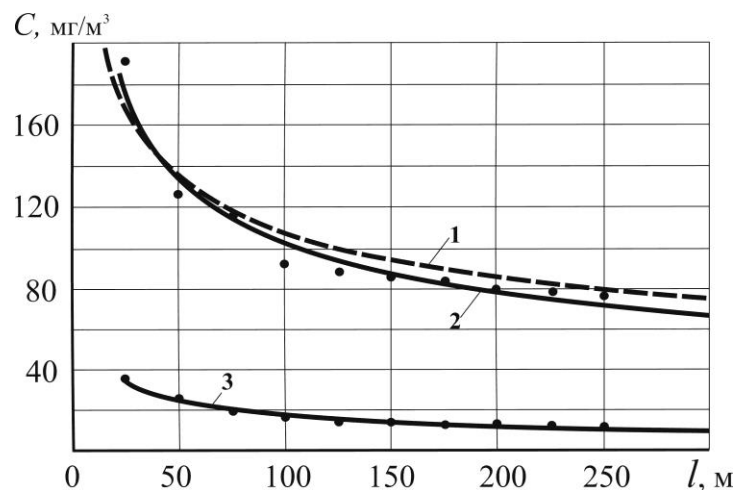


Рисунок 4.3 – Динаміка концентрації дрібнодисперсного пилу в хмарі по довжині виробки: 1 – розрахункова крива; 2 – експериментальна крива; 3 – динаміка концентрації пилу із застосуванням способів і засобів зменшення виходу дрібнодисперсного пилу

З рисунка видно, що концентрація пилу в другому експерименті (крива 3) знизилася в середньому в 6 разів.

Зменшення концентрації пилу відбувається як за рахунок застосування при підриванні зарядів ВР набійки з твердіючою сумішшю.

Таким чином, виконані порівняльні експериментальні дослідження свідчать про те, що при використанні набійки, яка розширюється, в шпурах і ПАР для знеміцнення гірських порід при проведенні виробок буропідривним способом дисперсний склад пилу істотно змінюється, тобто відбувається зниження запиленості за рахунок зменшення кількості дрібнодисперсної фракції до 10 мкм.

4.3 Розробка та апробація в промислових умовах способу зниження концентрації дрібнодисперсного пилу при проходці гірничих виробок з використанням енергії вибуху

Поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці працюючого персоналу на практиці досягається застосуванням розроблених нових раціональних технологічних параметрів проходки гірничих виробок (паспортів БПР), спрямованих на хімічне зв'язування і осадження дрібнодисперсного пилу, зниження вмісту в вентиляційному струмені токсичних продуктів вибуху.

Метою розробленого способу є підвищення ефективності боротьби з пилом, осадження і зв'язування дрібнодисперсного (менше 3 мкм), найбільш силікозо- і пмевмоконіозонебезпечної фракції пилу, що складається переважно з багатих кремнеземом (двоокис кремнію – SiO_2) продуктів руйнування гірських порід, що утворюються в забої при вибуховому способі проходки гірничих виробок.

Спосіб боротьби з пилом при проходці горизонтальної гірничої виробки в міцних гірських породах реалізується згідно з розробленим паспортом БПР. У масиві гірських порід, в місці спорудження горизонтальної гірничої виробки, наприклад квершлаг перерізом 16,0 м², що проводиться по міцних породах, наприклад піщаниках міцністю за шкалою М.М.Протод'яконова $f=8-10$, на поверхні вибою (рис. 4.4) бурильною установкою аналогом БУР-2 бурять шпури діаметром 43 мм, починаючи з центрального компенсаційного шпуру (1) на глибину заходки рівній $\ell_{\text{зах.}}=(0,7-0,8) h$, потім на глибину $\ell_1=(0,2-0,3) h$

бурять шпури першого ярусу (2) прямого призматичного врубу, а навколо шпурів першого ярусу бурять шпури другого ярусу (3) глибиною $\ell_2 = (0,5-0,6) h$ на відстані між рядами $b=(0,1-0,15) h$, а відбійні (4) і оконтурюючі (5) – навколо врубових шпурів на глибину $\ell=(0,4-0,5) h$ і на однаковій відстані між рядами. У пробурених шпурах в заобі виробки формують заряди різних конструкцій.

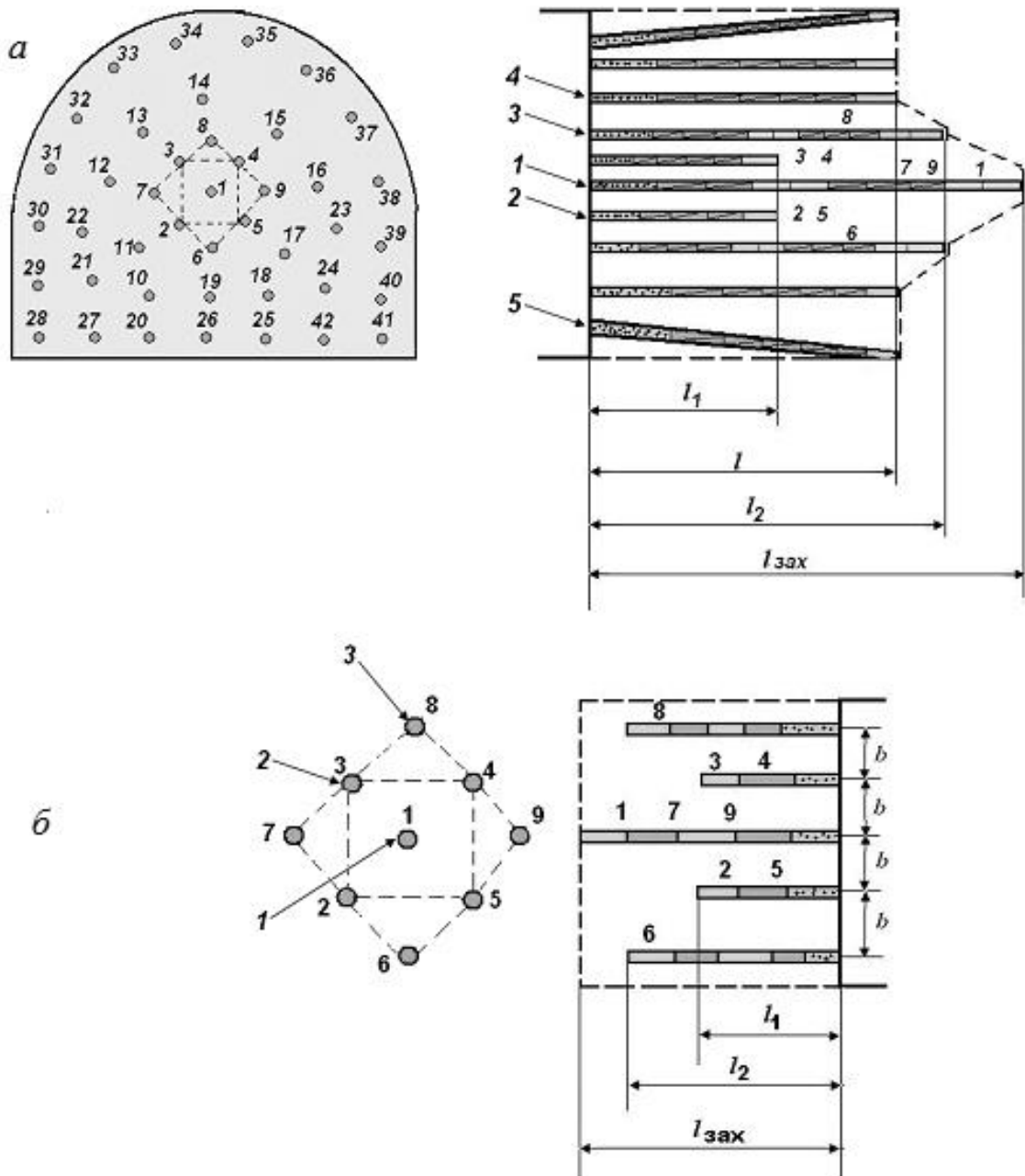


Рисунок 4.4 – Схема заобі виробки (а) з розташуванням в ній пробурених шпурів і конструкція врубу (б): 1 – компенсаційний шпур; 2 – врубові шпури 1-го ярусу; 3 – врубові шпури 2-го ярусу; 4 – допоміжні і відбійні шпури; 5 – оконтурюючі шпури

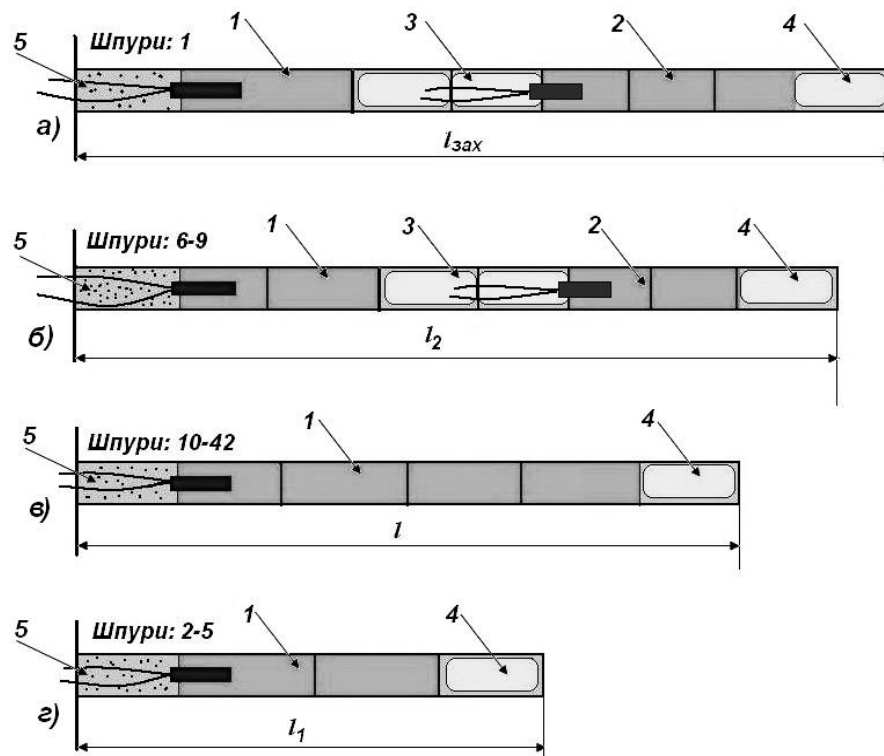


Рисунок 4.5 – Конструкції врубових (б, г), відбійних, допоміжних, оконтурюючих шпурових зарядів (в) і заряд ВР в компенсаційному шпурі (а): 1 – устьовий заряд; 2 – донний заряд; 3 – інертний проміжок в розосередженому заряді ВР; 4 – інертний проміжок в торці шпуру; 5 – твердіюча набійка

Так, в шпурах другого ярусу прямого призматичного врубу і центрального компенсаційного шпуру формують розосереджені заряди (рис. 4.5) – устьові (1) і донні (2), розділені інертним проміжком (3) довжиною $\ell_{\text{пр.}}=2\ell_{\text{амп.}}$, а в торці шпурових зарядів прямого призматичного врубу першого і другого ярусів, центрального компенсаційного шпуру, відбійних та оконтурюючих шпурових зарядів розміщують інертні проміжки (4) довжиною $\ell_{\text{пр.}}=\ell_{\text{амп.}}$. Інертні проміжки формують з поліетиленових ампул, заповнених водним розчином гашеного вапна (вапняне молоко) при такому співвідношенні компонентів: гашене вапно 80-90%; інше – вода, а герметизацію устя шпурових зарядів здійснюють твердіючою набійкою (5).

Після формування зарядів в шпурах патронованим ВР, типу Вугленіт П5, на відстані $\ell = (0,6-0,7) h$ від поверхні забою виробки в робочій зоні (рис. 4.6) під кутом 45° до поверхні забою формують не менше трьох полків (1) для судин

(2) з водним розчином гашеного вапна, причому верхні полиці (3) монтують на відстані $\ell = (0,2-0,3) h$ від покрівлі виробки, а решту з рівним кроком між рядами $\ell = (0,3-0,4) h$.

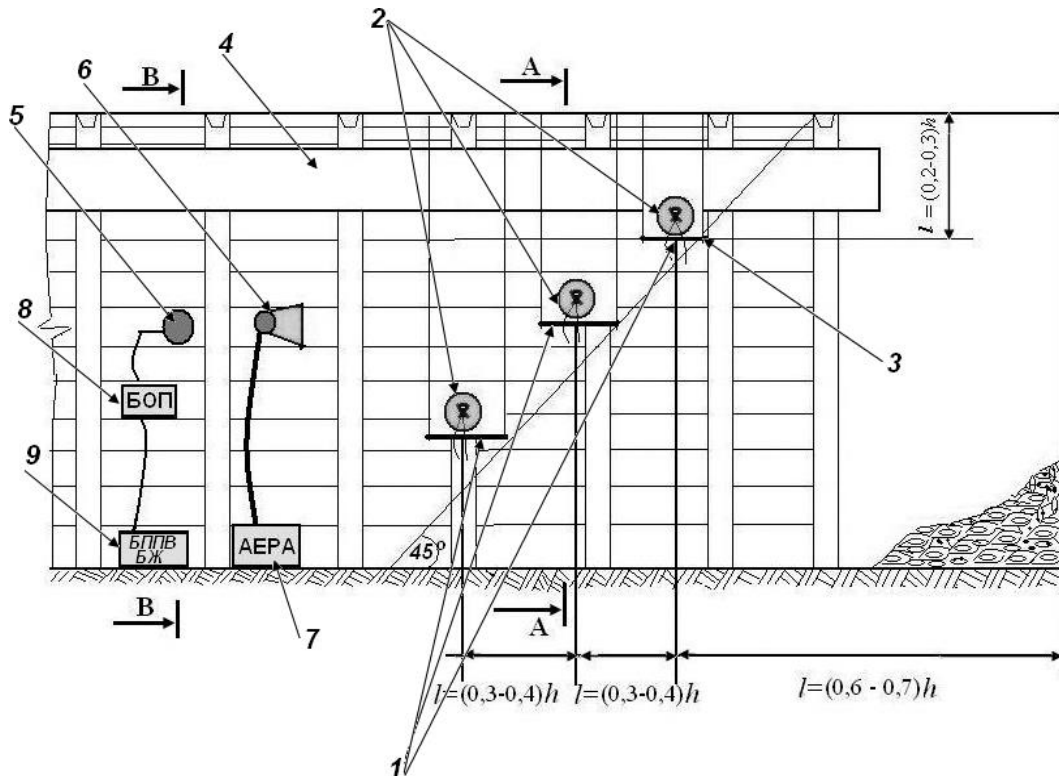


Рисунок 4.6 – Схема гірничої виробки і розміщення в ній водяних заслонів і записуючого устаткування: 1 – полиці для водяних заслонів; 2 – судини для водяного заслону; 3 – верхні полиці; 4 – вентиляційний повітропровід; 5 – стаціонарні оптичні датчики ДЗВ; 6 – алонжі з фільтрами АФА; 7 – електроаспіратор АЕРА; 8 – блок оптичного перетворювача (БОП); 9 – блок перетворення параметрів вимірювання і блок живлення (БППВ і БЖ)

На підготовлених полицях (1, рис. 4.7) розміщують судини (2) в шаховому порядку, починаючи з першої судини на ближньому полку до покрівлі виробки на відстані $\ell = (0,2-0,3) h$ від бічної поверхні виробки. Решту судин рівномірно зміщують до протилежної бічної поверхні виробки на відстані між судинами $\ell = (0,3-0,4) h$.

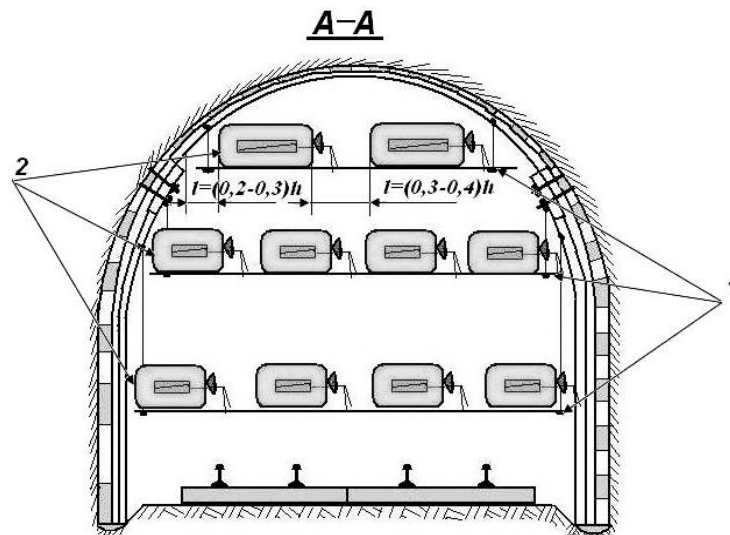


Рисунок 4.7 – Схема розміщення водяного заслону по перерізу виробки:

1 – полки для водяних заслонів; 2 – судини для водяних заслонів

З підготовленого до вибуху забою видаляють бурове і додаткове обладнання на безпечну відстань, заряди ВР з бойовиками встановлюють в судинах на полках, а також бойовики з ініціатором в зарядах по перерізу забою.

Заряди в шпурах комутують в групи і одночасно підривають в один прийом з відповідним уповільненням між кожною групою зарядів, починаючи з врубових зарядів першого, донного і устьового зарядів другого ярусу, потім центрального компенсаційного шпуру, за ними відбійні й оконтурюючі шпурові заряди, а в останню чергу уповільнення – заряди в судинах з водним розчином гашеного вапна з використанням електродетонаторів миттєвого типу – ЕДКЗ-ОП, короткоуповільненого, типу ЕДКУ і уповільненого, типу ЕДУД або неелектричної системи ініціювання – аналог систем «ПРИМА-ЕРА», NONEL, тощо.

Після ініціювання комплекту шпурових зарядів вибухової речовини (ВР), наприклад Вугленіт П5, детонаційна і ударна хвиля з великою кількістю утворених вибухом газів температурою $t = 2000-2500^{\circ}\text{C}$, впливаючи на породний масив руйнує його, утворюється зона інтенсивного дроблення порід на контакті «ВР-порода» радіусом рівним $2-3r_{\text{зар}}$. – де $r_{\text{зар}}$. – радіус шпурового

заряду. Утворена вибухом хмара представлена кварцовими (двоокис кремнію – SiO_2) гострокутними уламками, середній розмір яких коливається в межах 2-4 мкм. З метою укрупнення і осадження цих частинок пилу у місцях інтенсивного пилоутворення передбачені ємності з водним розчином гашеного вапна.

Після підриву зарядів запускають вентилятор місцевого провітрювання і протягом 30 хв здійснюють провітрювання виробки нагнітанням повітря по прогумованому трубопроводу. Одночасно із запуском вентилятора місцевого провітрювання включають електронні прилади – стаціонарні оптичні датчики ДЗВ-500 (рис. 4.8) для виміру концентрації пилу в виробці. Мінералогічний і дисперсний склад пилу вивчають по пробам, знятих з фільтрів в алонжах, через які протягують запилене повітря електроаспіраторами типу АЕРА-30. Використовувані прилади реєстрації монтують на бічній поверхні виробки в робочій зоні на висоті не нижче висоти зони дихальних шляхів працюючого персоналу на відстані від поверхні забою $l \geq (3-5) h$.

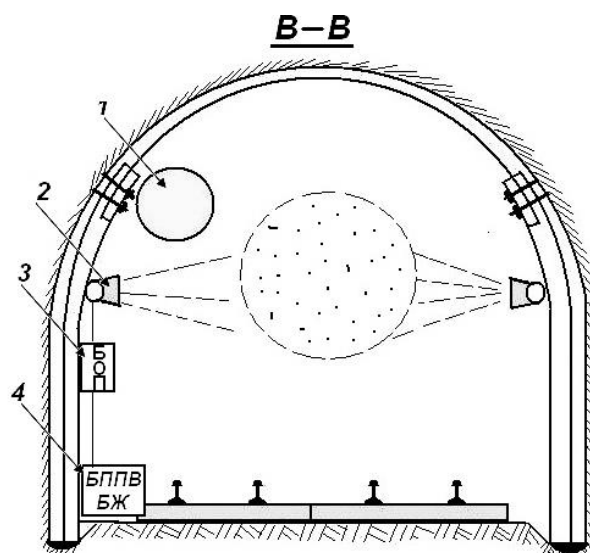


Рисунок 4.8 – Схема розміщення записуючого устаткування у забої виробки: 1 – вентиляційний повітропровід; 2 – стаціонарні оптичні датчики ДЗВ-500; 3 – блок оптичного перетворювача (БОП); 4 – блок перетворення параметрів вимірювання і живлення (БППВ і БЖ)

Безперервний контроль концентрації пилу C ($\text{мг}/\text{м}^3$) у виробці з виміром її в діапазоні від 2 до $500 \text{ мг}/\text{м}^3$ з абсолютною похибкою $\pm 0,25 \text{ мг}/\text{м}^3$ проводили стаціонарними оптичними датчиками ДЗВ-500.

Механізм виміру концентрації пилу датчиками в рудниковій атмосфері базується на оптико-абсорбційному методі реєстрації окремих частинок пилу.

Знята інформація з датчиків перетворюється в блоці оптичного перетворювача з подальшим кодуванням в блоці перетворення параметрів вимірювання. Отримана інформація аналізувалася і в автоматичному режимі передавалася на диспетчерський пульт шахти.

Якісну оцінку пилоподібних фракцій проводили на пробах, знятих з фільтрів АФА-В-10 або АФА-В-20, розміщених в алонжах і закріплених на бічній поверхні виробки в робочій зоні на висоті не нижче висоти зони дихальних шляхів працюючого персоналу, через які протягом 30 хв прокачували запилене повітря електроаспіратором АЕРА-30.

Оцінку пилових проб здійснювали за допомогою поляризаційного мікроскопа МП-2 з 20-кратним об'єктивом і 10-кратним вимірювальним окуляром.

За результатами аналізу проб дрібнодисперсної фракції пилу граничні показники її якості оцінювали методами гранулометрії з використанням програмного додатка Microsoft Excel.

Для оцінки об'єму дрібнодисперсних частинок, розмір яких менше 1 мкм , використовували рентгеноструктурний аналіз (рентгенівська установка).

У запропонованому способі проходки гірничих виробок з використанням енергії вибуху ефективність досягається за рахунок підриву системи розосереджених зарядів: торцевих і устьових в 2-ярусному врубі з компенсаційним шпуром; відбійних, допоміжних і контурних шпурів з інертними проміжками в донній частині – ампулами, заповненими вапняним молоком. Такі конструкції зарядів дозволяють збільшити глибину і об'єм врубової порожнини шляхом цілеспрямованого зменшення міцності середовища на контакті «ВР-порода» [15]. При цьому реалізується можливість

руйнування порід до проектного перерізу виробки. Одночасно підвищується безпека проходки за рахунок усунення заколів і навісів на поверхні забою, хімічне зв'язування і осадження дрібнодисперсного пилу, зниження вмісту в вентиляційному струмені токсичних продуктів вибуху і поліпшуються санітарно-гігієнічні умови праці працюючого персоналу.

Таким чином, застосування запропонованого способу спорудження гірничих виробок в напружених гірських породах з одночасним застосуванням заходів щодо зниження запиленості в забої виробки дозволить підвищити швидкість проходки, коефіцієнт корисної дії вибуху і коефіцієнт використання шпурів, знизити питомі витрати ВР, зменшити об'єм бурових робіт, поліпшити ефективність роботи вантажно-транспортного обладнання та санітарно-гігієнічні умови роботи гірників.

Для обґрунтування ефективності технологічних прийомів зниження і локалізації пилу, що утворюється при вибуховому руйнуванні гірського масиву в забої виробки, які реалізовані в запропонованому способі і підтверджені результатами експериментальних досліджень, виконано розрахунок очікуваної початкової запиленості повітря (концентрації пилу, мг/м³) в забої підготовчої виробки для її різного поперечного перерізу за формулами [16]:

$$N_o = \frac{205qfM}{k_{об}l_{ш}(169,3 + 32,6A/f)}, \quad (5.1)$$

де q – питома витрата ВР, кг/м³;

f – коефіцієнт міцності порід за шкалою проф. М.М. Протод'яконова;

$l_{ш}$ – середня глибина шпурів, м;

M – об'єм підірваної породи, м³;

$k_{об}$ – коефіцієнт, що враховує об'єм підірваної гірської породи;

A – кількість ВР, яка одночасно підривається, кг.

Запиленість повітря в будь-який момент часу після вибуху визначається з виразу:

$$N = N_o e^{-\beta_T \frac{Q_B t_{\Pi}}{V_{об}}}, \quad (5.2)$$

де e – основа натурального логарифма;

β_T – коефіцієнт турбулізації вентиляційного потоку;

$$\beta_T = 0,24 - 0,44;$$

Q_B – кількість повітря, що надходить в забій, м³/с;

$V_{об}$ – об'єм пилової хмари, утвореної після вибуху, м³; $V_{об} = (0,24 + 15)S_B$;

S_B – площа поперечного перерізу виробки, м²;

t_{Π} – час провітрювання, хв.

Результати розрахунку очікуваної запиленості повітря у забої виробки до і після вибуху наведено в табл. 4.7.

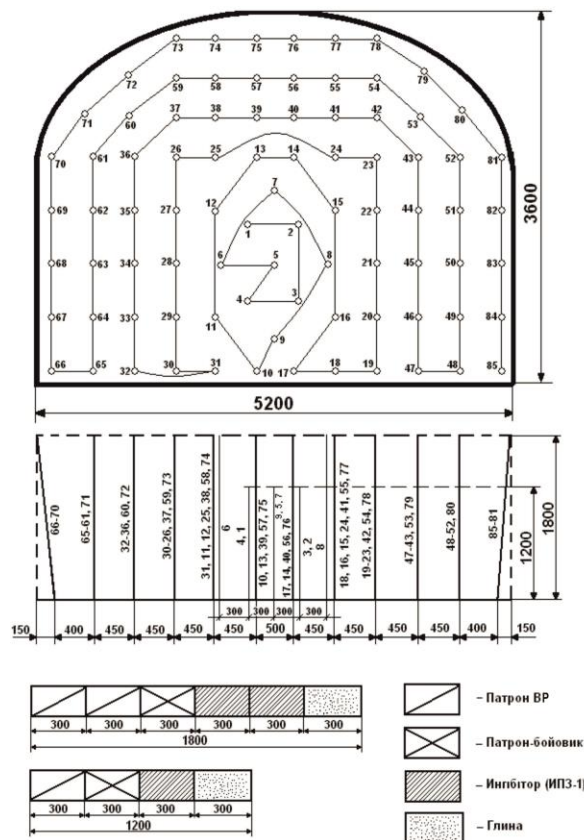
Реалізація розроблених способів і засобів зниження виходу дрібнодисперсного пилу при проходці гірничої виробки вибуховим способом була проведена при коригуванні технологічних паспортів БПР для умов підготовчих виробок шахти «Покровська», небезпечної щодо вибуху метану і вугільного пилу.

Таблиця 4.7 – Розрахункові значення запиленості повітря в забої виробки

Тип виробки	S_B , м ²	q , кг/м ³	f	M , м ³	$k_{об}$	A , кг	β_T	Q_B , м ³ /с	$V_{об}$, м ³	N_o , мг/м ³	N , мг/м ³
Польовий в/п штрек	18,7	2,16	8-10	31,8	0,7	75,5	0,44	11,0	562,9	227,2	177,0
Конвеєрний квершлаг	19,8	2,34	8-10	36,8	0,8	86,4	0,44	11,0	639,2	205,9	165,3
Польовий конвеєрний штрек	20,1	2,7	8-10	37,4	0,75	102,0	0,44	11,0	711,5	230,5	188,7
Польовий квершлаг	16,5	2,81	8-10	29,7	0,6	75,3	0,44	11,0	496,0	290,3	216,6

Як об'єкт досліджень для оцінки ефективності розроблених рекомендацій і їх впливу на процес формування врубової порожнини і відбійку породи в перерізі виробки вибрано кілька варіантів конструкцій врубів: при базовому паспорті БПР – спіральний (рис. 4.9), а при розробленому паспорті – прямий призматичний 2-ярусний вруб з компенсаційним шпуром в його центрі (рис. 4.5; рис. 4.10).

Якість пилопридушення і осадження пилової хмари в забої виробки оцінювали шляхом порівняння ефективності заходів щодо знепилювання рудничної атмосфери з застосуванням змінених технологічних параметрів в паспортах БПР, в яких інертні проміжки заповнені водою (перший варіант) і водним розчином (80-90%) гашеного вапна (другий варіант).

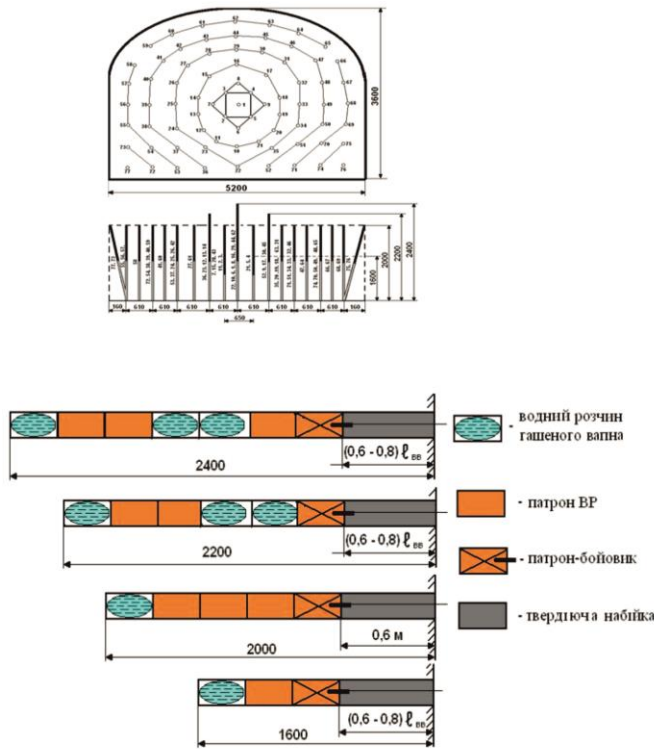


Найменування показників	Одиниця виміру	Кількість
Небезпека шахти по газу / пилу	-	небезпечна
Небезпека виробки по газу / пилу	-	небезпечна
Перетин виробки начорно	м ²	16,5
міцність порід		7÷10
Тип застосовуваного ВР		П-5, 10П
Витрата ВР на цикл	кг	75,3; 10П-1,2
Витрата електродетонаторів на цикл	шт	91
Тип застосовуваної набійки	-	ИПЗ-1, глина
Витрата набійки на цикл	кг (шт)	170шт (ИПЗ-1); 68 кг (глина)
Посування вибою за підв'яз по породі	м	1,62
Час провітрювання забою після підв'язання	хв	30
Встановлений час ведення вибухових робіт (початок, кінець)	Часи доби	І см 8 ³⁰ -14 ⁰⁰ ; Шем 20 ³⁰ -2 ⁰⁰

№ шпурів	Глибина шпурів, м	Величина заряду кожного шпура (кг)	Кут нахилу шпурів до площини забою в проєкції, град		Тип електродетонаторів і їх уповільнення	Довжина внутрішньої набійки (тип), м
			горизонтальний	вертикальний		
1-4	1,2	0,6	90	90	ЭДКЗ-ПМ-15	0,6
5-9	1,8	0,9	90	90	ЭДКЗ-ПМ-30	0,9
10, 17	1,8	0,9	85	90	ЭДКЗ-ПМ-45	0,9
11-16	1,8	0,9	90	90	ЭДКЗ-ПМ-45	0,9
18,19,30,31	1,8	0,9	85	90	ЭДКЗ-ПМ-60	0,9
20-29	1,8	0,9	90	90	ЭДКЗ-ПМ-60	0,9
32, 47	1,8	0,9	85	90	ЭДКЗ-ПМ-80	0,9
33-46	1,8	0,9	90	90	ЭДКЗ-ПМ-80	0,9
48, 65	1,8	0,9	85	90	ЭДКЗ-ПМ-100	0,9
49-64	1,8	0,9	90	90	ЭДКЗ-ПМ-100	0,9
66,85	1,8	0,9	85	85	ЭДКЗ-ПМ-120	0,9
64-70,81-84	1,8	0,9	90	85	ЭДКЗ-ПМ-120	0,9
71,72,79,80	1,8	0,9	90	90	ЭДКЗ-ПМ-120	0,9
73-78	1,8	0,9	85	90	ЭДКЗ-ПМ-120	0,9

Ємність судин, л	Кількість судин, шт	Тип ВР	Тип ЕД	Витрата ВР на одну судин, кг	Витрата ВР, кг	Витрата ЕД, шт
25	6	Угленіт 10П	ЕДКУ-ОП	0,2	1,2	6

Рисунок 4.9 – Базовий паспорт БПР на проведення 2 південного конвеєрного штреку блока 7 гор. 593 м перерізом $S_{пр} = 16,5 \text{ м}^2$. Шахта «Покровська»



Найменування показників	Одиниця виміру	Кількість
Небезпека шахти по газу / пилу	-	небезпечна
Небезпека виробки по газу / пилу	-	небезпечна
Перетин виробки начорно	м ²	16,5
Міцність порід		7÷10
Тип застосованого ВР		П-5, 10П
Витрата ВР на цикл	кг	71,1; 10П-1,2
Витрата електродетонаторів на цикл	шт	83
Тип застосованої набійки	-	твердіюча
Витрата набійки на цикл	кг (шт)	61 кг твердіючої набійки
Посування вибою за підрив по породі	м	1,9
Час провітрювання забою після підвизання	хв	30
Встановлений час ведення вибухових робіт (початок, кінець)	Часи доби	І см 8 ³⁰ -14 ⁰⁰ ІІ см 20 ³⁰ -2 ⁰⁰

№ шпурів	Глибина шпурів, м	Величина заряду кожного шпура (кг)	Кут нахилу шпурів до площини забою в проєкції, град		Тип електродетонаторів і їх замедлення	Довжина внутрішньої набійки (тип), м
			горизонтальної	вертикальної		
1	2,4	1,5	90	90	ЕДКЗ-ПМ-45	0,9 (твердіюча)
2-5	1,6	0,9	90	90	ЕДКЗ-ПМ-15	0,6 (твердіюча)
6-9	2,2	1,2	90	90	ЕДКЗ-ПМ-30	0,8 (твердіюча)
10-21	2	0,9	90	90	ЕДКЗ-ПМ-60	0,6 (глина)
23-35	2	0,9	90	90	ЕДКЗ-ПМ-80	0,6 (глина)
22	2	0,9	85	85	ЕДКЗ-ПМ-80	0,6 (глина)
36	2	0,9	90	90	ЕДКЗ-ПМ-100	0,6 (глина)
37-51	2	0,9	90	90	ЕДКЗ-ПМ-100	0,6 (глина)
53,55-58	2	0,9	85	85-90	ЕДКЗ-ПМ-120	0,6 (глина)
66-69, 71	2	0,9	85	85-90	ЕДКЗ-ПМ-120	0,6 (глина)
59-65	2	0,9	85	85-90	ЕДКЗ-ПМ-120	0,6 (глина)
54, 70	2	0,9	90	90	ЕДКЗ-ПМ-120	0,6 (глина)
72-77	2	0,9	85	85	ЕДКЗ-ПМ-140	0,6 (глина)

Смієність свдин, л	Кількість свдин, т	Тип ВР	Тип ЕД	Витрата ВР на 1 свдин, кг	Витрата ВР	Витрата ЕД, шт
25	10	Угленіт 10П	ЕДУД	0,2	2,0	10

Рисунок. 4.10 – Схема розробленого паспорта БПР на проведення 2-го південного конвеєрного штреку блока 7 гор. 593 м перерізом $S_{пр} = 16,5 \text{ м}^2$.

Шахта «Покровська»

Згідно з розробленою програмою-методикою, промислові випробування виконували в спеціально обраному для цих цілей забою 2-го південного конвеєрного штреку блока 7 гор. 593 м перерізом $S_{пр} = 16,5 \text{ м}^2$. Шахта «Покровська». Шпури діаметром 43 мм бурили по забою установкою БУР-2 за базовим і розробленим паспортами БПР з різними конструкціями врубів.

Розроблений новий паспорт БПР відрізняється від базового тим, що врубова порожнина формується з використанням прямого 2-ярусного циліндричного врубу зарядами ВВ з твердіючою набійкою, довжиною $l_{заб} = 0,60 - 0,80$ довжини заряду вибухової речовини ($l_{вв}$), при відстані між суміжними шпурами одно 0,61 м замість 0,45 м за базовим паспортом. Причому, в шпурах другого ярусу прямого призматичного врубу і центрального компенсаційного шпуру формуються розосереджені заряди – устьові і донні, розділені інертним

проміжком довжиною $\ell_{\text{пр.}}=2\ell_{\text{амп.}}$, а в торці шпурових зарядів прямого призматичного врубу першого і другого ярусів, центрального компенсаційного шпуру, відбійних та оконтурюючих шпурових зарядах розміщують інертні проміжки довжиною $\ell_{\text{пр.}}=\ell_{\text{амп.}}$. Інертні проміжки формують з поліетиленових ампул, заповнених водним розчином гашеного вапна (вапняне молоко), а герметизацію устя шпурових зарядів здійснюють твердіючою набійкою.

Середня довжина шпурів, які підриваються за базовим паспортом, становила 1,8 м при одночасному підриванні 85 шпурів з загальною масою вибухової речовини Вугленіт П-5 – 76,5 кг, а в розробленому новому паспорті – 2,2 м, кількість шпурів – 77, загальна маса ВВ – 71,2 кг.

Заряди ініціювали електродетонаторами ЕДКУ-ОП, ЕДКУ-МП, ЕДУД миттєвої, короткоуповільненої та уповільненої дії з вісьмома ступенями уповільнення.

Врубіві шпурові заряди підривали електродетонаторами миттєвої дії з уповільненням між ступеннями 15-20 мс.

Розроблені заходи щодо забезпечення комфортних санітарно-гігієнічних умов працюючого персоналу, зокрема зниження концентрації пилу і його локалізацію в забої при вибуховому способі проходки виробки, оцінювали стаціонарними оптичними датчиками ДЗВ-500 в автоматичному режимі, а якісну характеристику пилоподібних фракцій – на пробах, знятих з фільтрів АФА-В. Фільтри АФА розміщували в алонжах, закріплених на бічній поверхні виробки (див. рис. 4.7) в робочій зоні на висоті не нижче висоти зони дихальних шляхів працюючого персоналу. Через них протягом 30 хв прокачують запилене повітря електроаспіраторами АЕРА-30 (див. рис. 4.7).

За результатами аналізу проб дрібнодисперсної фракції пилу граничні показники якості її оцінювали методами гранулометрії з використанням програмного додатка Microsoft Excel, рентгеноструктурного аналізу (рентгенівська установка ДРОН-3) і світлооптичної мікроскопії (поляризаційний мікроскопом МП-2 з 20-кратним об'єктивом і 10-кратним вимірювальним окуляром).

Аналіз результатів промислових випробувань розроблених рекомендацій свідчить про те, що ефективність вибухового руйнування міцних напружених порід значною мірою залежить від типу врубу і конструкцій шпурових зарядів, а також нових технологічних прийомів з локалізації і осадження пилової хмари в робочій зоні.

Аналіз концентрації пилу (табл. 4.8) і гранулометричні характеристики проб повітря (табл. 4.9), відібраних після вибуху в забої виробки, показав, що концентрація пилоподібних частинок зменшується в 1,5-3,0 рази при одночасному збільшенні середнього розміру кварцових зерен з 25 до 40 мкм і ступеня їх обкатаності з 1-2 балів (гострокутні) до 7-9 балів (напівобкатані і обкатані) за 10-бальною шкалою обкатаності. Вміст дрібнодисперсного пилу, найбільш небезпечного по силікозу (розміром до 10 мкм), знижується в 7-14 разів.

Результати досліджень дисперсного складу пилу наведено в табл. 4.10, 4.11.

Таблиця 4.8 – Результати порівняльних випробувань базового і розробленого паспортів БПР по зниженню запиленості в забої виробки

Переріз виробки $S_B, \text{ м}^2$	Об'єм підірваної породи, М, м^3	Маса одночасно підірваного заряду ВР А, кг	Коеф. турбул. повітряного потоку β_T	Об'єм повітря, яке надходить в виробку $Q_B, \text{ м}^3/\text{с}$	Об'єм запиленого повітря після вибуху $V_{об}, \text{ м}^3$	Розрахункова концентрація пилу після вибуху $N, \text{ мг}/\text{м}^3$	Замірjana концентрація пилу, $N_\phi, \text{ мг}/\text{м}^3$
До застосування рекомендацій (гідронабійки, водяний заслін)							
16,5	29,7	76,5	0,44	11,0	496,0	216,6	110,5
16,5	29,7	76,5	0,44	11,0	496,0	216,6	108,3
16,5	29,7	76,5	0,44	11,0	496,0	216,6	106,2
Середнє:							108,3
Після застосування рекомендацій (водний розчин гашеного вапна)							
16,5	31,4	71,1	0,44	11,0	482,1	178,2	19,6
16,5	31,4	71,1	0,44	11,0	482,1	178,2	17,8
16,5	31,4	71,1	0,44	11,0	482,1	178,2	16,0
Середнє:							17,8

Таблиця 4.9 – Дисперсний склад (%) пилових частинок після вибуху в забої гірничої виробки з використанням нових прийомів боротьби з пилом

Вміст пилових частинок (%), у відібраних пробах повітря привібійної зони									
Розміри частинок, мкм									
0-10*	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
До застосування рекомендацій (гідронабійки, водяний заслін)									
49,02	12,06	9,72	9,34	5,67	1,95	1,95	2,34	1,16	0,78
76,92	5,67	3,82	3,12	2,97	2,69	2,12	1,13	0,71	0,85
67,70	7,74	3,67	2,37	3,44	3,67	2,34	2,80	2,37	3,87
Після застосування рекомендацій (водний розчин гашеного вапна)									
5,33	5,56	4,89	5,78	8,44	8,89	15,11	16,67	15,11	14,22
10,22	12,87	5,03	5,11	7,22	5,34	12,18	13,29	12,85	15,79
4,89	7,25	5,67	9,27	12,44	13,01	14,82	14,66	9,14	8,85
* – фракція найбільш небезпечна по силікозу									

Таблиця 4.10 – Результати мікроскопічного аналізу пилу до застосування рекомендацій

Діаметр частинок D , мкм	Кількість частинок							Кількість частинок в полі зору N
	поле 1	поле 2	поле 3	поле 4	поле 5	поле 6		
2,0	70	66	67	61	64	71	399	
5,0	21	20	20	18	22	24	125	
8,0	14	13	12	16	17	11	83	
10	11	11	10	9	14	13	68	
20	7	10	6	5	9	7	44	
30	5	4	6	5	7	3	30	
40	3	6	4	5	4	6	28	
50	4	3	2	3	5	5	22	
60	3	2	4	3	5	2	19	
70	2	3	2	5	2	3	17	
80	2	2	3	2	0	3	12	
90	1	2	0	2	1	2	8	
100	0	1	0	3	2	1	7	
	143	143	136	137	152	151	$\Sigma N = 862$	

Таблиця 4.11 – Результати мікроскопічного аналізу пилу після застосування рекомендацій

Діаметр частинок D , мкм	Кількість частинок						Кількість частинок в полі зору N
	поле 1	поле 2	поле 3	поле 4	поле 5	поле 6	
2,0	0	0	0	0	0	0	0
5,0	0	0	0	0	0	0	0
8,0	1	0	1	1	0	0	3
10	2	1	2	2	1	3	11
20	3	2	4	2	2	3	16
30	2	1	1	2	1	2	9
40	1	2	1	2	1	1	8
50	3	1	0	2	2	1	9
60	1	2	2	1	0	2	8
70	3	3	4	2	3	2	17
80	3	4	2	3	4	2	18
90	2	5	3	2	4	3	19
100	3	2	4	5	2	4	20
	24	23	24	24	20	23	$\Sigma N = 138$

Таблиця 4.12 – Дані для побудови інтегральної кривої розподілу дрібнодисперсного пилу до застосування рекомендацій

Діаметр частинок D , мкм	Кількість частинок даної фракції	Вміст фракції, %	Сумарний вміст фракцій з наростанням C , %
2,0	399	46,33	46,33
5,0	125	14,49	60,82
8,0	83	9,64	70,46
10	68	7,89	78,35
20	44	5,10	83,45
30	30	3,50	86,95
40	28	3,20	90,15
50	22	2,58	92,73
60	19	2,26	94,99
70	17	1,96	96,95
80	12	1,35	98,30
90	8	0,95	99,25
100	7	0,75	100
	$\Sigma N = 862$		

Таблиця 4.13 – Дані для побудови інтегральної кривої розподілу дрібнодисперсного пилу після застосування рекомендацій

Діаметр частинок D , мкм	Кількість частинок даної фракції	Вміст фракції, %	Сумарний вміст фракцій з наростанням C , %
2,0	0	0	0
5,0	0	0	0
8,0	3	2,20	2,20
10	11	8,10	10,30
20	16	11,69	21,99
30	9	6,23	28,22
40	8	6,01	34,23
50	9	6,22	40,45
60	8	5,47	45,92
70	17	12,05	57,97
80	18	13,34	71,31
90	19	13,93	85,24
100	20	14,76	100
	$\sum N = 138$		

За даними таблиць 4.12 і 4.13 побудовано інтегральні криві розподілу (рис. 4.12) для пилу. Порівняльний аналіз дисперсного складу пилу за результатами мікроскопічного аналізу показує, що при зменшенні міцності середовища на контакті «ВР-порода», а також при використанні набійки, яка розширюється при підриванні зарядів нової конструкції, фракційний склад пилу змінюється в бік зменшення вмісту респірабельного пилу в рудниковій атмосфері (в 6-7 разів).

Порівняння інтегральних (кумулятивних) кривих розподілу зображених на рис. 4.12 показує, що крива, отримана при використанні заходів щодо зменшення респірабельного пилу, значно зміщена по відношенню до кривої, отриманої без використання заходів по зменшенню пилу, в область більших частинок пилу.

Крива має більш пологий характер, що вказує на зниження частки дрібнодисперсних фракцій в пробі, взятої при використанні заходів щодо зниження кількості респірабельного пилу.

Як показали світлооптичні дослідження проб пилоподібної фракції (0-100 мкм), в шахтній атмосфері практично зникають кварцові частинки (силікоzoneбезпечний компонент) субмікронного розміру 1-5 мкм (рис. 4.11, 4.12).

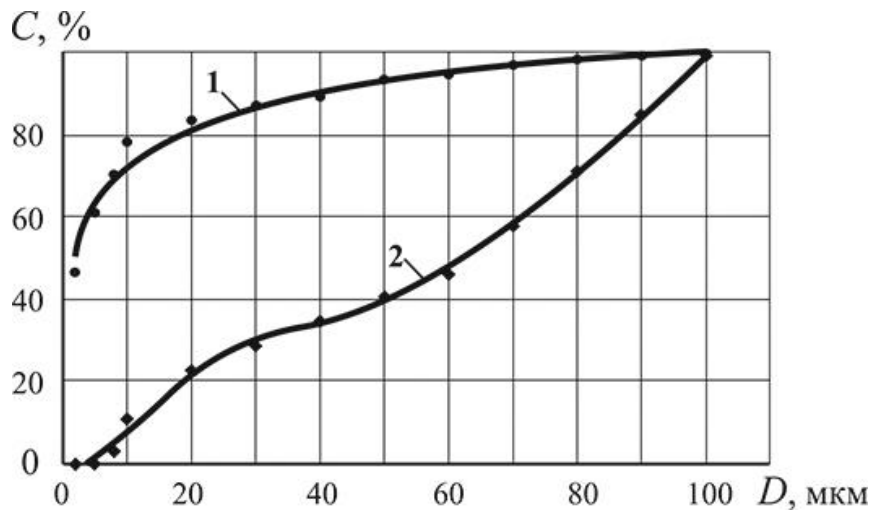


Рисунок 4.11 – Кумулятивні криві гранулометричних характеристик пилових проб повітря (0-100 мкм): 1 – до застосування рекомендацій; 2 – після застосування рекомендацій

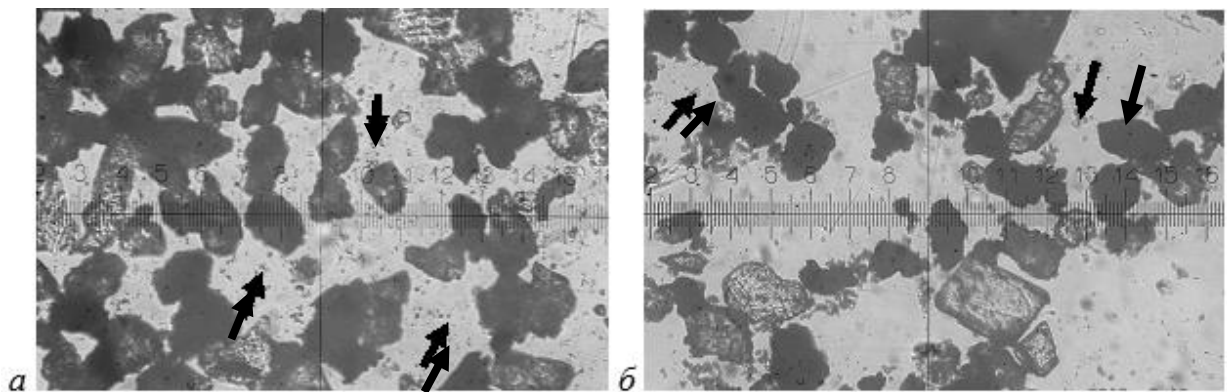


Рисунок 4.12 – Мікрофотографія оптичної мікроскопії пилових проб повітря (0-100 мкм). Стрілками показані дрібнодисперсні частинки кварцового пилу субмікронного розміру (менше 1 мкм): а – до застосування рекомендацій; б – після застосування рекомендацій

Таким чином, на підставі виконаних експериментальних досліджень можна стверджувати, що при використанні набійки, яка розширюється, в шпурах і ПАР для знеміцнення гірських порід при проведенні виробок буропідривним способом дисперсний склад пилу істотно змінюється, тобто відбувається зниження запиленості за рахунок зменшення кількості дрібнодисперсної фракції розміром до 10 мкм. В результаті, при швидкому осіданні більших частинок пилу за рахунок гравітаційних сил і різкого зменшення об'єму частинок субмікронного розміру, витання яких в повітрі практично нескінченно через конвективні повітряні потоки, час досягнення ГДК пилу в шахтній атмосфері в процесі провітрювання істотно скорочується.

Висновки за розділом 4

Розроблено склад суміші для набійки шпурових зарядів, яка розширюється при затвердінні. Основним компонентом суміші є піщано-глиниста суміш з додаванням в'язучих добавок – алюмокалієві галуни і лігносульфонати + доломітовий пил – відходи деревообробної та гірничорудної промисловості.

Розроблено методику визначення оптимальних складів, властивостей твердіючої суміші і технології її приготування.

Експериментально встановлено, що застосовувана при підриванні зарядів ВР набійка з твердіючою сумішшю на 20% збільшує час перебування її в шпурі в порівнянні з іншими конструкціями зарядів, створюючи надійне замикання продуктів детонації. При цьому тривалість замикання зарядної порожнини зростає до 100 мкс в порівнянні з набійкою з піску і піщано-глинистої суміші, що значною мірою підвищує ступінь використання енергії вибуху для руйнування гірського масиву, рівномірність його дроблення, а також знижує об'єм викидів в гірничу атмосферу дрібнодисперсного пилу.

Експериментально встановлено, що на відстані від центру заряду, що дорівнює 5-10 відносних радіусів заряду, радіальні напруги в хвилі стиснення

середовища, яке руйнується при застосуванні набійки з твердіючою сумішшю, в 1,5-2,5 рази вище, ніж при застосуванні набоїв з сипучих і пластичних матеріалів.

Аналіз гранулометричного складу зруйнованих вибухом моделей показав, що мінімальний вихід дрібних фракцій – 13,6% спостерігається при вибуху заряду з піщано-глинистою набійкою, мінімальний вихід великих фракцій – 41,96% при підриванні з набійкою з сумішшю, яка твердіє і розширюється. При цьому спостерігається рівномірний розподіл фракцій дроблення моделей.

Зміна механізму руйнування вуглепородного масиву під дією ПАР сприяє зменшенню силікозо- і пневмокніозонебезпечності і концентрації пилу в гірничій виробці, що утворюється під час проведення підривних робіт, за рахунок швидкого осідання пилоподібних частинок під дією сил гравітації.

Список використаних джерел в розділі 4

1. Ярембаш І.Ф. Очищення шахтної атмосфери після вибухонебезпечних робіт. Опубл. Надра, 1979. – 191 с.
2. Дьяков В.В., Ковальов В.І. Протипилові режими вентиляції в шахтах / В.В. Дьяков, В.І. Ковальов – Опубл.Надра, 1984. – 200 с.
3. Адлер Ю.П., Маркова Є.В., Грановський В.П. Планування експерименту в пошуках оптимальних умов / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, В.П. Грановський – Наука, 1976. – 280 с.
4. Бетонні суміші. Методи визначення щільності, 1981. – 25 с.
5. Сапотницький С.А. Застосування сульфатного луку / С.А. Сапотницький.– Лісова промисловість, 1965. – 123 с.
6. Пат. № 107156 Україна МПК 7 F42D 1/08, C04B33/20. Суміш для забивки шпурових зарядів / В.І. Голінько, Я.Я. Лебедєв, Д.В. Савельєв, К.С. Іщенко, І.Л. Кратковський; заявник і власник патенту ДВНЗ «НГУ». – №а2013 11763 від 07.10.13.

7. Пат. № 91042 Україна МПК 7 F42D 1/08. Суміш для набійки шпурових зарядів / В.І. Голінько, Я.Я. Лебедев, Д.В. Савельєв, К.С. Іщенко, І.Л. Кратковський; заявник і власник патенту ДВНЗ «НГУ». – № u2013 12826 від 04.11.13.

8. Відбір проб і загальні методи фізичного контролю. 1976. – 20 с.

9. Методика визначення межі міцності при одновісному стисненні. 1986. – 10 с.

10. Методика визначення швидкостей поширення пружних поздовжніх і поперечних хвиль. 1976. – 35 с.

11. Методичні вказівки по проектуванню вентиляції вугільних шахт. – К.: Основа, 1994. – 312 с.

12. Правила безпеки у вугільних шахтах. ДНАОП 10.0 - 1.01 - 10. – К.: Держгірпромнагляд України, 2010. – 432 с.

13. Савельєв Д.В. Шляхи зниження викидів пилу при проведенні підготовчих виробок у вугільних шахтах // Геотехнічна механіка / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Д., 2014. – № 117. – С. 189-196.

14. Суміш для забивки шпурових зарядів. Пат. на винахід №107156 Україна МПК F42D 1/08, C04B 33/00, 2013 11763. Опубл. 25.11. 2014, Бюл. №22, Автори: Голінько В.І., Лебедев Я. Я., Іщенко К.С., Кратковський І.Л.

15. Савельєв Д.В. Дослідження впливу поверхнево-активних речовин на склад пилу при руйнуванні гірських порід вибухом / Д.В. Савельєв // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Випуск 1/2016(96). – С. 69-75.

16. Довідник по боротьбі з пилом в гірничодобувній промисловості / Під редакцією Кузьмича А.С. – Опубл. Надра, 1982. – 240 с.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності знепилювання повітря при проведенні гірничих виробок буропідривним способом, яке полягає у встановленні закономірностей процесів утворення, виносу і поширення пилогазових домішок і розробка на цій основі ефективних способів і засобів зниження концентрації високодисперсного пилю.

Основні наукові і практичні результати роботи:

1. Встановлено, що утворений дрібнодисперсний пил при виконанні вибухових робіт в тупиковій виробці, поширюючись по ній під дією аеродинамічних сил вентиляційного потоку, частково осідає по її довжині за рахунок явища поперечної міграції частинок пилю до її поверхні і процесу турбулентної коагуляції частинок. При цьому ефективність осадження частинок за рахунок цих явищ, для умов провітрювання тупикових виробок, знаходиться на рівні 3,5% на 100 п.м виробки.

2. Розроблено математичну модель турбулентного переносу дрібнодисперсного пилю, яка відрізняється від відомих тим, що враховує вплив деформації пилової хмари на величину концентрації пилю за довжиною виробки, яка проводиться буропідривним способом.

3. В результаті теоретичного аналізу процесу турбулентної міграції дрібнодисперсних частинок отримано аналітичні вирази, що дозволяють визначати концентрацію пилю на будь-якій відстані від імпульсного джерела пилоутворення залежно від параметрів вибуху, петрографічного складу вуглепородного масиву і умов провітрювання підготовчої тупикової виробки.

4. На підставі теорії турбулентно-інерційного осадження дрібнодисперсної твердої фази з двофазних газодисперсних систем і явища поперечної міграції частинок до поверхні каналу отримано вираз для оцінки частки осілих слабоінерційних дрібнодисперсних частинок, що дозволяє визначити величину ефективності турбулентного осадження частинок пилю при

русі пилової хмари в гірничій виробці після виконання вибухових робіт в привибійній зоні тупикової виробки.

5. Отримано вираз для визначення концентрації дрібнодисперсного пилу в турбулентному потоці з урахуванням процесу турбулентної коагуляції, що дозволяє оцінити ефективність осадження пилу за рахунок утворення конгломератів з дрібнодисперсної фракції.

6. Розроблено метод моделювання вибухового руйнування гірських порід, який включає створення моделі гірського масиву, формування в ній вибухових порожнин, їх заряджання, комутацію вибухової мережі і підривання, що відрізняється тим, що на початку у вибої підготовчої виробки в напрямку її проведення здійснюють відбір зразків породи, виготовляють модель гірського масиву, потім в торці моделі формують дві порожнини, одна, що імітує гірничу виробку, друга – для вибухової речовини; в підготовлену порожнину розміщують патрон ВР з ініціатором, а устя герметизують набійкою, підготовлену модель встановлюють у вибухову камеру.

7. Показано, що при руйнуванні твердих гірських порід вибуховими навантаженнями процес утворення дрібнодисперсного силікоzoneбезпечного пилу відбувається за рахунок формування новостворених поверхонь по внутрішньозерновим дефектам будови кварцу. Встановлено, що в насичених лужними розчинами ПАР пісковиках, де вміст мінералу кварцу перевищує 40%, зміна механізму руйнування відбувається на мікрорівні, при цьому новоутворені поверхні формуються по контактам зерен кварцу з іншими пороодоутворюючими мінералами.

8. Показано, що застосування пружньопластичної суміші в складі набійки, яка розширюється і твердіє, забезпечує перерозподіл енергії ВР по всій колонці заряду, зниження питомого імпульсу в зоні інтенсивного переподрібнення породи і зменшення надходження в гірничу атмосферу дрібнодисперсних фракцій пилу, що утворюються в забої при вибуховому способі проведення гірничих виробок.

Виконані в роботі теоретичні і експериментальні дослідження впроваджено Науково-проектним інститутом з проектування гірничих підприємств НТУ «Дніпровська політехніка» при розробці проєктів проведення гірничих виробок буропідривним способом.

Результати роботи впроваджено у виробничому структурному підрозділі ВП «ШАХТОУПРАЛІННЯ ТЕРНІВСЬКЕ» ПрАТ «ДТЕК ПАВЛОГРАДВУГІЛЛЯ» для використання при розробці заходів знепилювання гірничих виробок.

Використання результатів роботи в практиці боротьби з дрібнодисперсним силікоzoneбезпечним пилом дозволить істотно підвищити рівень безпеки при проведенні гірничих виробок буропідривним способом і поліпшити санітарно-гігієнічні умови праці на робочих місцях.

Наукове видання

Дмитро Володимирович **САВЕЛЬСВ**
Олексій Володимирович **ХАЛИМЕНДИК**
Станіслав Сергійович **БАРАБАНОВ**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗНЕПИЛЮВАННЯ ПОВІТРЯ
ПРИ БУДІВНИЦТВІ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД
БУРОПІДРИВНИМ СПОСОБОМ**

Монографія

Видано в редакції авторів

Підписано до друку _____2025

Електронний ресурс Обл.-вид. арк. __.

Підготовлено до друку

в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка»

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру

ДК № 1842 від 11.06.2004

49005, м. Дніпро, просп. Дмитра Яворницького, 19.