

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Факультет інженерії

Кафедра хімічної інженерії та екології

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до випускної кваліфікаційної роботи  
освітньо-кваліфікаційного рівня **магістр**

спеціальності 184 «Гірництво»

на тему:

**Дослідження руху повітря і контролю пилу в очисному вибої  
під час роботи комбайна**

**Виконав** студент групи ГІР-24дМ

.....  
(підпис)

Зябін С. І.

**Керівник**

.....  
(підпис)

Захарова О.І.

**Завідувач кафедри**

.....  
(підпис)

Зубцов Є.І.

**Рецензент**

.....  
(підпис)

Київ, 2025

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Факультет інженерії  
Кафедра хімічної інженерії та екології  
Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр  
Спеціальність: 184 «Гірництво»

**ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри**

 доц. Зубцов Є.І.

«\_13\_» \_\_\_\_10\_\_\_\_ 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

**Зябін Сергій Ігорович**

1. Тема роботи: Дослідження руху повітря і контролю пилу в очисному вибої під час роботи комбайна.  
Керівник роботи: Захарова О.І., к. х. н., доц. кафедри,  
затверджено наказом закладу вищої освіти від 13.10.2025 р. № 208/20.04
2. Строк подання студентом роботи: 15.12.25р.
3. Вихідні дані до роботи: матеріали переддипломної практики та гірничотехнічна література.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): згідно програми дипломного проектування та методичних вказівок по складанню дипломної роботи студентами напряму підготовки 184 «Гірництво».
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
  1. Геологічний розтин родовища.
  2. Схема розкриття, підготовки та система розробки.
  3. Паспорт виймання вугілля, кріплення та управління покрівлею у лаві.
  4. Паспорт проведення та кріплення підготовчої виробки.
  5. Основна частина проекту.
  6. Економічна частина проекту.

6. Консультанти розділів:

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|        |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
|        |                                           |                |                  |
|        |                                           |                |                  |

7. Дата видачі завдання 13.10.25

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної магістерської роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1     | Геологія родовища                                 | 15.10.25                       |          |
| 2     | Розробка основних напрямків проекту               | 31.10.25                       |          |
| 3     | Основна частина проекту                           | 05.12.25                       |          |
| 4     | Економічна частина проекту                        | 10.12.25                       |          |

**Здобувач**



**Зябін С. І.**

**Керівник роботи**



**Захарова О.І**

## ЗМІСТ

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| РЕФЕРАТ .....                                   | 5  |
| ВСТУП .....                                     | 6  |
| 1. ГЕОЛОГІЧНА ЧАСТИНА ПРОЕКТУ .....             | 7  |
| 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО НАПРЯМКУ РОБОТИ..... | 22 |
| 3. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА .....                     | 31 |
| ВИСНОВКИ .....                                  | 63 |
| АНОТАЦІЯ.....                                   | 64 |
| ANNOTATION .....                                | 65 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....             | 66 |

## РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота: 74 стор., 31 рис., 5 табл., 94 джерела літератури, 8 аркушів графічної частини.

Під час видобутку вугілля та гірської породи пил розсіюється в повітрі. Цей пил, серед інших забруднювачів, становить серйозну загрозу для здоров'я та безпеки шахтарів. Дуже дрібний пил, відомий як респірабельний пил, може проникати в найглибші частини легень, а тривалий вплив цих частинок призводить до захворювання, яке називається пневмоконіозом вугільників. Випадки цього захворювання постійно знижувалися протягом другої половини 20-го століття, однак нещодавнє дослідження показало з тенденцією до зростання, починаючи з початку століття. Для боротьби з впливом пилу оператори шахт використовують комбінацію водяних розпилювачів та пилових скрубєрів у поєднанні з вентиляцією вибою. Дослідники використовують різноманітні методи моделювання, включаючи повномасштабне, зменшене та комп'ютерне моделювання, щоб зрозуміти явища потоку в активному вибої. Масштабні моделі показали умови для розробки законів масштабування, які допомагають перевірити числове моделювання та розробити більш точні фізичні моделі.

У цій роботі представлені вимірювання потоку повітря, виконані в рамках зменшеної моделі, на різних глибинах різання безперервною виробкою. Результати цих експериментів визначають зв'язок потоку повітря під час фази різання та допомагають дослідникам зв'язати кількість необхідних симуляцій, оскільки розробляються нові засоби керування вентиляцією або схеми.

ВЕНТИЛЯЦІЯ ВИБОЮ, БЕЗПЕКА ВУГІЛЬНИХ ШАХТ,  
МОДЕЛЮВАННЯ

## ВСТУП

Пил та інші забруднювачі повітря становлять серйозну загрозу для здоров'я та безпеки шахтарів. Під час руйнування вугілля та інших порід гірничодобувна техніка розсіює пил в повітря та вивільняє метан, що утримується в пластах. З пилу, що утворюється на вибої, найбільше занепокоєння для здоров'я шахтарів викликає респірабельний пил. Респірабельним пилом вважаються частинки діаметром менше 10 мікронів [1-2]. Частинки такого малого розміру можуть проходити повз природні захисні механізми організму до найглибших частин області газообміну в легенях, звідки організм не в змозі їх видалити. Постійний вплив респірабельного пилу призводить до пневмоконіозу – загального терміна для позначення пошкоджень, спричинених вдиханням пилу. У гірничодобувній промисловості двома основними формами пневмоконіозу є пневмоконіоз вугільників, також відомий як чорна легеня, та силікоз, спричинений впливом вугільного та кремнеземного пилу[2-7].

Протягом 20-го століття поширеність пневмоконіозу зменшилася, однак NIOSH виявив, що спостерігається зростання захворюваності, починаючи з кінця 1990-х років [5-12].

Ці висновки спонукали до посилення досліджень та прийняття нового законодавства для зменшення впливу пилу на шахтарів. Норми концентрації респіраторного пилу для шахтарів були знижені з 2,0 мг/м<sup>3</sup> до 1,5 мг/м<sup>3</sup>, за умови, що вміст кварцу в пилі нижче п'яти відсотків [13-15]. Ще зарано знати результати нового стандарту пилу; але, оскільки показники поширеності пневмоконіозу продовжують зростати, необхідно зробити більше для забезпечення здоров'я шахтарів.

## 1. ГЕОЛОГІЧНА ЧАСТИНА ПРОЕКТУ

Вугільна шахта розташована на північному краю вугільного басейну А. Близькість гранітної свити 1, яка виходить на поверхню поблизу коробчастого вирізу, до пласта №2 робить її дуже складною для експлуатації. Вугільний пласт імітує гранітний палеотопографію та призводить до надзвичайно швидкої зміни умов пласта. Деякими з пов'язаних з цим проблем є катки дна та раптова зміна товщини вугільного пласта. Шахта працює вже чотири роки, протягом яких було видобуто найкращі частини рудного тіла. Висота пластів перевищувала 1,5 метра. У північно-західній частині шахти надмірна катка дна перешкоджала видобутку. У деяких районах шахти пласт розділений на тонкий (0,01 - 0,15 м) верхній та товщий нижній (1,2-1,75 м) пласт розділенням пісковика, що йде вгору, що укрупнюється. Наразі видобуток ведеться під цим розділенням пласта, де висота пласта коливається від 1,5 до 1,75 м. В інших районах родовища переважають дуже тонкі пластові умови під розділенням з висотою від 1,2 до 1,4 метра.

Ці тонкі пластові ділянки раніше вважалися непридатними для розробки та виключалися із запасів. Ці ділянки містять дуже високоякісне вугілля та мають потенціал додати ще 6 років до терміну служби шахти.

Топографія пологий хвилястий (рис. 1.1) з кількома невеликими притоками, що дрениують територію. Попередній фермер або власник побудував кілька сільськогосподарських дамб на цій території.

Територія малонаселена, кілька сільськогосподарських робітників проживають у хатинах для робітників. Використання бортових та стовпових методів видобутку корисних копалин та належним чином спроектовані стовпи запобігають просіданню поверхні. З точки зору цілей сталого розвитку, поверхню слід повернути до її первісного використання для

сільського господарства, оскільки видобуток корисних копалин мав мінімальний негативний вплив на поверхню.

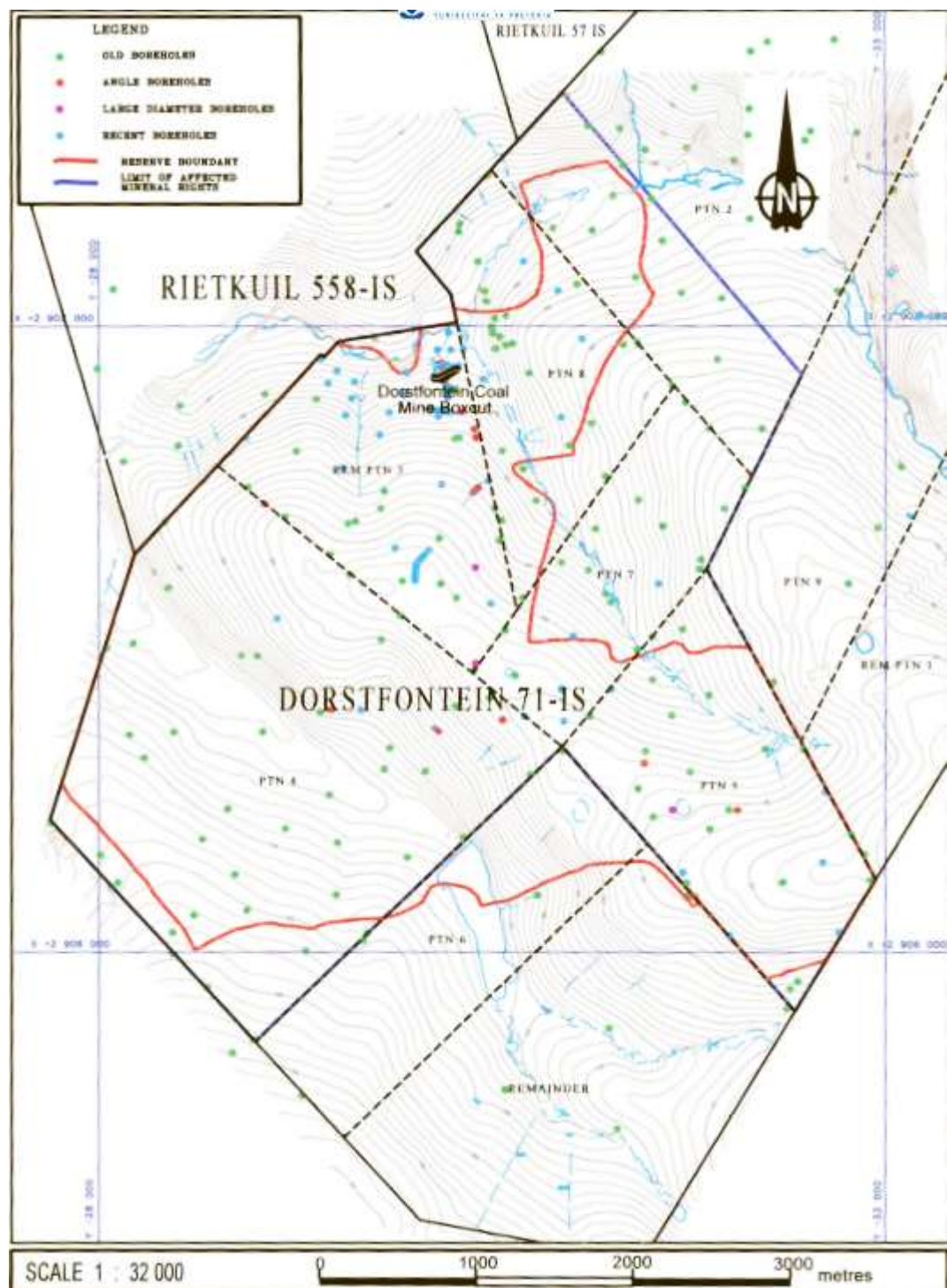


Рис. 1.1. Топографія поверхні та план свердловини.



З початку 1960-х років на підприємстві було пробурено загалом 174 свердловини, з яких 19 були похилими для підтвердження положень даюк долериту (рис. 1.1) [13-15]. Згодом, з початку видобутку в 1999 році, в резервній зоні було пробурено ще 64 свердловини. Ці свердловини мали обмежені дані щодо промивності для пласта № 2, оскільки розвідано лише пласт № 4 (рис. 1.2). У деяких випадках було проведено лише приблизний аналіз сирого вугілля з пласта № 2. Усі розвідувальні компанії скасували свої опціонні угоди та права на розвідку, оскільки пласт № 4 має низьку якість та вважається неекономічним.

У 1995 році було проведено вертолітне аеромагнітне дослідження високої роздільної здатності для визначення магнітних даюків [13-15]. Деякі аномалії були підтверджені бурінням кутових свердловин та наземною магнітометрією. У 1997 році було проведено вертолітне електромагнітне дослідження для визначення деяких немагнітних даюків. Були виявлені аномалії та пробурені кутові свердловини, які підтвердили, що деякі з цих аномалій є даюками долериту [13, 15-17]. Більшість основних даюк долериту в районі видобутку були правильно передбачені, і під час видобутку було виявлено дуже мало несподіванок. Лише кілька тонких даюк/стрингерів долериту були

Геометрія палеофундаменту визначала геометрію та товщину пласта №2 (рис. 1.2 та 1.3). Швидкість просідання поверхні під час накопичення торфу контролювала товщину та характер вугілля. Варіації висоти можна пояснити геологічними подіями до та під час відкладення [15-20]

Єдиний вугільний пласт на півночі розділений на верхній та нижній пласти на півдні стійким піщаниковим розщепленням (рис. 1.2 та 1.3). Розщеплення розташоване ближче до вершини пласта та має товщину від 0,0 до 0,75 м. Верхній пласт №2 тонкий (товщиною від 0,01 до 0,35 м), і лише нижній пласт № 2 утворює економічну одиницю.

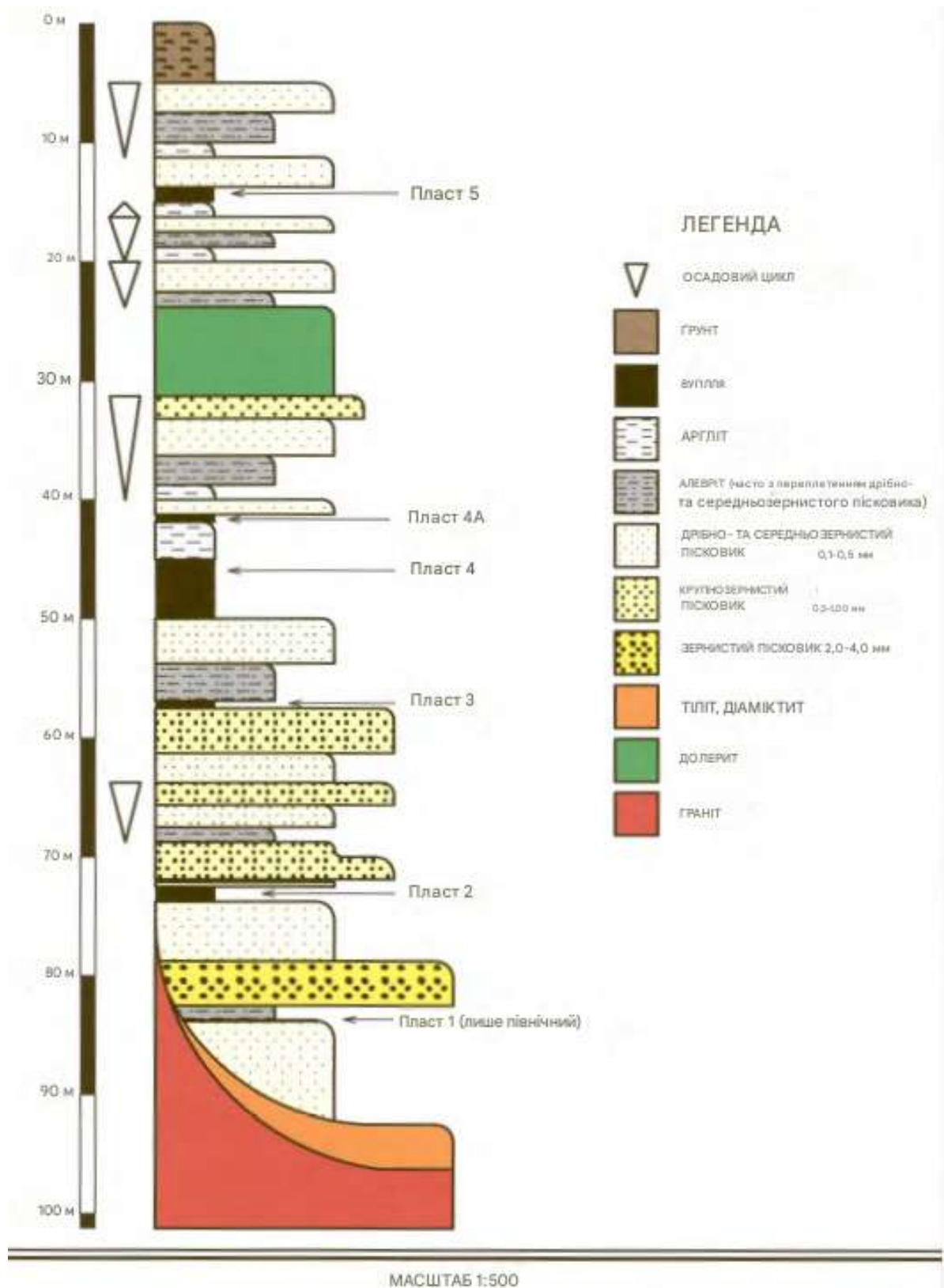
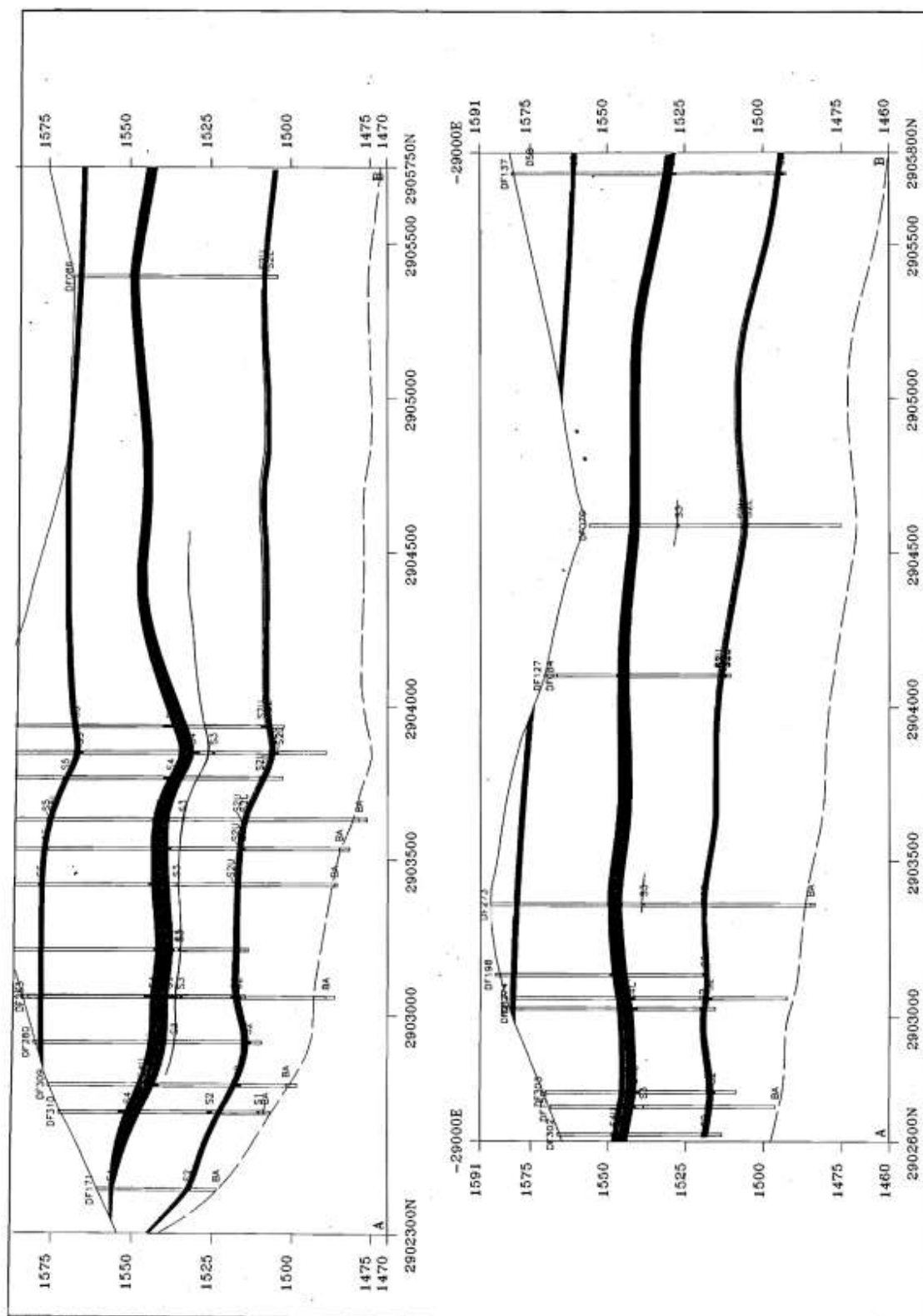


Рис. 1.2. Загальний стратиграфічний каротаж [15-20].



У районі тонкого пласта №2 розрив є потужним, і оскільки лише 0,3 м достатньо для формування безпечної балки, цей розрив сформує належний дах для нижньої, придатної для розробки частини пласта №2.

Висота основи тонкого пласта №2 коливається від 1511 до 1518 м над рівнем моря (рис. 1.4). Топографія пласта відображає рельєф докарру, пласт має плавне падіння зі сходу на захід до палеодолини північно-південного простягання. Загальне регіональне падіння пласта відбувається з півночі на південь, тобто від виходу граніту до басейну відкладень. У досліджуваній зоні вугільний пласт плоский з ледь помітним падінням на південь.

Загальна товщина шва №2, включаючи проділ, показана на рис. 1.5. Центральна область максимальної товщини відображає зону максимальної товщини проділу. У досліджуваній області товщина шва під проділом коливається від 1,2 до 1,4 м (рис. 1.6).

У зоні, де відбувається розкол шва, верхній шов №2 розвинений і має товщину від 0,01 до 0,35 м. Кореляції немає між товщиною верхнього пласта №2 та товщиною нижнього розділювального шару. Чистий, добре відсортований пісковик, що перекриває верхній пласт №2, має зазвичай тонку, мулисту зону біля основи. Це свідчить про порушення поверхні торфу під час трансгресії. Відсутність уламків розриву вказує на незначну або повну відсутність ерозії пласта [17-21].

Товщина розділювального шару коливається від 0,0 до 0,75 м з максимальною товщиною в лінійній зоні, що простягається зі сходу на захід (рис. 1.4). Розділювальний шар складається з висхідної послідовності укрупнення, що переходить від лінзоподібно-шаруватого алевроліту через перешаровий пісковик-алевроліт до перехресно-шаруватого пісковика у верхній частині.

Літологія та геометрія вказували на наявність розсипного відкладення у тріщинах, яке виникло з системи каналів на сході заповідної зони [20-23].

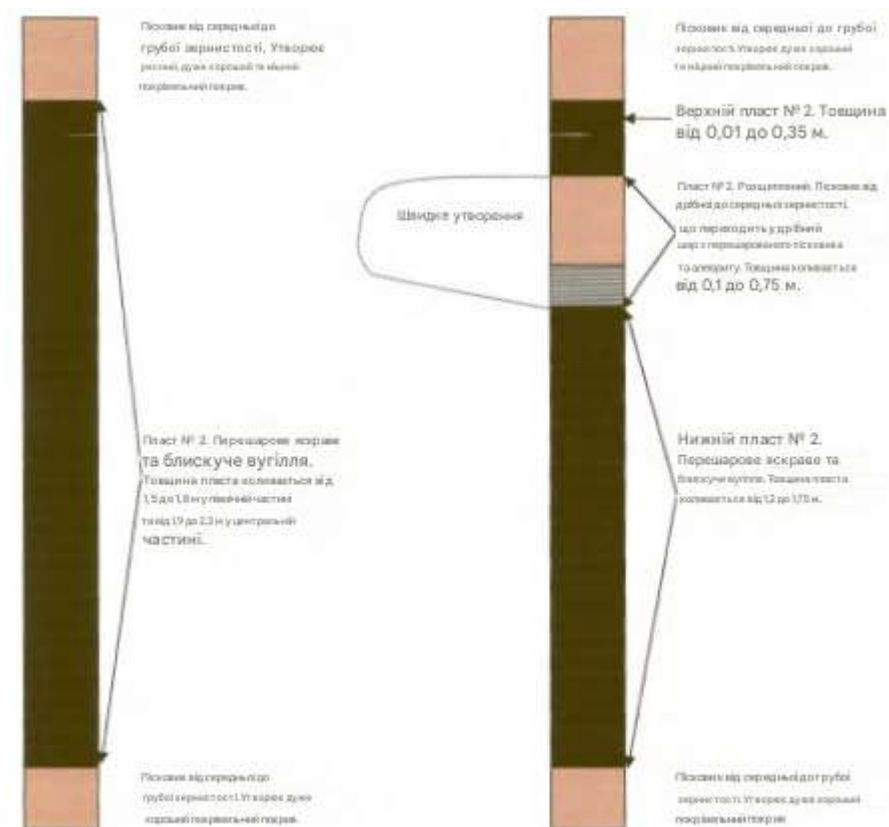


Рис. 1.4. Шов № 2 та шов № 2 з роздільним проділом.

Випробування на механічну міцність були проведені на керні з програми буріння 2002 року [22-24]. Результати показали, що розрив є придатним і не руйнуватиметься під час видобутку, і що він утворюватиме безпечну балку, якщо її скріпити болтами з повним анкерним кріпленням з смоли. Єдиною умовою є те, що метод видобутку нижче розриву не повинен бути традиційним буровибуховим методом, а бажано механічним методом безперервного видобутку. Механічні методи видобутку викликають найменше порушення та можливе розділення шаруватих пластів, що може призвести до стоншення балки до небезпечних пропорцій.

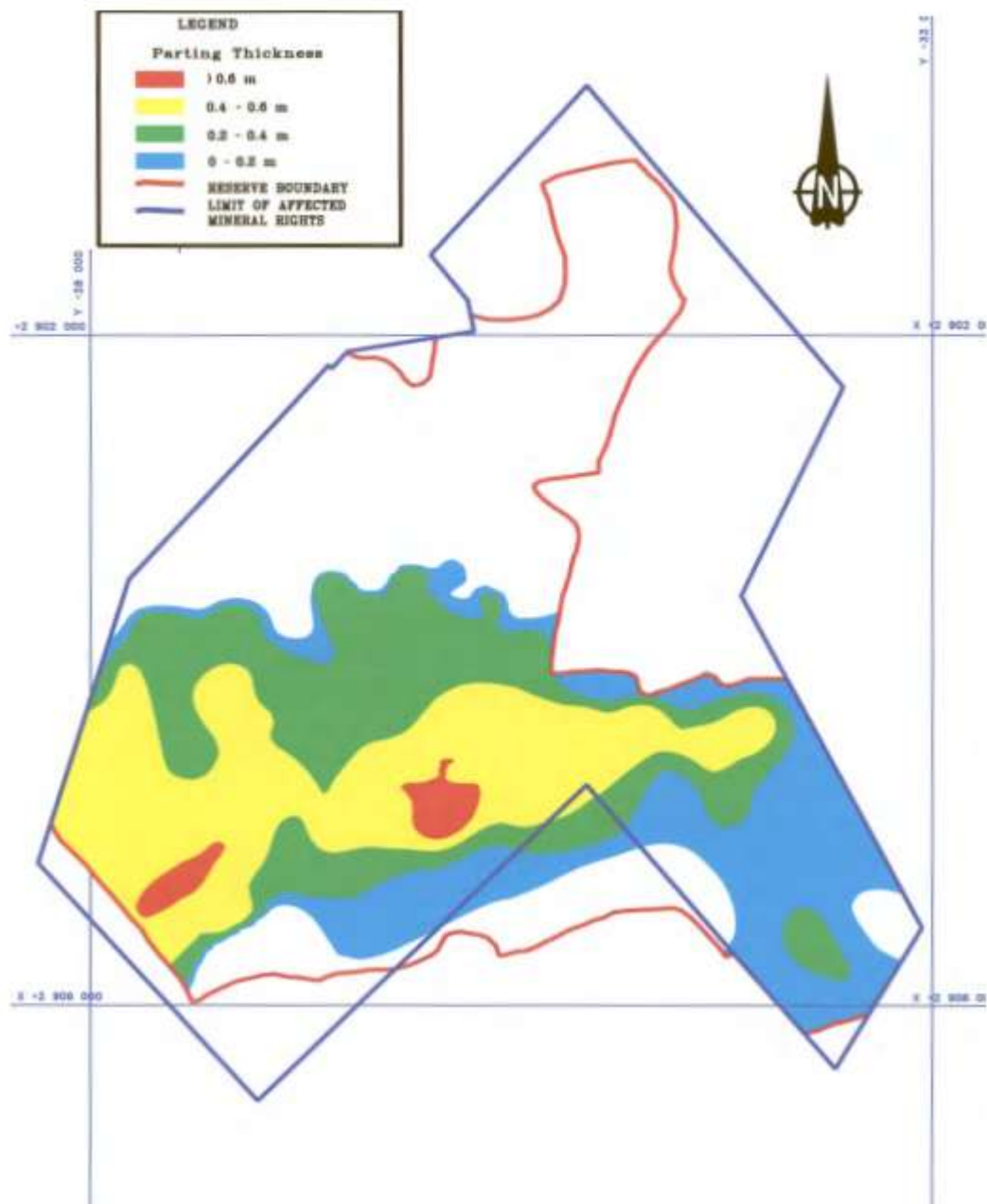


Рис. 1.5. Товщина та положення роздільного шва .

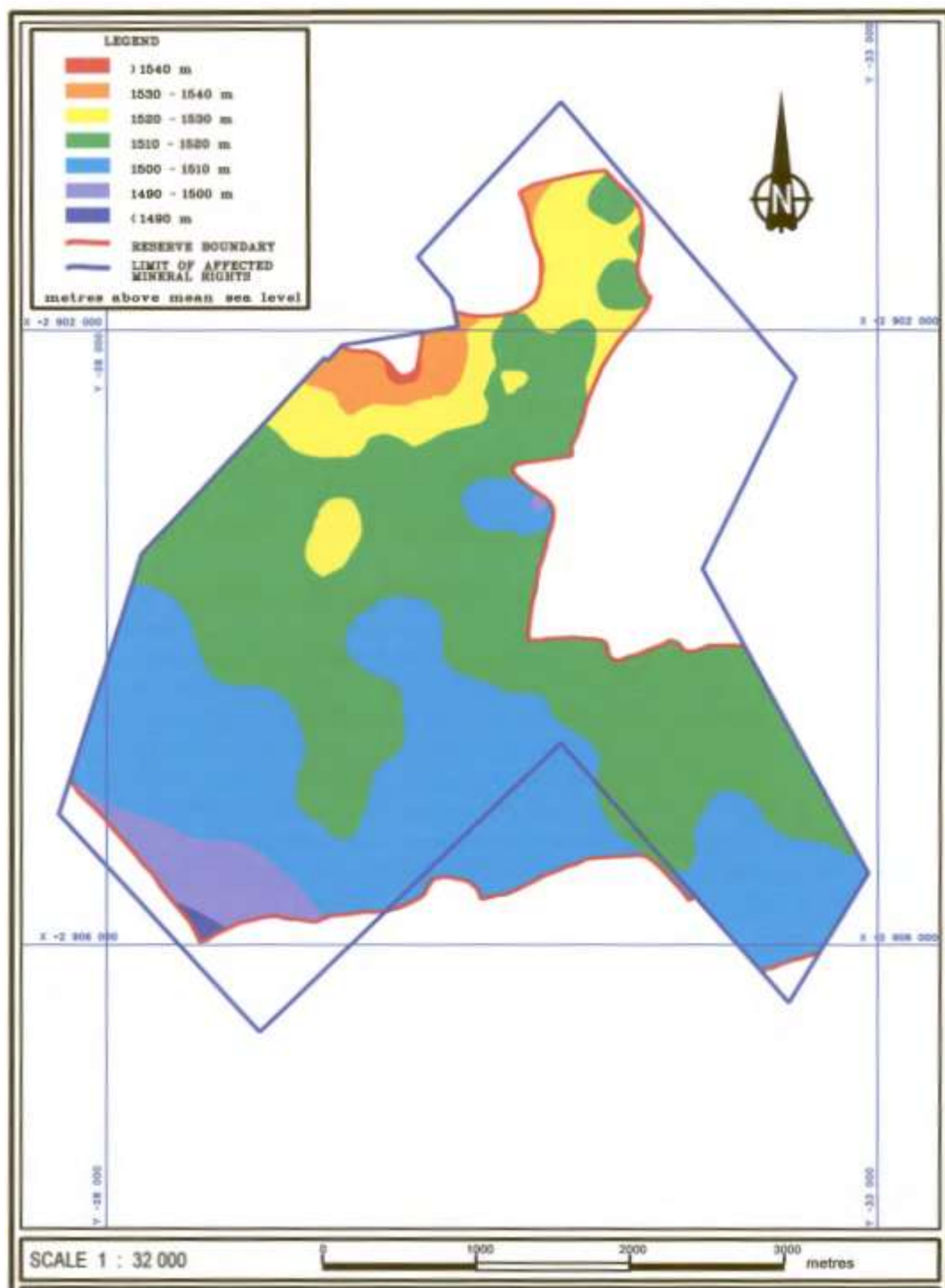


Рис. 1.6. Висота основи шва № 2.



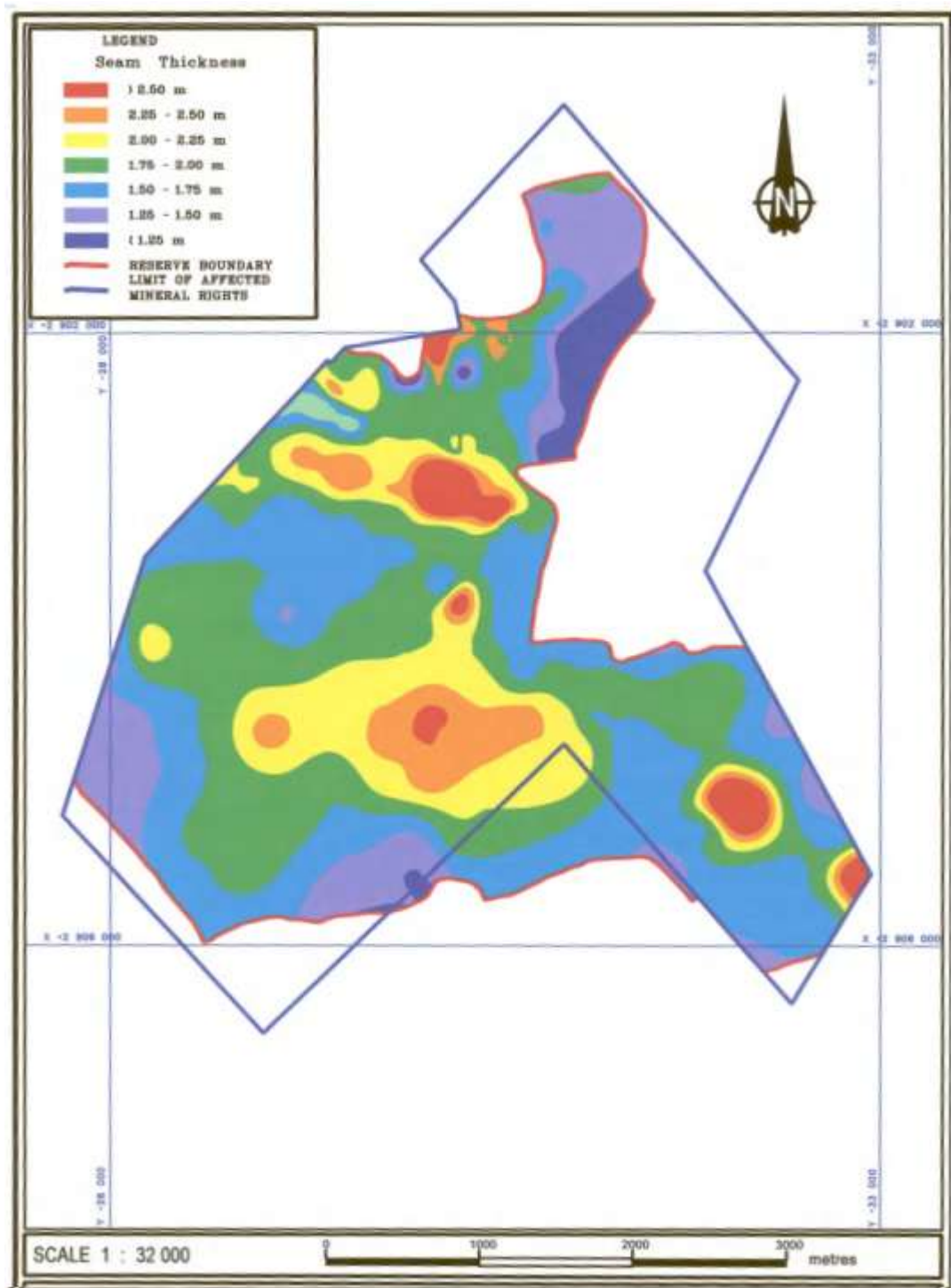


Рис. 1.7. Загальна товщина шва № 2, включаючи розділений шов.



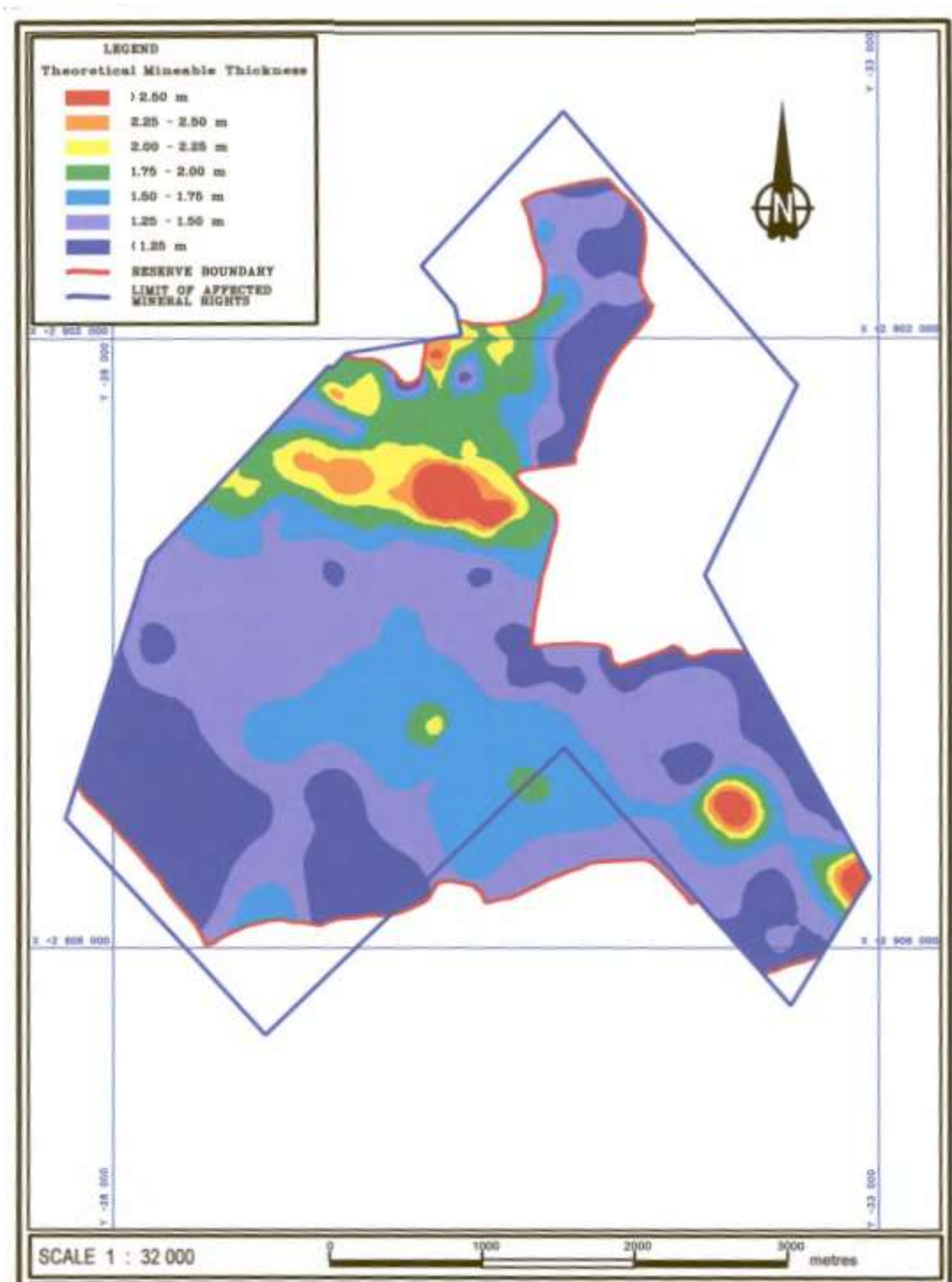


Рис. 1.8. Товщина пласта, що розробляється, тонкого пласта № 2.

Розкриття покрівлі (розшарування) на кільцевій дорозі та основних проїзних дорогах, щоб збільшити висоту для переміщення людей та транспортних засобів. Розкриття, яке зазвичай виконується до висоти 1,8 м, оголить верхній дрібнозернистий, однорідний, чистий та добре

відсортований піщаник, який наразі утворює покрівлю. Цей пласт здебільшого не має пластових шарів та не має мулистих прошарку. Зрідка спостерігаються випадки біотурбації та перехресного залягання. Ці випадки не мають жодного негативного впливу на загальну міцність породи [24-27].

Вся порода покрівлі (розшарування) буде видобуватися як другий розріз та зберігатися під землею, щоб запобігти забрудненню видобутого вугілля. Під пластом лежить міцний, середньозернистий піщаник. Піщана підлога утворює завершальну стадію відкладення дельтової платформи, що просувається, на якій розвинувся вугільний пласт [21, 23-27]. У районах, що зараз розробляються, та старих виробках підлога все ще є придатною для видобутку та не відшаровувалася та не руйнувалася під час руху транспортних засобів. Очікується, що вона буде поводитися так само в районах тонких пластів.

Зустрічаються магнітні та немагнітні дайки, а також магнітні долеритові сілли (рис. 3.12). Вони були виявлені за допомогою геофізичних досліджень та перетинів свердловин [21-23]. У досліджуваній зоні та на поточному заповіднику долеритові сілли не залягають під пластом, що розробляється. На сході поточного заповідника долеритовий сілл вертикально проходить через пласти та виходить на поверхню. Він залягає під пластом № 2 на сході, зміщує пласт вгору на ту ж відстань, що й товщина долериту, і таким чином робить вугілля недоступним та непридатним для видобутку через цей розрив. Це положення трансгресії сілла було використано для визначення східної межі поточного видобувного запасу.

На півдні досліджуваної території за допомогою аеромагнітної зйомки було виявлено головну магнітну дайку. Вона має більш-менш східно-західне простягання та близька до вертикального. Видобуток корисних копалин через цю дайку довели її товщину 2,8 м у місці її перетину. У західній частині досліджуваної території розташовані 3 дайки. Видобуток підтвердив їхнє положення під час південної розробки в напрямку вищих

пластових зон, так званої Південної Головної зони. Всі ці дайки були відносно тонкими (товщиною  $< 2$  м) і не мали серйозного впливу на вугільний пласт. Зроблено висновок, що ці дайки не повинні створювати серйозної проблеми для розробки в області тонкого пласта.

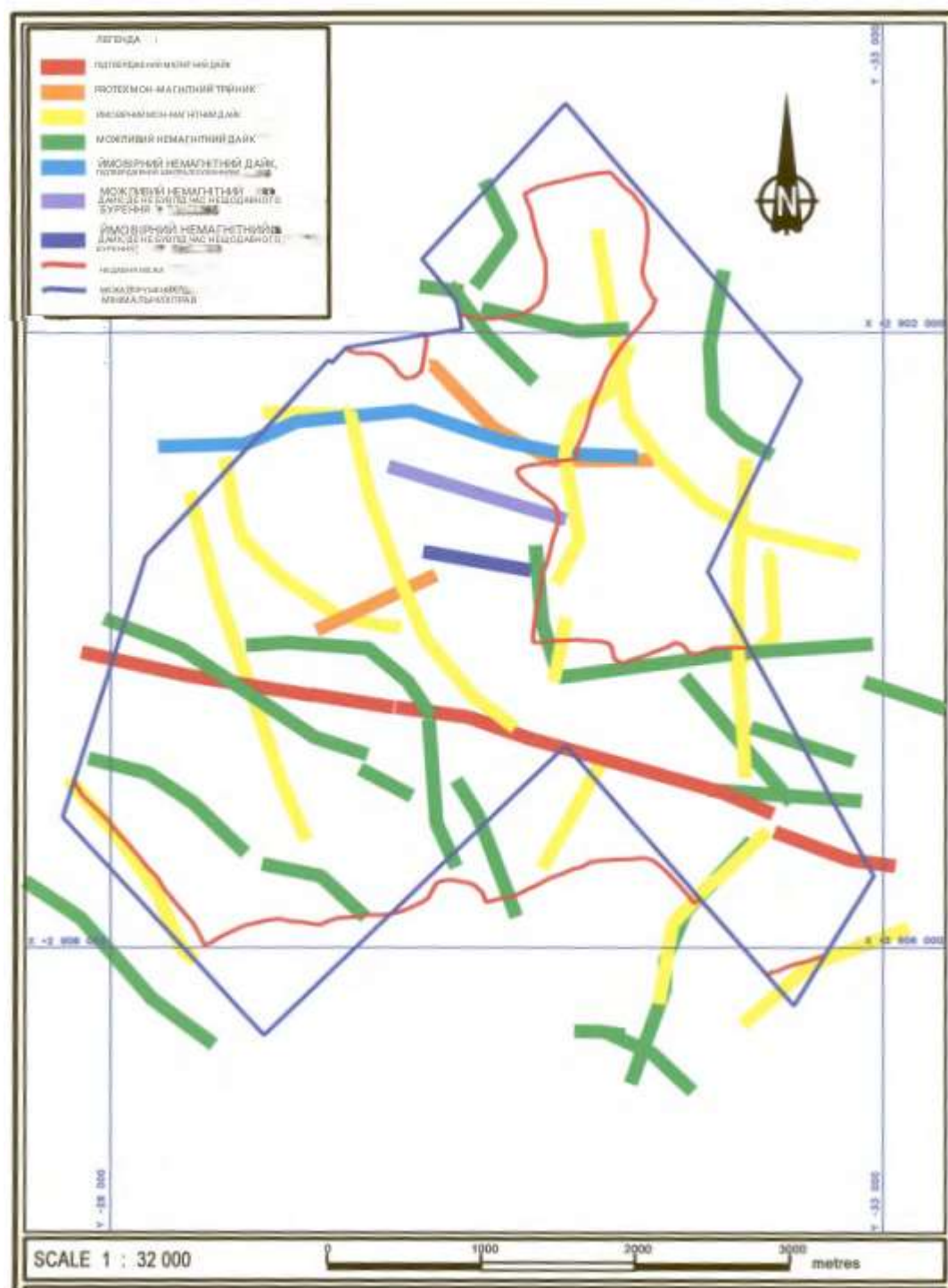


Рис. 1.9. Позиції долериту

Як видно, ресурси від 1,2 до 1,4 м становлять 24,73% від загальних ресурсів пласта № 2. Інтервали від 1,2 до 1,4 м становитимуть 26,68% від видобувних ресурсів, якщо не враховувати тоннажі нижче 1,2 м. Очікувані видобувні ресурси вугілля тонкого пласта № 2 становлять 7,06 млн тонн на місці.

У таблиці 1.1 наведено теоретичну вимивну таблицю для ресурсів тонких пластів у досліджуваній області. Детальний опис якостей вугілля та параметрів продукції буде наведено в наступних абзацах. Наразі підприємство орієнтується на металургійний ринок, який визначає мінімальну теплотворну здатність 26,0 МДж/кг, вміст летких речовин вище 26,5%, вміст сірки нижче 1,0%, низький вміст золи та дуже низький вміст фосфору (<0,010%).

Таблиця 1.1. Середня ступінь промивання для зони тонкого шва № 2 (сушіння на повітрі)

| Продукт | Вихід  | CV    | Зола  | H <sub>2</sub> O | 32.18 | FC    |
|---------|--------|-------|-------|------------------|-------|-------|
| 1.35    | 22.49  | 30.07 | 7.21  | 3.12             | 32.32 | 57.49 |
| 1.37    | 33.27  | 32.17 | 7.57  | 3.17             | 30.16 | 57.95 |
| 1,40    | 46.00  | 29.65 | 8.14  | 3.15             | 28.33 | 58.56 |
| 1.45    | 65.95  | 29.15 | 9.23  | 3.18             | 27.18 | 59.27 |
| 1.50    | 80.32  | 28.72 | 10.25 | 3.17             | 26.52 | 59.41 |
| 1.60    | 89.22  | 28.31 | 11.25 | 3.15             | 26.42 | 59.08 |
| 1.70    | 91.65  | 28.18 | 11.59 | 3.14             | 26.27 | 58.86 |
| 1.80    | 92.97  | 27.93 | 12.20 | 3.12             | 25.72 | 58.42 |
| 2.20    | 100.00 | 26.65 | 15.54 | 3.00             | 32.18 | 55.75 |

З таблиці промивання та екстракції продукту зрозуміло, що ресурс тонкого шва відповідає специфікаціям усталених ринків. Крім того, можна

побачити, що вихід продукту високий у регіонах, що відповідають специфікаціям продукту

Для геологічного дослідження 1999 року значення якості вугілля були вказані як  $RD.=1,6$  на повітряно-сухий основі [24-27]. При цій фракції промивання шахта була життєздатною, і вугілля могло бути економічно експлуатовано. Зазвичай вказуються такі параметри якості: вихід, теплотворна здатність (CV), % зольності, % вологості, % летких речовин (об'ємів), % фіксованого вуглецю (FC), % сірки (S) та % фосфору (P). На практиці було виявлено, що більш практично промивати вугілля для досягнення вмісту золи 13,5% (повітряно-сухий).

Ринок також охоче прийняв цю якість, оскільки це мало вплинуло на вміст летких речовин та теплотворну здатність. Тому всі поточні якості вказані як для вмісту золи 13,5%. У досліджуваній області вміст золи становить 11,6% при  $RD. = 1,6$ . Прямим наслідком збільшення вмісту золи є збільшення видобутку. Таким чином, у досліджуваній області середній вихід 89,2% при  $RD. = 1,6$  зріс на 6,5 процентних пунктів до 95,7% при вмісті золи 13,5%[27-30].

Це пов'язано зі збільшенням приблизно на 2100 тонн на місяць обсягу товарного вугілля лише з тонкого пласта.

## 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО НАПРЯМКУ РОБОТИ

У вентиляції камер та стовпів вугільних шахт свіже повітря надходить у шахту через ствол або штольню. Свіже повітря подається в робочі зони через впускні повітроводи, а забруднене повітря видихається через зворотні. Нейтральне повітря зазвичай знаходиться між впускними та зворотними функціонуючи як буфер між ними.

Свіже повітря з вентиляційної мережі шахти подається до забою за допомогою системи штор, також відомих як лінійні ґратки. Шторки встановлюються тимчасово у вході та висуваються після кожного розрізу, причому відстань від забою до кінця ґратки називається відступом. Існує дві стандартні схеми вентиляції забою: продувна та витяжна.

Основні очевидні відмінності між продувною та витяжною системами полягають у напрямку повітря відносно завіси.

У продувній системі(рис. 2.1), впускне повітря спрямовується до забою з-за лінійної ґратки (так званої щільної сторони) та одразу ж розділяється на кінці завіси, причому значна його частина надходить безпосередньо до зворотного повітряного потоку [31-33]. Оператор видобувної комбайни безперервної дії може розташуватися у повітряному каналі в кінці завіси, але оператори вторинного обладнання (наприклад, оператори човникових вагонеток) завжди будуть розташовані у зворотному повітроводі. Така система вентиляції забою обмежує оператора видобувної комбайни безперервної дії визначеною зоною, якщо він/вона бажає залишатися в межах доступу свіжого повітря. Таким чином, система дуття зменшує видимість оператора, обмежуючи його/її певним місцем. Однак вона вважається найефективнішою системою для видалення газоподібного метану

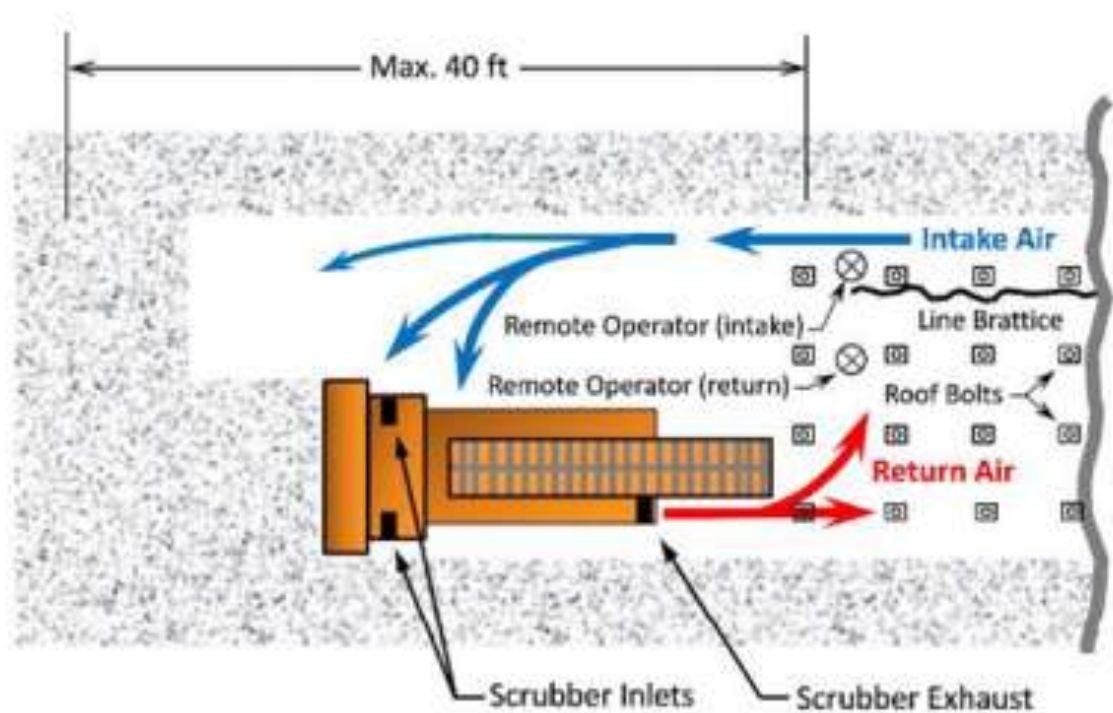


Рис. 2.1 Система вентиляції з продувкою

У витяжній системі впускне повітря подається з завіси або широкої сторони.

Цей метод (рис. 2.2) забезпечує найкраще положення для шахтарів, оскільки він забезпечує більший діапазон руху та видимість для оператора безперервної роботи шахтаря та розміщує інших працівників, наприклад, операторів вагонеток-шатлів, у зоні впускного повітря. З цієї причини це також є кращим для підземних вугільних шахт [32-35]. Однак, скруббер повинен бути вимкнений протягом значного часу під час використання витяжної системи, оскільки кінець лінійної решітки завжди повинен бути позаду випуску скрубера.

Тим не менш, деякі дослідники вважають, що витяжна система має перевагу в продуктивності над системою продувки з точки зору видалення пилу, оскільки пил та забруднюючі речовини змітаються на зворотну сторону повітроводів через завісу або витяжну трубу.



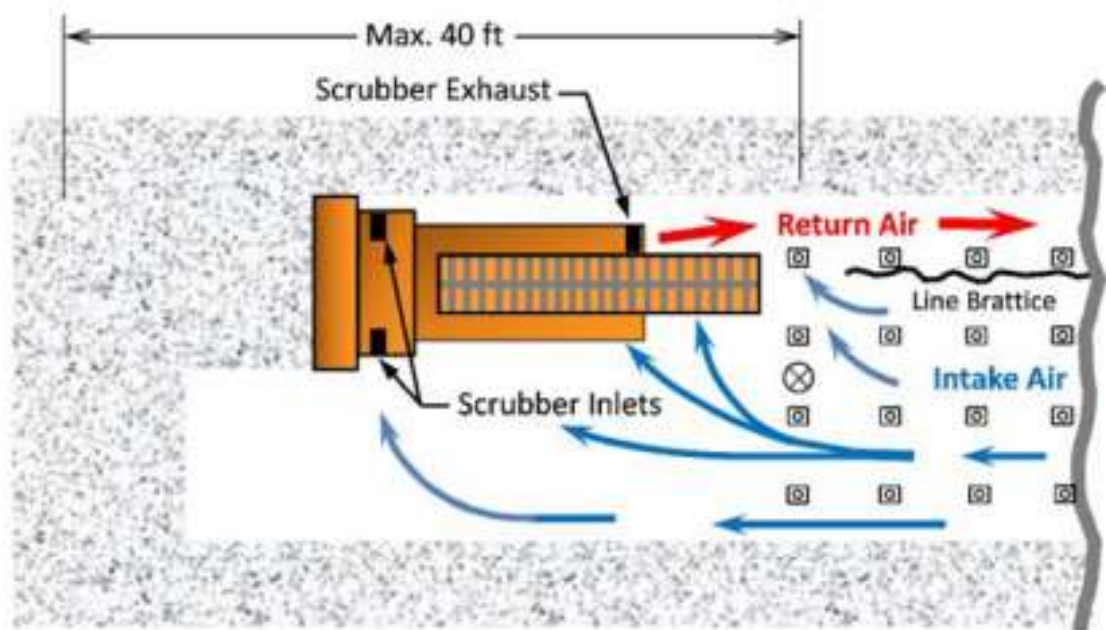


Рис. 2.2 Витяжна вентиляційна система

Обидва методи покладаються на свіже повітря, що досягає вибою, для розрідження та видалення забруднювачів, і в кожному випадку явище розділення відбувається в кінці завіси [35-37]. Пиловий скруббер допомагає свіжому повітрю досягати вибою, притягуючи повітря до входних отворів скруббера. Фактично, в системах продувки потік повітря завіси може значно збільшитися з активацією скруббера [25, 29-32]. Як і очікувалося, також було виявлено, що відступ завіси суттєво впливає на картину потоку повітря в вибою.

У промисловості широко визнано, що потік вхідного повітря розділяється невдовзі після проходження кінця лінійної решітки. Визначення частки повітря, яка вентилює вибір, є складним на практиці, але було досліджено експериментально. Експерименти показали, що до 80% повітря в системі подачі повітря одразу ж приєднується до зворотного потоку, залишаючи лише 20% свіжого повітря для вентиляції забою, що називається «вторинним» потоком [33-35].



Характер протяжних розрізів створює додаткові труднощі для подачі свіжого повітря до поверхні. Було виявлено, що геометрія коробчастого розрізу та зміщення лінійної завіси відіграють значну роль у розділенні потоку.

Використовуючи комбінацію велосиметрії зображення частинок (PIV) та обчислювальної гідродинаміки (CFD), визначено емпіричний критерій (2.1), який називається коефіцієнтом розділення струменів (JSR).

$$JSR = \left( \frac{d'}{d} \right)^2 \quad (2.1)$$

де  $d'$  – відстань між вузькими ребрами, а  $d$  – ширина входу мінус відстань між вузькими ребрами. Якщо  $JSR > 0,02$ , то розрив потоку відбувається незалежно від кількості вхідного повітря.

Проведено повномасштабні експерименти[30, 35-40], щоб дослідити здатність вторинного потоку вентилювати забій у 40-футовій коробчастій виробці з системою продувки на різних безперервних позиціях шахтного комбайна. Без пилозбирача та потоків вхідного повітря 10 000 та 4000 кубічних футів за хвилину, вимірювання потоку повітря в забої становили 538 кубічних футів за хвилину (5% від доступного повітря завіси) та 552 кубічних футів за хвилину (14% від доступного повітря завіси) відповідно. Дослідники NIOSH [39-43] також дійшли висновку, що в подібному сценарії швидкості повітря в забої були практично нульовими. Ці висновки підтверджують припущення, що збільшення кількості повітряної завіси само по собі не забезпечує достатньо повітря для вентиляції вибою, і додатково демонструє необхідність додаткових методів боротьби з пилом, таких як пилопромивачі.

Пилопромивачі із затопленим шаром входять до складу шахт безперервної дії (рис. 2.3). Скрубер зменшує концентрацію пилу, витягуючи запилене повітря з вибою через дротяну панель, яка постійно

обприскується водою. У цей момент пил захоплюється краплями води. Брудна вода видаляється з повітряно-водяного туману через розпушувач, перш ніж чисте повітря буде випущено. Цей тип скрубера є бажаним для гірничодобувних застосувань, оскільки його обслуговування мінімальне порівняно з іншими мокрими скруберами

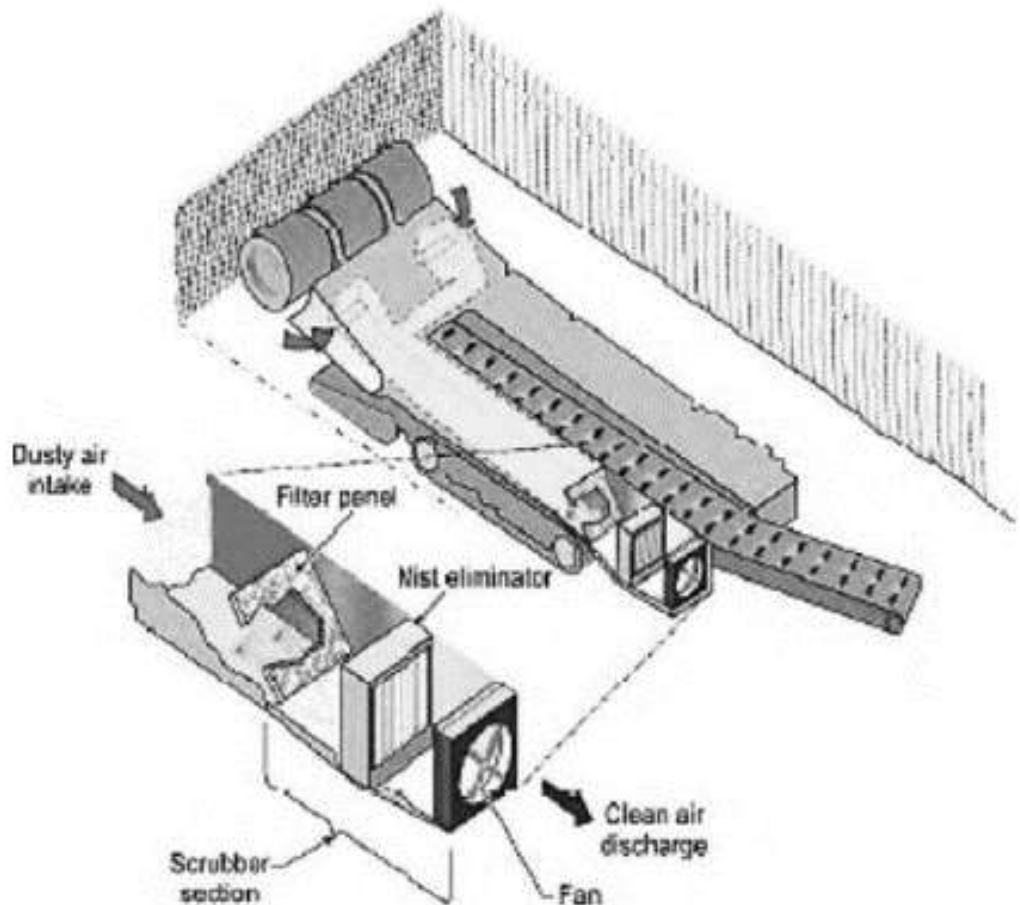


Рис. 2.3 Компоненти скрубера із затопленим шаром [33-36]

Належним чином обслуговуваний пилопромивач із затопленим шаром має високу ефективність очищення, але він також відіграє значну роль у кількості повітря, що досягає вибою. Як зазначалося раніше, важко примусово подати впускне повітря до вибою, перш ніж воно залишить його пряму траєкторію та приєднається до зворотного потоку повітря. Скрубер допомагає протидіяти цьому, піднімаючи повітря безпосередньо до області вибою (рис. 2.4А). Збільшуючи турбулентний потік у передній частині

безперервної видобувної комбайни, він також сприяє кращому розбавленню метану.

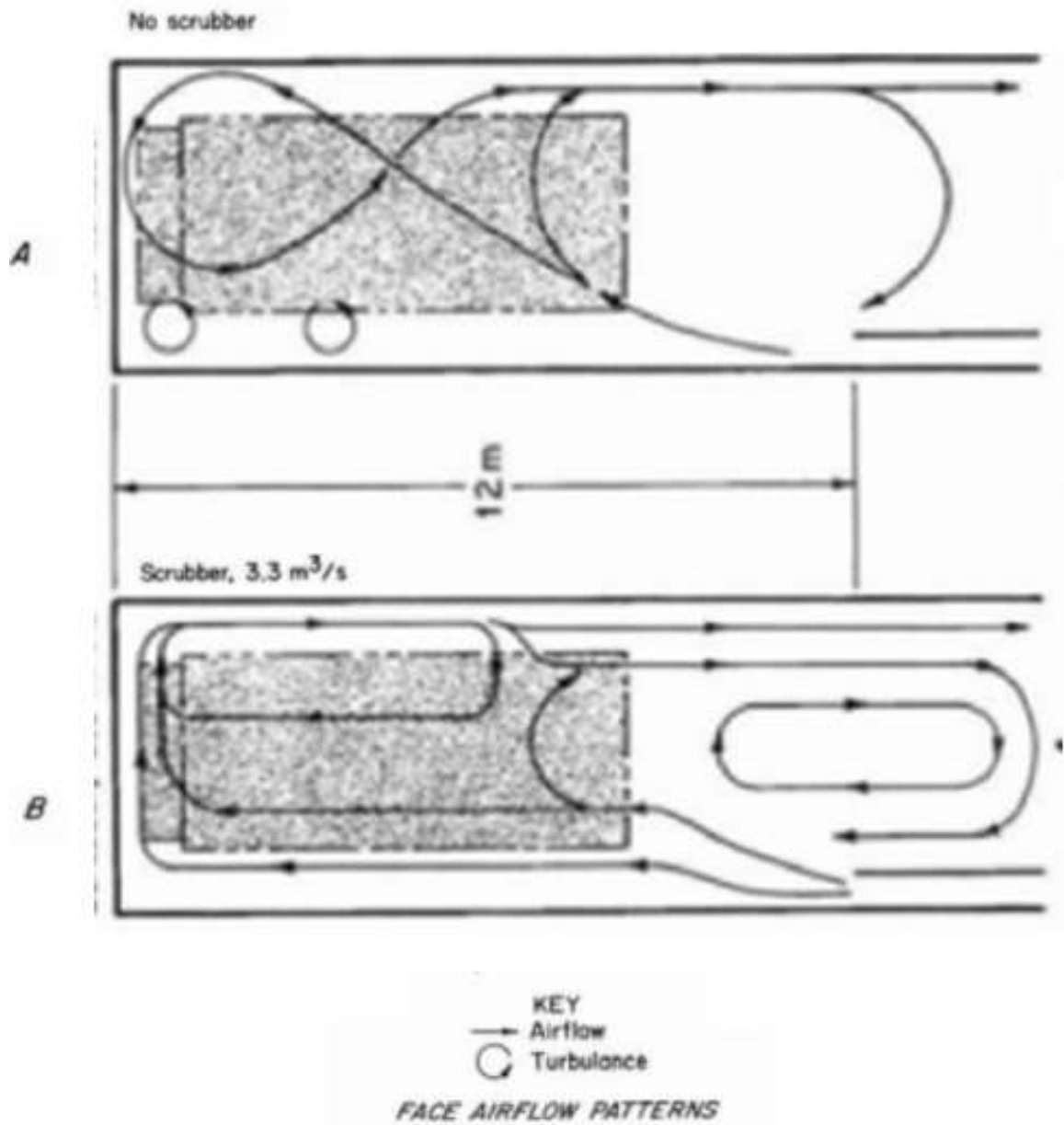


Рис. 2.4. Схема потоку повітря на вибої, де скруббер увімкнений (А) та (В)

40-футовий коробчастий виріз являє собою один із найскладніших сценаріїв вентиляції методу розширеного вирізу. У дослідженні [37-40] робота скрубера покращила вентиляцію вибою приблизно до 50% доступного повітря, що продувається як для 4000, так і для 10 000 кубічних

футів на хвилину. Дослідження в Університеті Кентуккі з використанням вимірювань PIV масштабованої фізичної моделі та аналізу CFD підтверджують висновок, що без використання пилового скрубера система продувки була неефективною для вентиляції вибою.

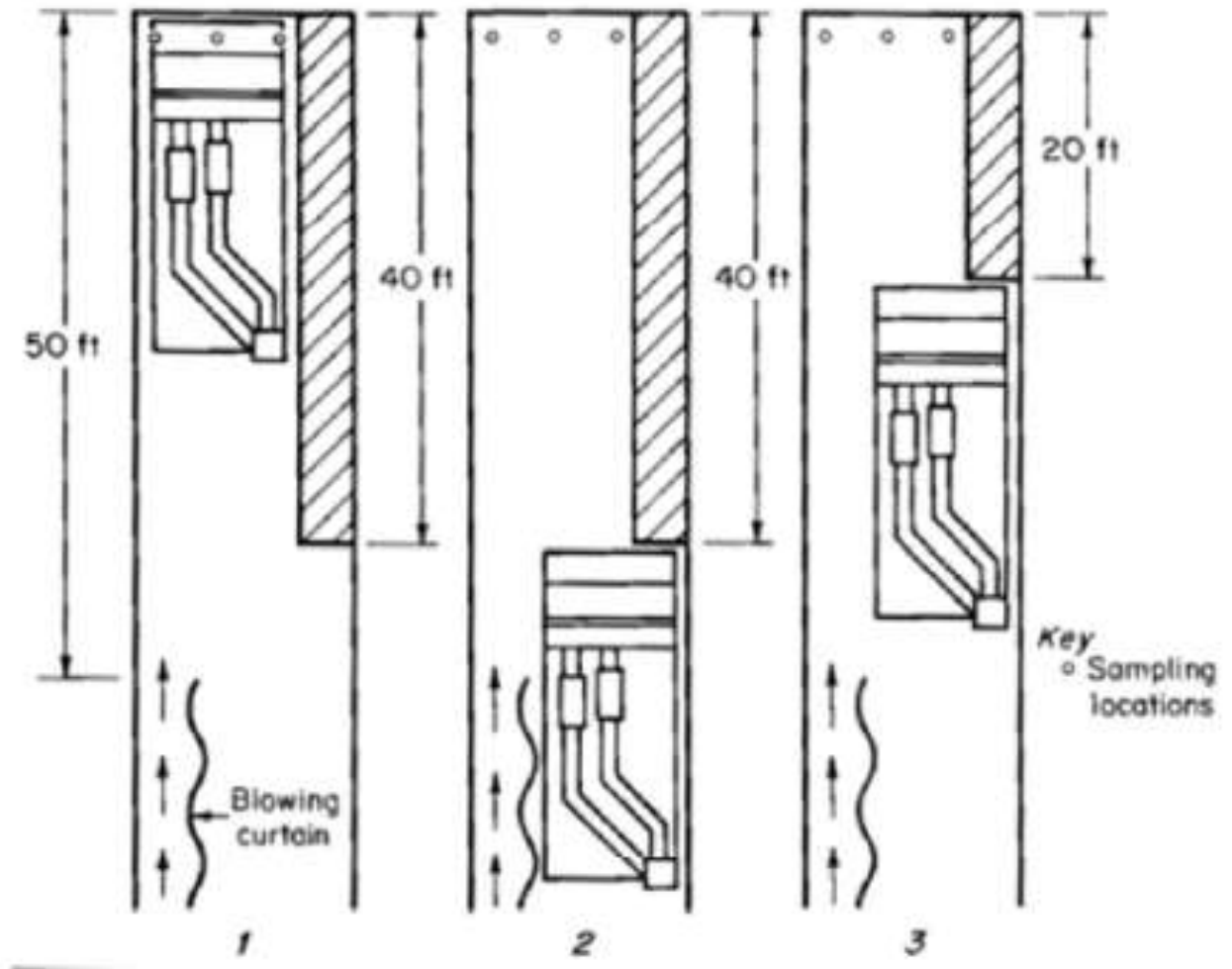


Рис. 2.5 Місця відбору проб для розширеної послідовності виїмки безперервного комбайна з відступом 50 футів [33-35].

Під час цих випробувань дослідники виявили, що вища швидкість потоку повітря на вході була ефективнішою на етапах вентиляції 1 та 3, але мала незначну перевагу на етапі 2. Робота скрубера, який працював у співвідношенні один до одного до кількості повітряної завіси, не мала суттєвого впливу на повітря, що досягає забою, коли комбайн

безперервного комбайна перебував на початку виїмки плити довжиною 40 футів (крок 2). У другому раунді випробувань вони перевірили вплив різних відстаней відступу завіси для системи продувки. Результати показали, що відстань відступу завіси мала набагато більший вплив на потік повітря, що досягає забою, ніж параметри в першій серії[33, 35].

Довгостроковим стандартом роботи скрубера є встановлення кількості вхідного повітря, що дорівнює вимірній продуктивності скрубера, та підтримка їх відстані в межах 1000 кубічних футів за хвилину один від одного. Ідея полягає в тому, що кількість вхідного повітря, більша за кількість повітря скрубера, може перевантажити вхідні отвори скрубера, дозволяючи пилу обходити їх. Крім того, вважається, що потоки повітря скрубера, більші за вхідні, можуть призвести до рециркуляції повітря.

Хоча рециркуляція повітря сама по собі не є поганою, існує занепокоєння, що вона може призвести до накопичення метану.

Дослідження взаємозв'язку між потоком вхідного повітря та номінальною продуктивністю скрубера щодо концентрації метану [35-37] на робочому вибійній ділянці безперервної видобувної секції. Дослідження проводилося в повномасштабній випробувальній (рис. 2.6) є ілюстрацією їхньої випробувальної галереї метану. Випробувальна зона була обладнана системою вентиляції з продувкою.

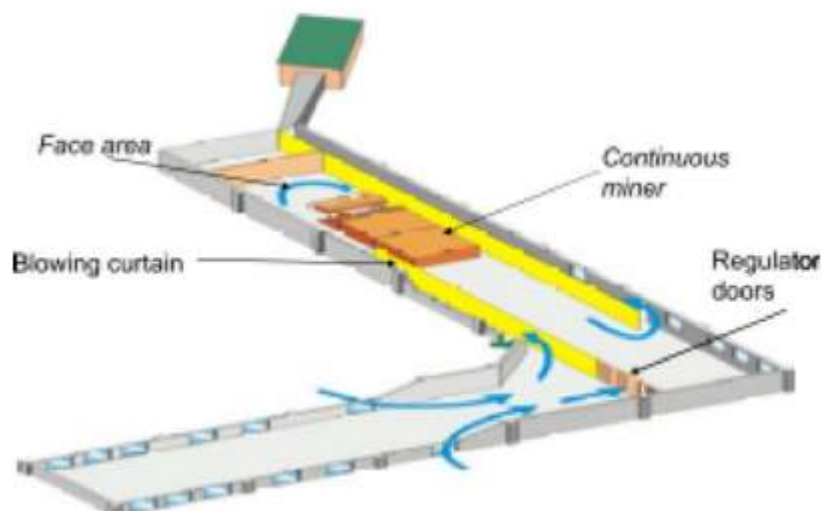


Рис. 2.6 Галерея випробувань метану

Два вентилятори були приєднані до повітроводів скрубера для роботи з трьома варіантами потоку повітря: 6000, що вимагало живлення лише одного вентилятора, та 10 000 та 14 000 куб. футів/хв, що вимагали роботи двох вентиляторів. Потік повітря контролювався за допомогою діафрагм. Потік на кінці решітчастої завіси вимірювався за допомогою крильчатого анемометра. Проведені випробування показали, що зі збільшенням потоку скрубера спостерігалось зменшення середньої концентрації метану. Результати також показали, що потік повітря на впуску, менший, ніж у скрубера, не збільшував рівень метану, як очікувалося. Це, ймовірно, тому, що скрубер збільшував швидкість впускного повітря, створюючи більшу турбулентність. Фактично, експерименти показали, що робота скрубера суттєво впливає на швидкість всмоктуваного повітря.

Під час оцінки ефективності пилопромивача у виробці глибиною 20 футів з подовженим відступом завіси, досліджено [37-39] три підземні вугільні шахти, анонімно названі А, В та С. Дослідники виміряли потоки повітря в забої та скрубері на кожній операції та виявили, що вони відповідають або перевищують мінімуми, встановлені планом вентиляції кожної шахти. Результати випробувань показали, що пилопомивачі знизили концентрацію пилу на 40% у зворотному повітрі. Однак, різниця в концентрації пилу для оператора шахти була незначною, максимальне зниження склало лише 0,09 мг/м<sup>3</sup>. Це, ймовірно, було пов'язано з тим, що в операціях використовувалася витяжна вентиляція забою, завдяки якій оператор безперервної роботи міг перебувати у всмоктуваному повітрі під час руху. Концентрація пилу, що надходить до забою безперервної вибоїни, була значно нижчою за стандарт пилу для всіх трьох шахт. Цікавий висновок з досліджень показав, що на шахтах В та С спостерігалось середнє зменшення потоку повітря скрубера на 29% та 35% після кожного різання відповідно. .

### 3. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Змодельований вугільний вибій (рис. 3.1) та поперечні виїмки мають ширину 20 футів, а висота приміщення — сім футів. Галерея — це сталева будівля на бетонній плиті всередині шахти з герметичними гофрованими пластиковими листами. Частини стін покриті покрівельним матеріалом для збільшення шорсткості поверхні.

Впускне повітря втягується з великої площі шахтного зумпфа витяжним вентилятором.

Вихлопні гази продуваються над зумпфом за кутом від впускного отвору за допомогою великої колони, що розділяє потік для запобігання рециркуляції. Була побудована повномасштабна модель безперервної шахти, і розташована всередині галереї. Доступні точки кріплення для повторюваного та постійного розміщення вентиляційних елементів. На рисунку показано стрілки, що показують типовий напрямок потоку повітря.

Комбайн безперервної дії та головний вентилятор [30-40] живляться напругою 440 В змінного струму та контролюються центральним центром керування, підключеним до моделі комбайна безперервної дії. Центр керування включає інтерфейс людини-машини, що дозволяє легко керувати швидкістю вентилятора та обертанням ріжучої головки. Експлуатаційні характеристики моделі комбайна безперервної дії включають наступне:

- Обертова ріжуча головка
- Скрубер з частотно-регульованим приводом
- Розпилювачі води
- Система керування головним вентилятором, вентилятором скрубера та обертанням ріжучої головки.

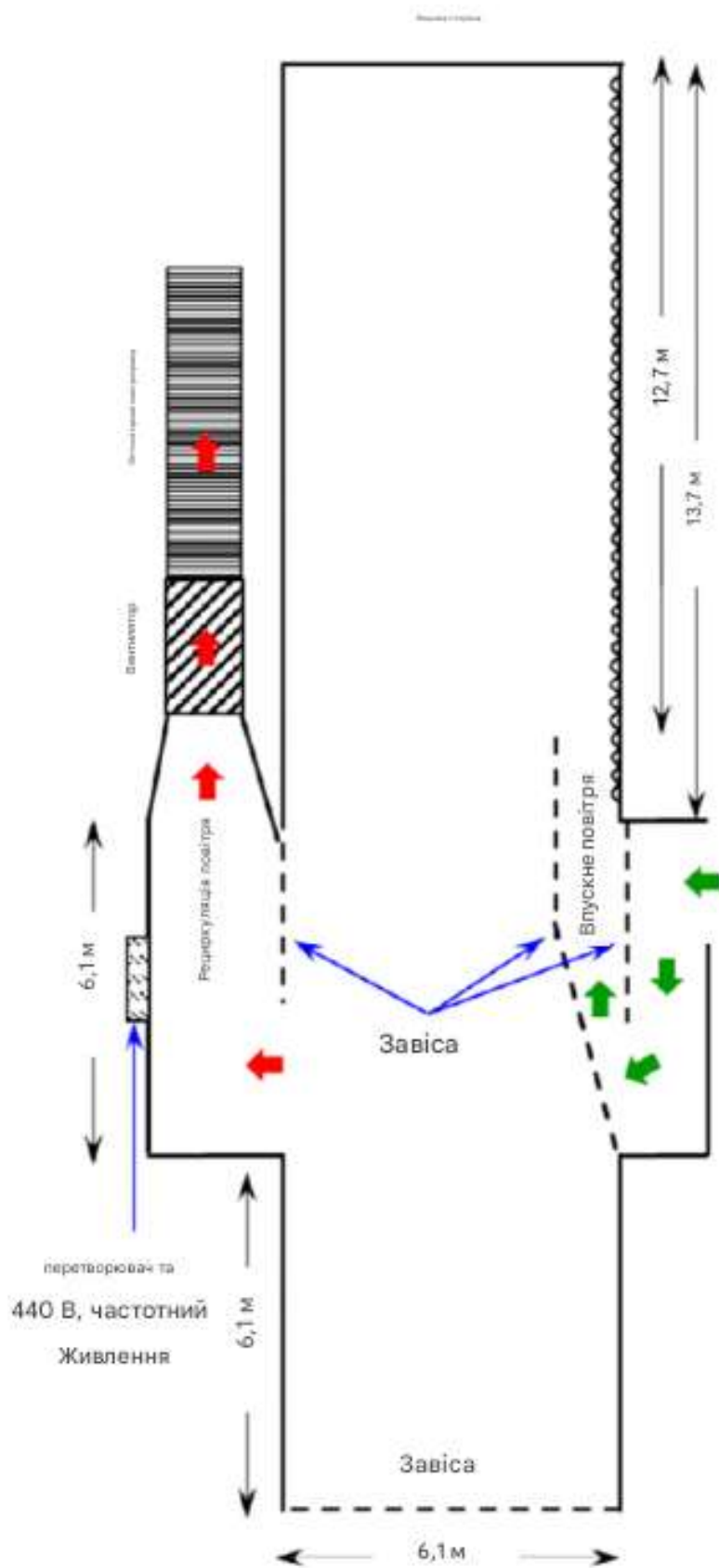


Рис. 3.1 Схема моделі [31-33]



Під час моделювання потоку рідини враховуються в'язкі, гравітаційні та інерційні сили (3.1, 3.2 та 3.3).

Інерційні сили,  $F_i$

$$F_i = \rho L^2 u^2 \quad (3.1)$$

Гравітаційні сили,  $F_g$

$$F_g = \rho L^3 g \quad (3.2)$$

В'язкі сили,  $F_v$

$$F_v = \mu L u \quad (3.3)$$

де  $\rho$  – густина ( $\text{кг/м}^3$ ),  $L$  – характерна довжина (м),  $u$  – середня швидкість рідини (м/с),  $g$  – прискорення вільного падіння ( $\text{м/с}^2$ ), а  $\mu$  – динамічна в'язкість ( $\text{Н}^2/\text{м}^2$ ).

Пі-числа ( $\pi$ ) – це безрозмірні числа, що мають фізичний сенс. Співвідношення цих сил створює два важливі пі-числа, що використовуються в цьому дослідженні, число Рейнольдса та число Фруда. Число Рейнольдса (3.4) стосується зв'язку між в'язкими та інерційними силами, тоді як Фруд (3.5) розглядає зв'язок між гравітаційними та інерційними силами.

$$\pi_1 = Re = \frac{F_i}{F_v} = \frac{\rho}{\mu} u L \quad (3.4)$$

$$\pi_2 = Fr = \frac{F_i}{F_g} = \frac{v}{\sqrt{lg}} \quad (3.5)$$

Потік вважається турбулентним, коли число Рейнольдса більше 4000. Це було важливим фактором при виборі швидкості для тестування в зменшеній моделі, оскільки добре відомо, що потік повітря в шахтному середовищі є турбулентним. Тому для тестування враховувалися лише швидкості повітря, які залишалися в турбулентному діапазоні.

Це було особливо важливо для моделювання вихорів, що утворюються поблизу забої [31, 34-39].

Закони масштабування можна описати як:  $\pi_i = \pi'_i$ . Для масштабування числа Рейнольдса (рівняння 3.6) результуюча швидкість обернено пропорційна коефіцієнту масштабування:

$$v' = \frac{l}{l'} v \quad (3.6)$$

де  $l$  - повномасштабна характеристична довжина (тобто гідравлічний діаметр), а  $l'$  - еквівалентна характеристична довжина моделі.

Для масштабування числа Фруда (3.7) швидкість обернено пропорційна квадратному кореню з коефіцієнта масштабування:

$$v' = \frac{v}{\sqrt{\frac{l}{l'}}} \quad (3.7)$$

Гідравлічний діаметр щільної сторони використовувався як характерна довжина для визначення масштабованої швидкості. Вона розраховується за рівнянням 3.8.

$$D_h = 4 \frac{A}{S} \quad (3.8)$$

де  $A$  — площа поперечного перерізу,  $S$  — периметр вінтеляційного повітряпроводу. Лінія ребра зміщена на чотири м від ребра в кімнаті заввишки сім м. Таким чином, гідравлічний діаметр становить 5,09 м.

Лабораторну модель робочого місця було побудовано як модель підземної пилової галереї в масштабі 1/12. Модель була розроблена як спосіб визначення схем потоку повітря для розширеного розрізу. Для полегшення випробувань PIV модель повинна бути спроектована з прозорими стінами та дахом. Стіни/ребра зібрані з плоских шматків акрилу товщиною 6 мм, які були точно вирізані лазером. Акрил було обрано через його дуже високу світлопроникність, доступність та простоту будівництва. Основа моделі утворена двома великими чорними акриловими шматками. Ця основа підтримується дерев'яними дошками розміром 2 дюйми x 4 дюйми[33-40]].

Опора створює прохід для прокладання труб під моделлю та для штучної підлоги.

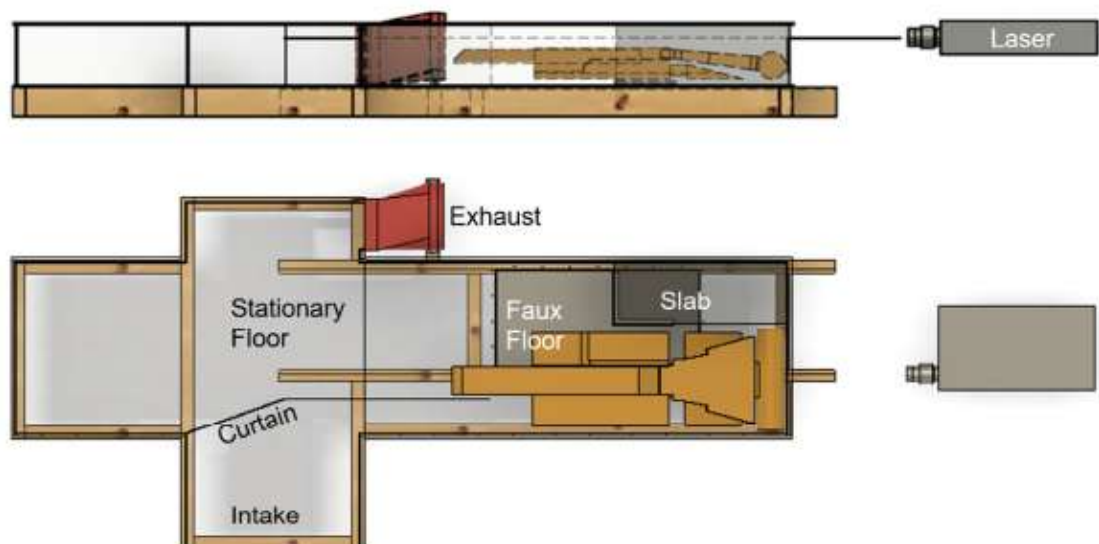


Рис. 3.2 3D-рендеринг моделі масштабу 1/12[35-37]

Штучну підлогу було додано до моделі після початкового тестування. Систему штучної підлоги було додано для забезпечення можливості переміщення шахтного комбайна та повітряних трубок через зменшене робоче місце. Це збільшило можливості збору даних про схеми потоків повітря, коли шахтний комбайн перебуває в різних положеннях, без відкриття моделі та дозволило пропускати повітря «очисного» типу з мінімальним проникненням у внутрішній простір.

Конструкція моделі безперервної шахти є модульною. Модуль скрубера позначений синім кольором. На рисунку 3.3 показано конструкцію модуля скрубера.

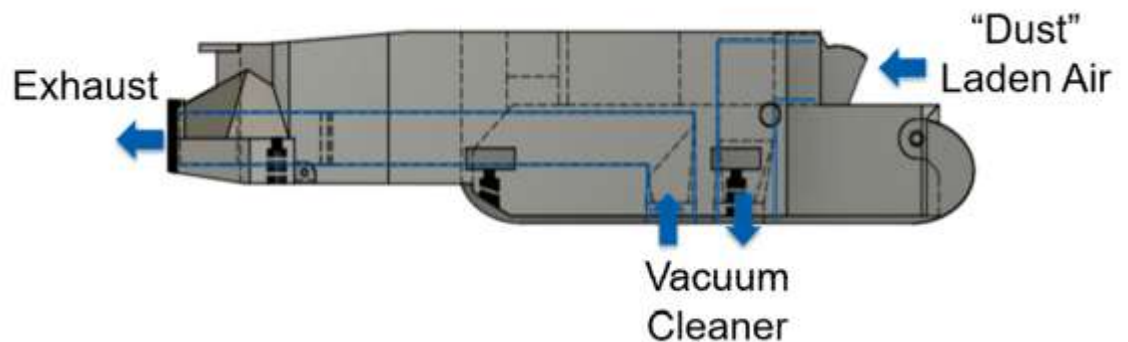


Рис. 3.3 Схема конструкції скрубера

Повітроводи, обведені синім кольором, були розроблені для друку всередині деталі. Для моделювання скрубера використовувалася система з двох пирососів. Повітря, насичене пилом, імітоване масляним туманом, всмоктується в пиросос, оснащений фільтром для видалення крапель олії.

Вторинний пиросос з насадкою для повітродувки був приєднаний до вихлопної сторони скруббера. Таким чином, вихлопні гази вводили лише чисте повітря з лабораторії. Кількість повітря, що знову вводилося через «вихлопні гази», вимірювалася за допомогою анемометра з гарячим дротом, коли воно виходило з моделі СМ.

Це було виміряно та скориговано відповідно до розрахованої масштабованої швидкості для потоку повітря скрубера, для моделювання впливу потоку повітря скрубера на потік повітря в робочому місці, а не оцінка ефективності очищення скрубера.

PIV – це оптичний метод вимірювання та візуалізації потоку. Він пропонує неінвазивний метод отримання полів швидкості шляхом вимірювання швидкості частинок, що потрапляють в повітряний потік. Ці частинки освітлюються лазером у вигляді пластини, і фіксується зображення їхнього поточного положення. Лазерні імпульси та фіксація зображень синхронізовані та створюються парами, які називаються кадрами. Часова затримка між фіксаціями, або  $\Delta T$ , відома, і тому зміщення частинок між фіксаціями створює вектор швидкості.

Вибір  $\Delta T$  дуже важливий для правильної фіксації. При нижчих швидкостях повітря необхідно використовувати відносно велике  $\Delta T$ , оскільки частинкам потрібно відносно більше часу, щоб перемістити необхідну кількість пікселів для точного аналізу. Аналогічно, коли швидкість повітря висока,  $\Delta T$  має бути меншим. Кілька швидкостей повітря (тобто струменевий потік) вимагають більшої кількості зображень, щоб усунути помилки; або аналіз повинен включати більше одного  $\Delta T$ .

Зображення калібруються для співвіднесення розміру зображення (у пікселях) з реальними розмірами. Калібрування потрібне щоразу, коли змінюється висота лазерного листа. Це робиться шляхом розміщення предмета відомого розміру на тій самій висоті, що й лазер.

Зображення попередньо обробляються для вилучення та видалення фонової інформації з зображень. Фон – це все, що залишається постійним між парами зображень, наприклад, відображення та стаціонарні об'єкти, наприклад, безперервний шахтний комбайн [33-37].

Фонове зображення створюється шляхом вилучення мінімальної або середньої інтенсивності зображень у шкалі сірого. Згенероване фонове

зображення потім віднімається від зображення та всіх наступних зображень, виділяючи пікселі з найвищою інтенсивністю. Прогресія (рис. 3.4), де необроблене зображення знаходиться ліворуч, згенероване зображення посередині, а попередньо оброблене зображення – праворуч.

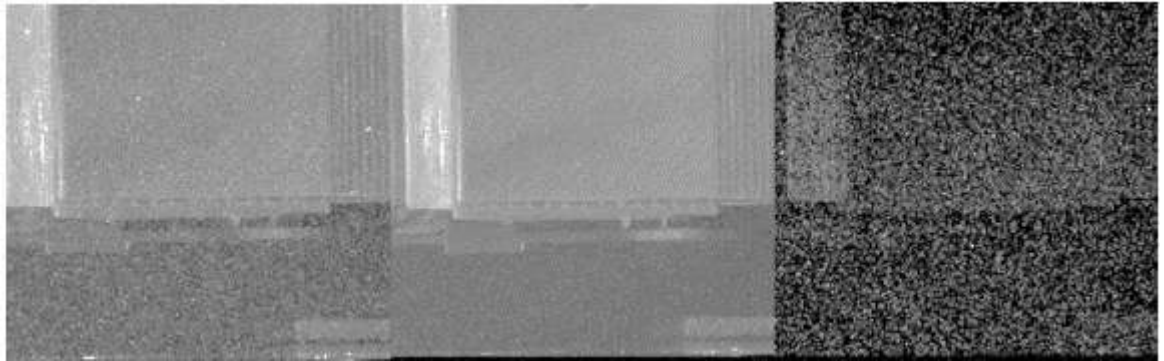


Рис. 3.4 Послідовність попередньої обробки зображення шляхом віднімання фону

Попередньо оброблені зображення передаються до процесора обробки зображень, де кожен кадр зображення обробляється за допомогою налаштування. Аналіз кореляції зображень виконувався за допомогою стандартного алгоритму швидкого перетворення Фур'є (FFT). Використовуючи рекурсивний шумів сітки Найквіста, зображення поділяються на вікна дослідження у вигляді сітки 64x64 пікселів (рис. 3.5). Ці області знову обробляються за допомогою сітки 16x16 пікселів. Механізм сітки обробляє зображення за два або більше проходів, починаючи з 50% перекриття.

Результати першого проходу використовуються для оптимізації зміщень точок наступних проходів. Плями з механізму кореляції передаються до механізму піків для вимірювання зміщення. Механізми піків визначають розташування піків на карті кореляції (рис. 3.6).

Рівняння гаусового піку ( 3.9).

$$dx = x + \frac{\log l - \log r}{2(\log l + \log r - 2 \log c)} - x_0 \quad (3.9)$$

де  $l$ ,  $r$ , та  $c$  – значення інтенсивності для лівого, правого та пікового пікселів на карті кореляції,  $x$  – цілочисельний зсув, а  $x_0$  – місце зсуву нуля.

Поріг, встановлений для максимального співвідношення піку до шуму, становив 1.5. Отримані вектори перевіряються за допомогою медіанного тесту та розміру околиці 5x5.



Рис. 3.5 Зображення сегментовано на вікна дослідження за допомогою сітки 64x64 пікселів.

Це вимірює різницю між вектором та навколишніми векторами. Якщо результат виходить за межі допуску, то він не пройшов перевірку.

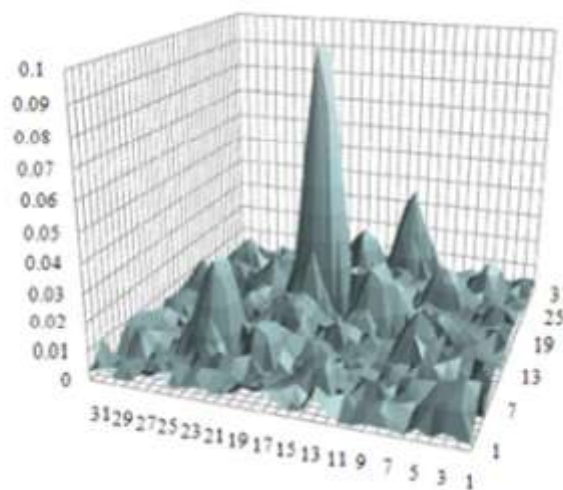


Рис. 3.6 Карта кореляції

Векторне кондиціонування використовувалося для заповнення прогалин та згладжування векторного поля. Вони представлені як жовті вектори на рисунку 3.7. Зелені – це прохідні вектори.

Векторне поле зберігається для кожної пари зображень як .VEC або .BVEC, якщо вибрано двійковий формат.

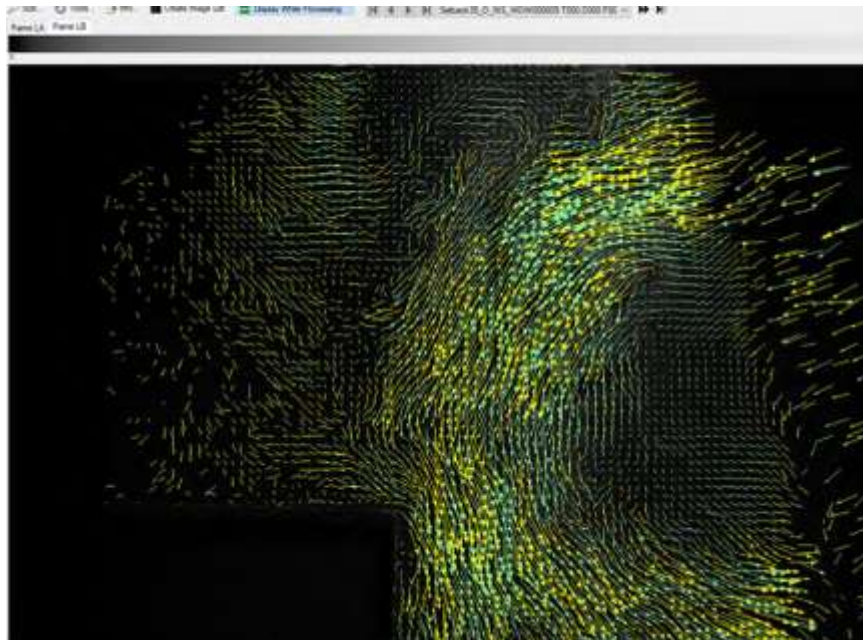


Рис. 3.7 Вивід векторного поля швидкості.

Тесрplot використовується для візуалізації векторного поля. Для виконання аналізу стаціонарного стану плагін використовується для створення усередненого векторного поля всіх дійсних даних.

Діаграми (рис. 3.8 та 3.9) ілюструють картини потоків та поле швидкості, зафіксовані на порожніх входах шахт 2 та 3 відповідно. Як і в шахті 1, прапорці були рівномірно прикріплені до болтів даху в вході для візуалізації потоку повітря. Кількість повітря за завісою (на відстані п'яти футів від відступу) вимірювалася на початку кожного випробування тричі та усереднювалася.

Були виміряні висота та ширина входу. Вимірювався швидкісний вимірювач TSI 9535 для вимірювання потоку повітря вздовж ребер,



зафіксованого приблизно на відстані двох футів від кожного ребра на відстані п'яти футів від завіси до вибою (або якомога ближче до вибою, наскільки це можливо з точки зору безпеки). Додатні значення швидкості означають, що повітря тече в напрямку всередину (до вибою), а від'ємні значення швидкості означають, що повітря тече у напрямку виходу (до завіси).

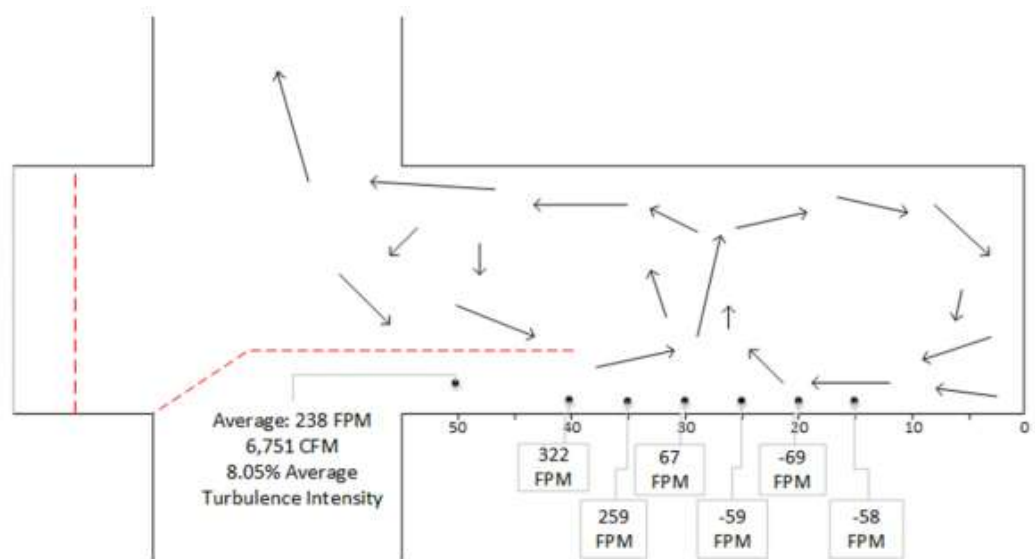


Рис. 3.8 Діаграма результатів випробувань для шахти 2 без регулятора крила або комбінованого комбайна.

Незважаючи на велику різницю в кількості завіс та відмінностях у розмірах, повітря рухається за подібним шляхом. Ця картина також спостерігалася в шахті 1 (рис. 3.1). Коли свіже повітря виходить з ґратчастої лінії, воно швидко відділяється від ребра, повертаючи ліворуч, і розділяється вздовж лівого ребра. Це створює зону повільно рухомого, рециркулюючого повітря біля лицьової поверхні.

Дані про швидкість були отримані з ребра з боку завіси для сценаріїв порожнього входу. Щоб врахувати різницю в кількості завіс, швидкість була нормалізована як відсоток від середньої швидкості повітря завіси,

вимірюваної на кожній шахті, наприклад, 238 м за хвилину для шахти 2 та 540 м за хвилину для шахти 3.

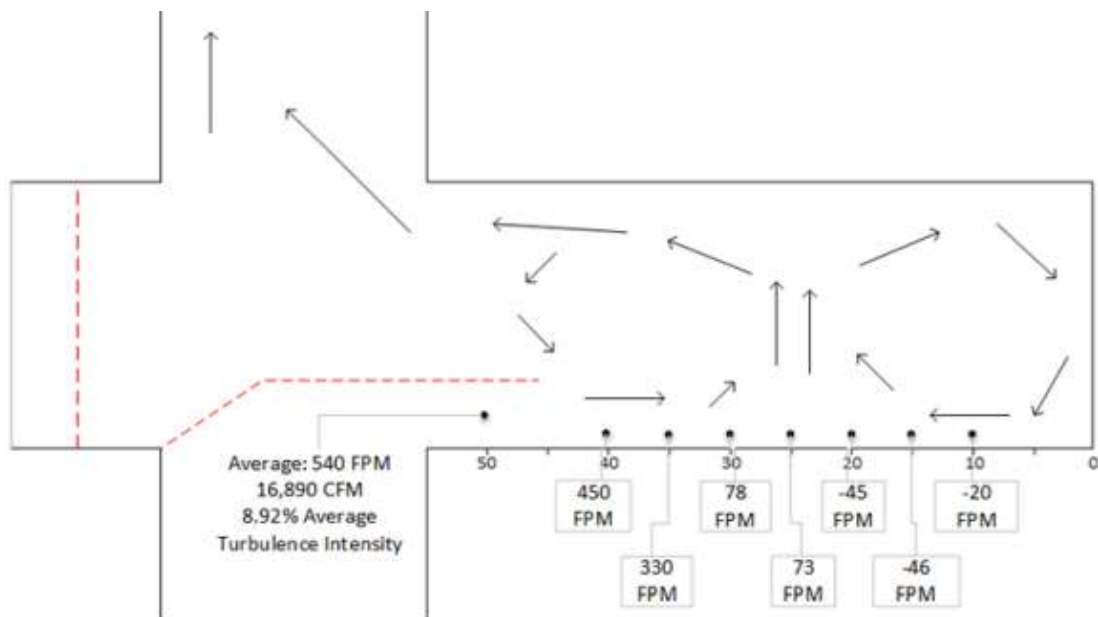


Рис. 3.9 Діаграма результатів випробувань для шахти 3 без регулятора крила або комбайна безперервної дії.

Потік повітря вважається позитивним, а вихідний – негативним. Точки відбору проб також були нормалізовані як відсоток від загального відступу, де 0% представляє забій, а 100% – відкриття лінійної ґратки. Ця методологія дозволяє аналізувати польові дані разом, встановлюючи зв'язок між відстанню, яку проходить повітря, та швидкістю, з якою падає швидкість повітря завіси (наприклад, свіжого повітря). На рисунку 3.10 показано цей зв'язок.

При такому порівнянні очевидно, що швидкість повітря має дуже схожу закономірність, незважаючи на відмінності в геометрії та кількості повітря завіси. Аналіз цього рисунка показує, що швидкість вхідного повітря падає до нуля приблизно на 70% від забію. Ця втрата швидкості вхідного повітря змушує повітря текти до випускного, що означає, що повітря не обтікає забій, як передбачалося.

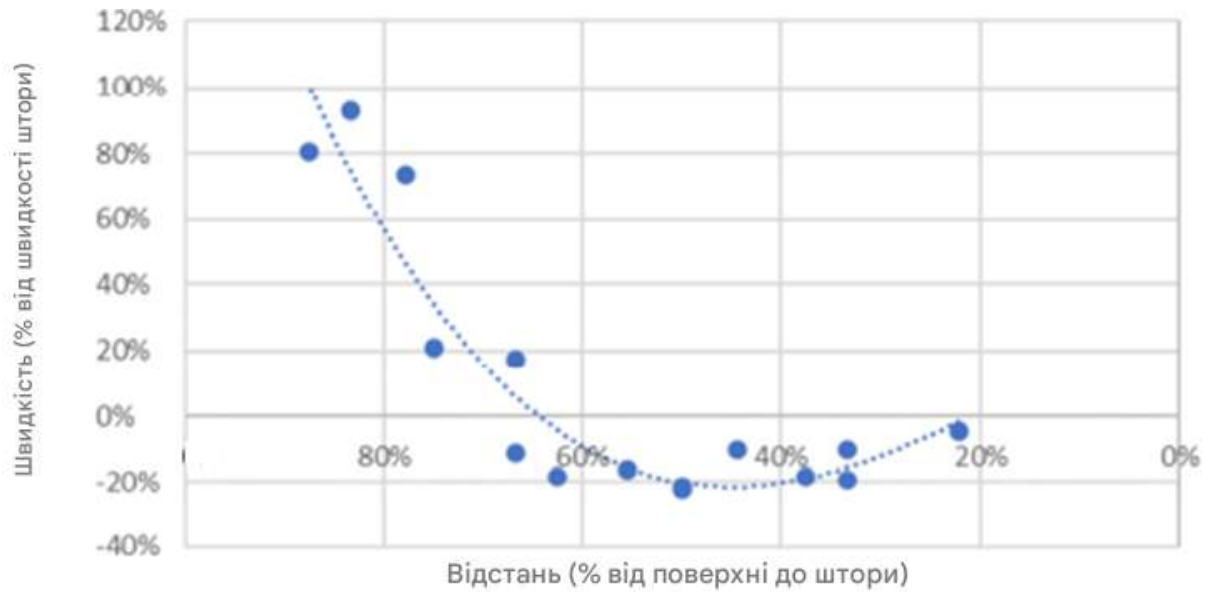


Рис. 3.10 Крива швидкості вузької сторони польових досліджень без регулятора крила або безперервного видобувного комбайна.

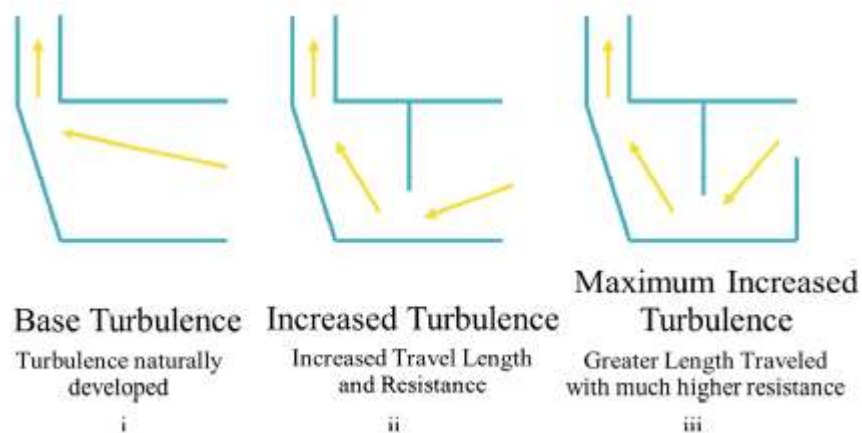


Рис. 3.11 Конфігурація перегородок для збільшення турбулентності.

Для кожної умови (рис. 3.11) інтенсивність турбулентності вимірювалася на вузькій стороні лінійної решітки. Хоча додавання наждачного паперу з зернистістю 60 (шорсткий) збільшило ТІ, як і очікувалося, кількість перегородок мала більший вплив на ТІ. Крім того, наждачний папір мав дуже незначний вплив при конфігурації iii (дві перегородки на впуску), що вказує на те, що наждачний папір не буде

потрібен у цьому випадку. Це важливо, оскільки наждачний папір спричиняв проблеми з вимірюваннями PIV, відбиваючи лазерне світло.

Вимірювання швидкості в моделі масштабу 1/12 вздовж лінії ребра з боку ґратки були витягнуті з даних PIV та нанесені на рис. 3.12. Перевірка цього рисунка показує подібність кривої швидкості між випробуваннями та польовим дослідженням. Тест В, у якому використовувалися гладка стінка та одна перегородка, мав найближчу точку розділення. Підсилювач інтенсивності турбулентності був встановлений для решти випробувань PIV, обговорюваних у цьому розділі. Зазначається, що це не умова з найвищою інтенсивністю турбулентності; проте це та, що має найближчу точку відриву порівняно з польовими даними.

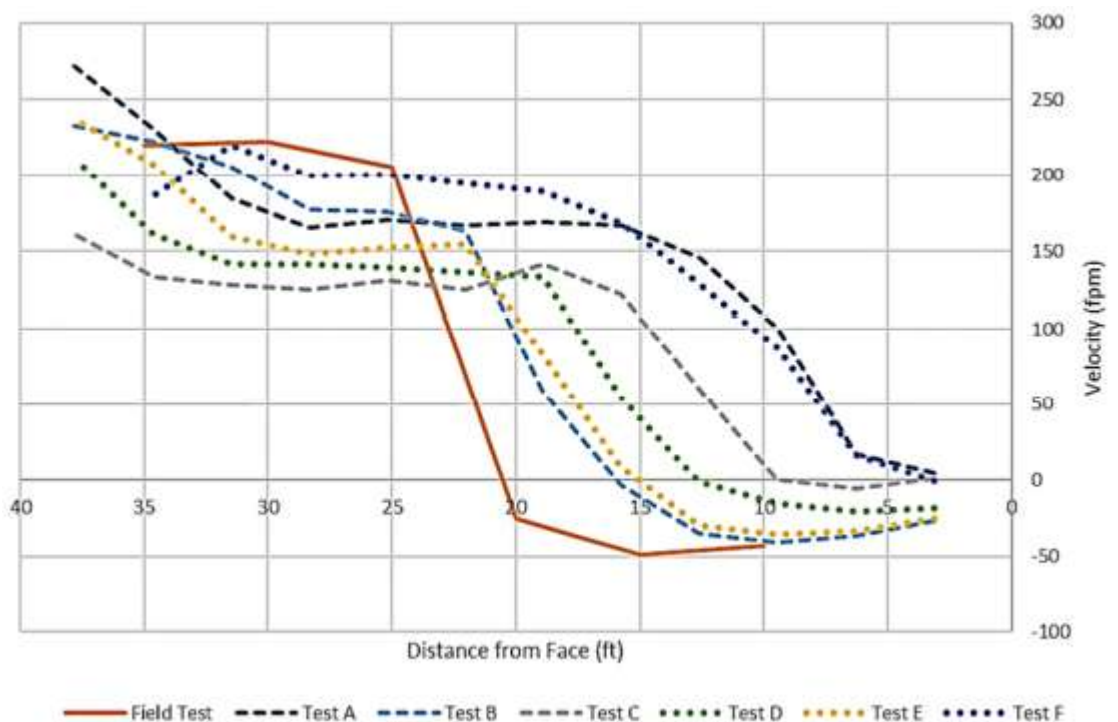


Рис. 3.12 Швидкість, виміряна в точках по всій моделі та в полі.

У повномасштабній моделі було побудовано аналогічний підсилювач турбулентності, що призвело до того, що повномасштабна модель точно відповідає польовим випробуванням. У повномасштабних випробуваннях

гофрований покрівельний матеріал був доданий до стінок для шорсткості, що не заважало роботі моделі і досі встановлено. Підсилювач турбулентності та сам по собі підсилювач шорсткості не змогли відтворити спостережувані повітряні структури в повномасштабній моделі. Тоді як у 1/12 моделі підсилювача турбулентності було достатньо.

Як і у випадку з польовими дослідженнями на шахті, всі повномасштабні випробування проводилися в найглибшій точці виробки, тобто на відступі 40 м. Випробування, що включали скруббер, проводилися при приблизно 85% співвідношенні кількості повітря скруббера до повітряної завіси [35-41].

Репрезентативний приклад (рис. 3.13) повномасштабних випробувань для коробчастої виробки з неактивним скруббером та без регулятора крила.

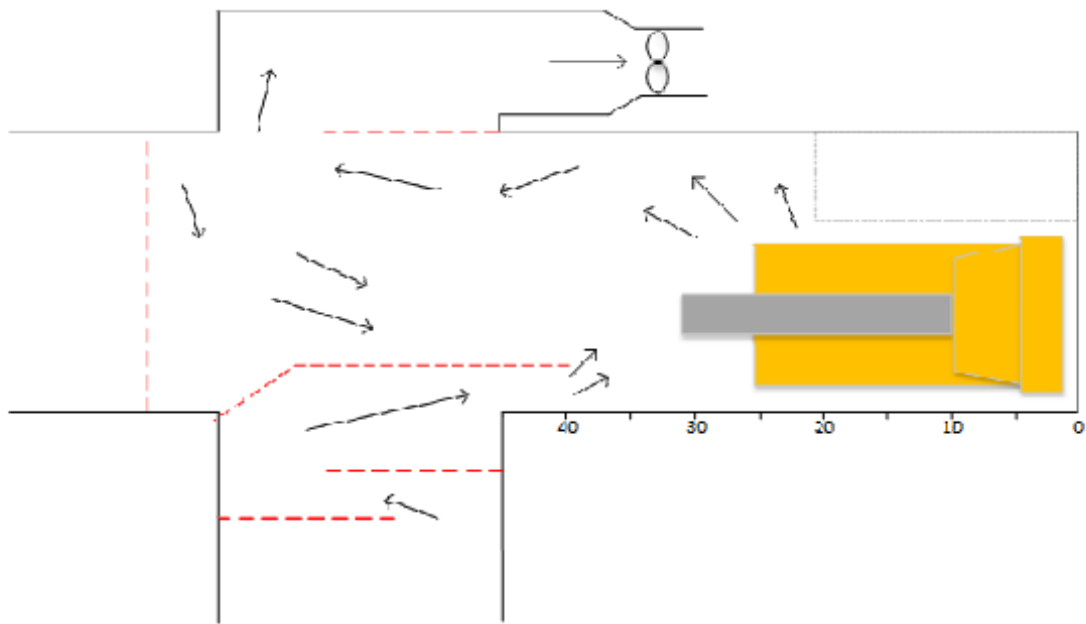


Рис. 3.13 Випробування пилової галереї, скруббер неактивний, без крила, при об'ємі повітряної завіси 8160 CFM

Для цього випробування середня швидкість повітряної завіси становила 291 м за хвилину (або 8160 кубічних м за хвилину). Як показано

(рис. 3.13), свіже повітря відділяється від ребра біля правого заднього кута комбайна безперервної дії, тече до плити та розділяється, причому більша частина повітря потікає до зворотного потоку. Це залишає область з незначним потоком або без нього, за винятком рециркуляції.

Приклад (рис. 3.14) показує, що для коробчастого вирізу з увімкненим скруббером та без нього. Для цього випробування середня швидкість повітря завіси становила 303 м/хв (або 8475 кубічних м/хв), а кількість повітря в скруббері становила приблизно 7000 кубічних м/хв. З увімкненим скруббером точка відриву розташована значно ближче до вибою, ніж у попередньому випробуванні, і виникає приблизно на 10-15 м далі в коробчастому вирізі. На жаль, повітряний потік у межах 15 м від вибою був занадто турбулентним, щоб визначити напрямок потоку. Також спостерігалось утворення вихрів у зовнішній області, що прилягає до завіси[35-40].

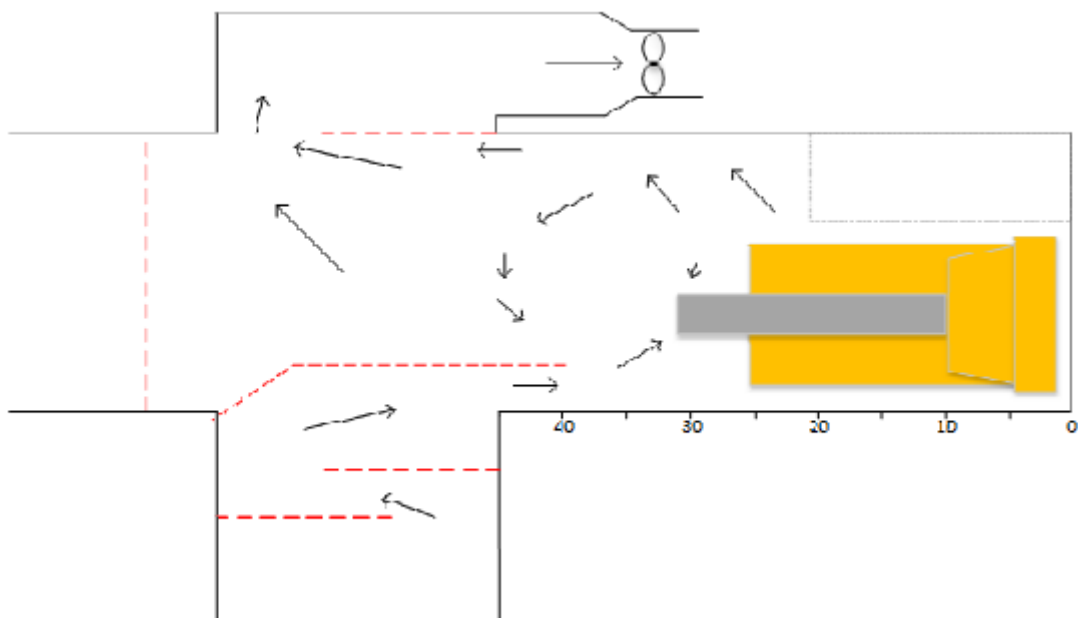


Рис. 3.14 Випробування пилової галереї, скруббер продуктивністю 7000 CFM, без крила та з кількістю повітря для завіси 8475 CFM.

Розглянуто схему (рис. 3.15), де показано репрезентативний приклад коробчастого вирізу з вимкненим скруббером та з регулятором крила. Для цього випробування кількість повітря для завіси становила 7180 CFM, а швидкість повітря завіси становила 256 м/хв. Коли регулятор крила був встановлений без скрубера, свіжий повітряний потік проникав глибше в коробчастий виріз; однак він все ще розділявся приблизно в тій самій області, що й в попередньому випробуванні, або приблизно на відстані 15-20 м від забою.

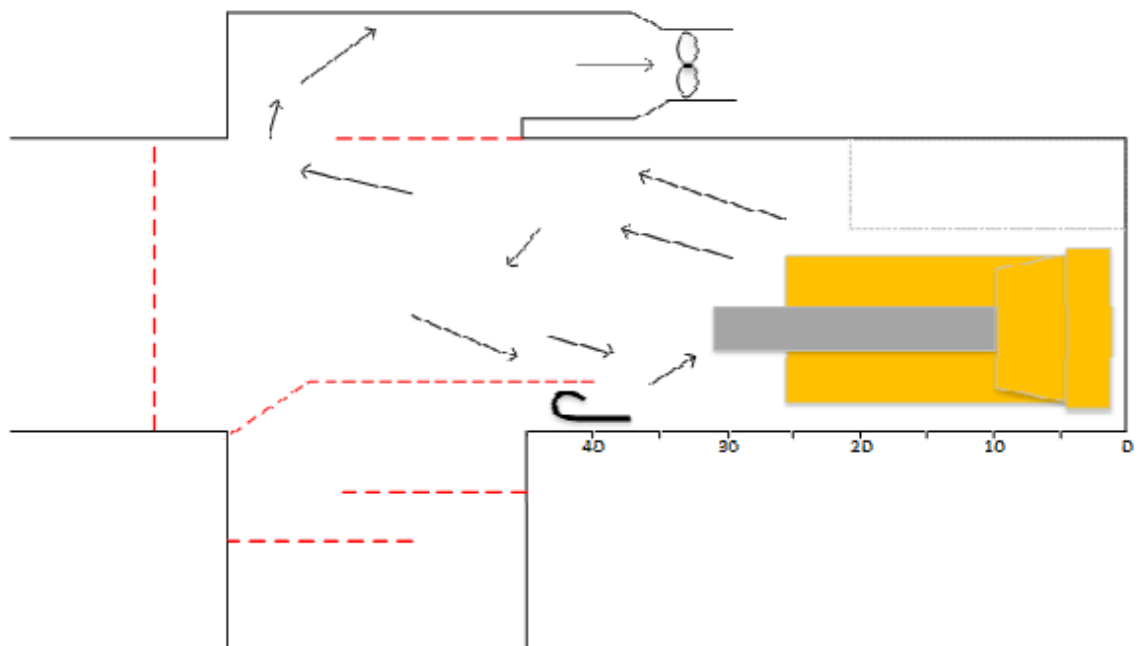


Рис. 3.15 Випробування пилової галереї, скруббер неактивний, з регулятором крила на подачі повітря завіси 7180 CFM.

На рисунку 3.16 показано репрезентативний приклад розрізу коробки з увімкненим скруббером та з регулятором крила. Для цього випробування середня швидкість повітря завіси становила 263 м/хв (або 7364 CFM), а потік повітря скрубера становив приблизно 7000 CFM. Коли регулятор крила та скруббер були активовані, повітря проходило через ребро з боку

завіси та, як зазначено, виходило через бік плити. Турбулентність біля позначки 15 футів перешкоджала вимірюванню напрямку.

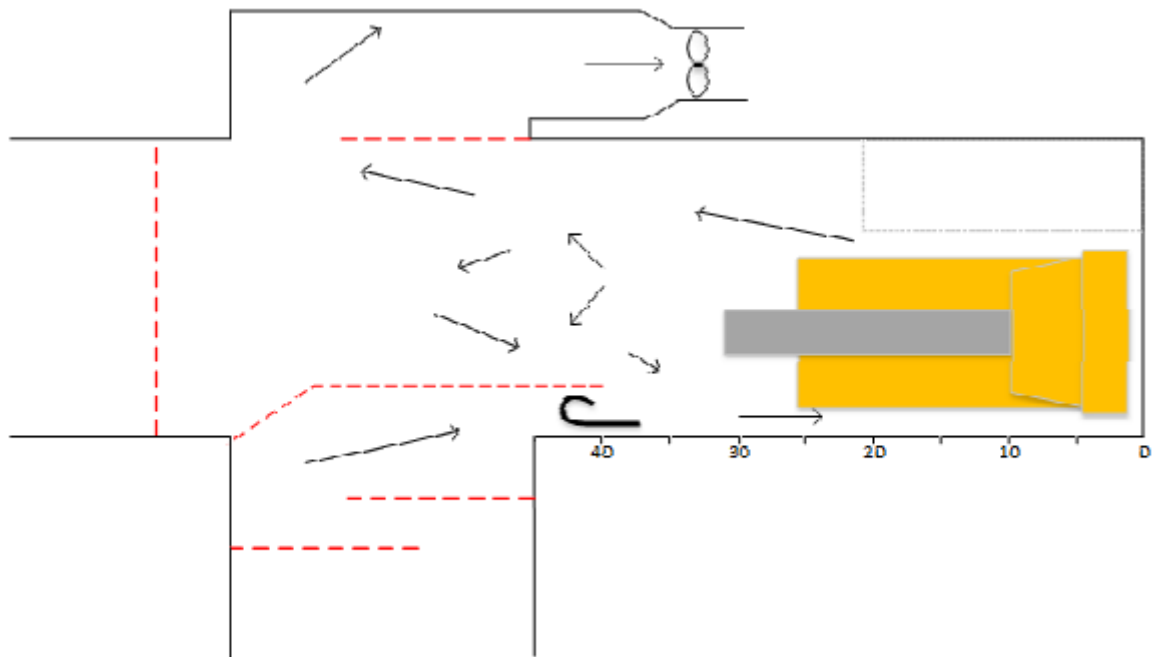


Рис. 3.16. Випробування пилової галереї, скрубер продуктивністю 7000 CFM, з регулятором крила та завісою продуктивністю 7364 CFM.

На рисунку 3.17 представлені результати з вимкненим скруббером повітря та без регулятора крила. Ці зображення були згенеровані з векторних даних, зібраних та оброблених з даних PIV, які були усереднені для побудови ліній струму. Кількість пар зображень, що використовуються програмним забезпеченням для розрахунку усереднених векторів, вказана в кутку, використовувалися лише вектори, що містять щонайменше 80% дійсних зразків. Це означає, що якщо було взято 100 пар зображень, а сектор мав 79 (або менше) вимірних векторів, повернутих після обробки, він був замаскований з результату.

Перегляд (рис. 3.17) ілюструє, як змінюються схеми потоку повітря, коли безперервний видобувач розширює коробчастий виріз. У кожному випадку більша частина свіжого повітря проникає до точки, трохи всередині якої



знаходиться початок розрізу коробки, перш ніж розділитися та потікти до ПЛИТИ.

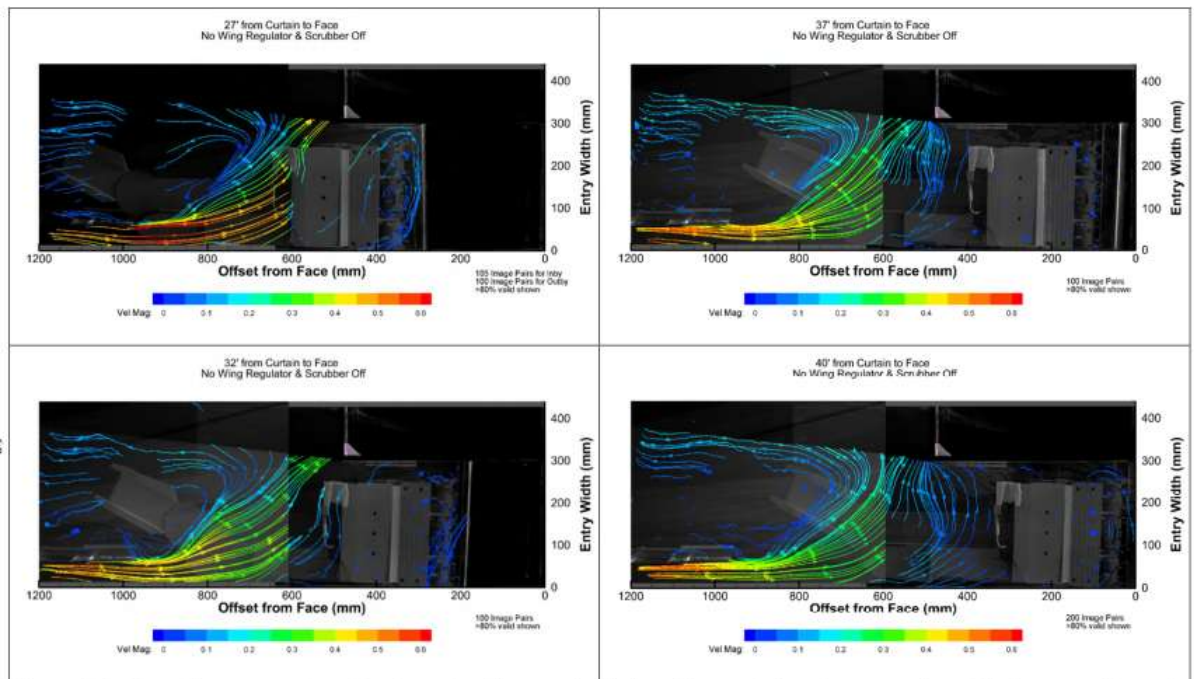


Рис. 3.17. Оптимізовані експорти результатів, що ілюструють зміни потоку повітря під час виконання різання коробки без встановленого крила або скрубера[37-43].

На відстані відступу 27 м повітря надходить до області вибою та рециркулює за годинниковою стрілкою поблизу різального барабана СМ. Зі збільшенням глибини різання ця область рециркуляції розширюється, оскільки повітря з високою швидкістю направляється до повернення. Така ж картина спостерігається і на відстані відступу 37 м та 40 м. Зауважте, що на відстані відступу 37 м та 40 м знижена швидкість цього рециркулюючого повітря ускладнювала підтримання достатньої кількості частинок у зваженому стані та концентрованому стані для точного вимірювання потоку в цій області. Крім того, частинки в цій області не залишаються в одній площині z. Це призводить до втрати даних для системи PIV. Хоча це проблематично для випробувань PIV, це підтверджує ідею, що на великих

відстанях відступу область поблизу вибою має значну кількість повільно рухомого, рециркулюючого повітря, яке може спричинити накопичення метану.

Повітряна картина для повномасштабних еквівалентних відстаней 27 м, 32 м, 37 м та 40 м з налаштуванням вентилятора скрубера, призначеним для імітації стану співвідношення скрубера до повітря зависі 85%, 100% та 115%. Під час експерименту 200 пар зображень на кожную установку було усереднено для ілюстрації найімовірнішої картини повітряного потоку. Як і раніше, лише сектори, які містили векторні результати з більш ніж 80% (або принаймні 160 дійсних вимірювань), були збережені в кінцевих результатах, показаних у наступних підрозділах[55-57].

У цьому сценарії різання продовжується зі скрубером, встановленим на 85% цільового об'єму повітря на зависі. Результати усереднених векторів, отриманих PIV, показані на діаграмах ліній струму (рис. 3.18).

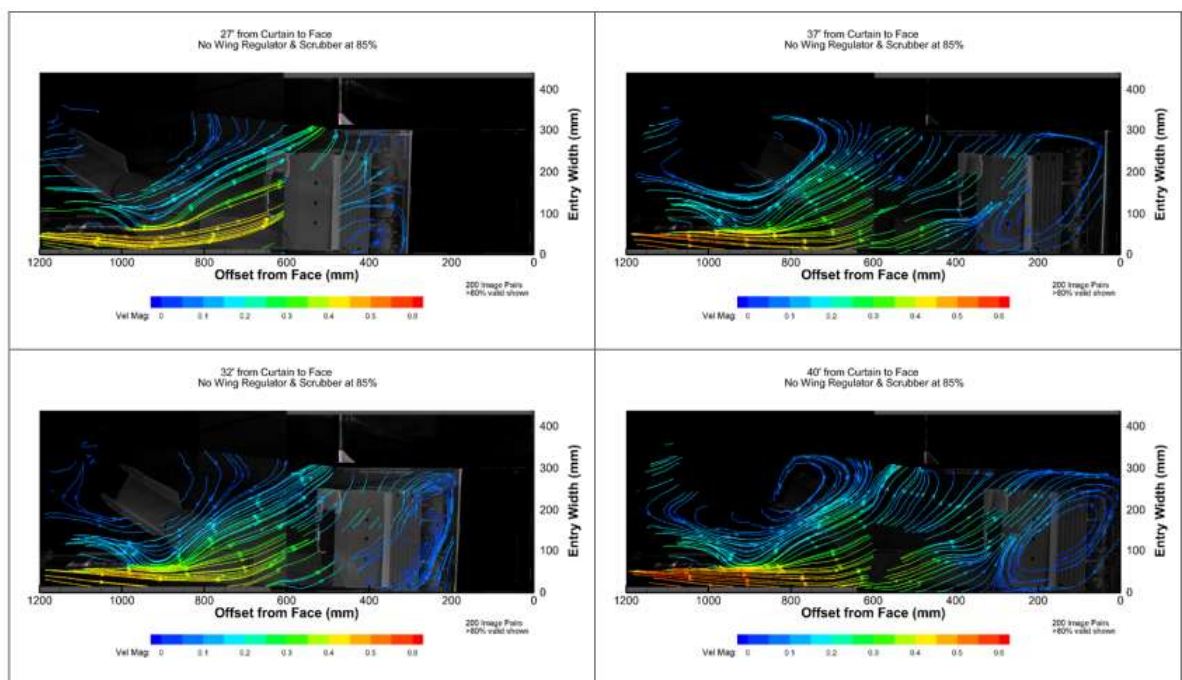


Рис. 3.18. Експортовані дані, що ілюструють зміни потоку повітря під час просування коробчастого зрізу без крила, коли скрубер номінально встановлений приблизно на 85% від цільової швидкості зависі[52-58].

На зображенні відступу 27 м одразу видно, що на боці завіси вже утворився вихор. Це може бути прикладом того, як повітря завіси виходить за межі скрубера. Зі збільшенням глибини виїмки повітря завіси відділяється від ребра з боку завіси та тече ліворуч. Більшість свіжого повітря одразу ж потрапляє до лівого вентиляційного отвору скрубера. Вихор повільнішого повітря стає більшим зі збільшенням довжини виїмки.

Повітряний потік вимірювався для відступів на 27 м, 32 м, 37 м та 40 м з налаштуванням вентилятора скрубера, призначеним для імітації стану співвідношення один до одного повітря скрубера до об'єму повітря завіси. На рисунку 3.19 показано поступові зміни потоку повітря протягом тестованих відступів. На початку розрізу зображення PIV показує, що свіже повітря втягується до забою, де воно зміщує забій ліворуч, перш ніж прискоритися до вентиляційної зони скрубера безперервної дії.

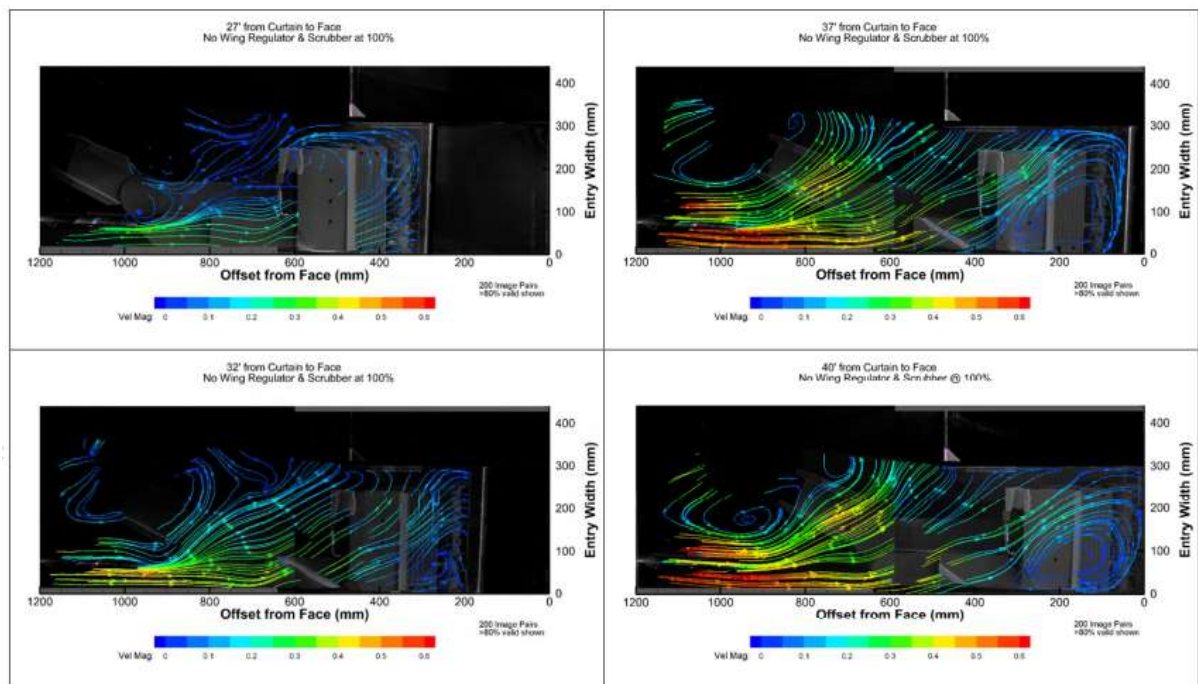


Рис. 3.19 Експорт ліній потоку, що ілюструє зміни потоку повітря під час просування коробчастого зрізу без крила, коли скрубер номінально встановлений приблизно на 100% від цільової швидкості завіси

У міру просування розрізу зона свіжого повітря розширюється, і в кутку завіси забою утворюється вихор. Також слід зазначити, що швидкість повітря, здається, більша на зображеннях з більшим відступом. Це буде додатково оцінено в наступному розділі. Хоча повітря з відносно високою швидкістю продовжувало подавати свіже повітря до забою, вихор продовжував зростати. Розвиток вихрів на обличчі є зонами рециркуляції, які можуть затримувати та накопичувати забруднюючі речовини.

Результати середніх векторів, що генеруються PIV, показані на діаграмах ліній потоку (рис. 3.20).

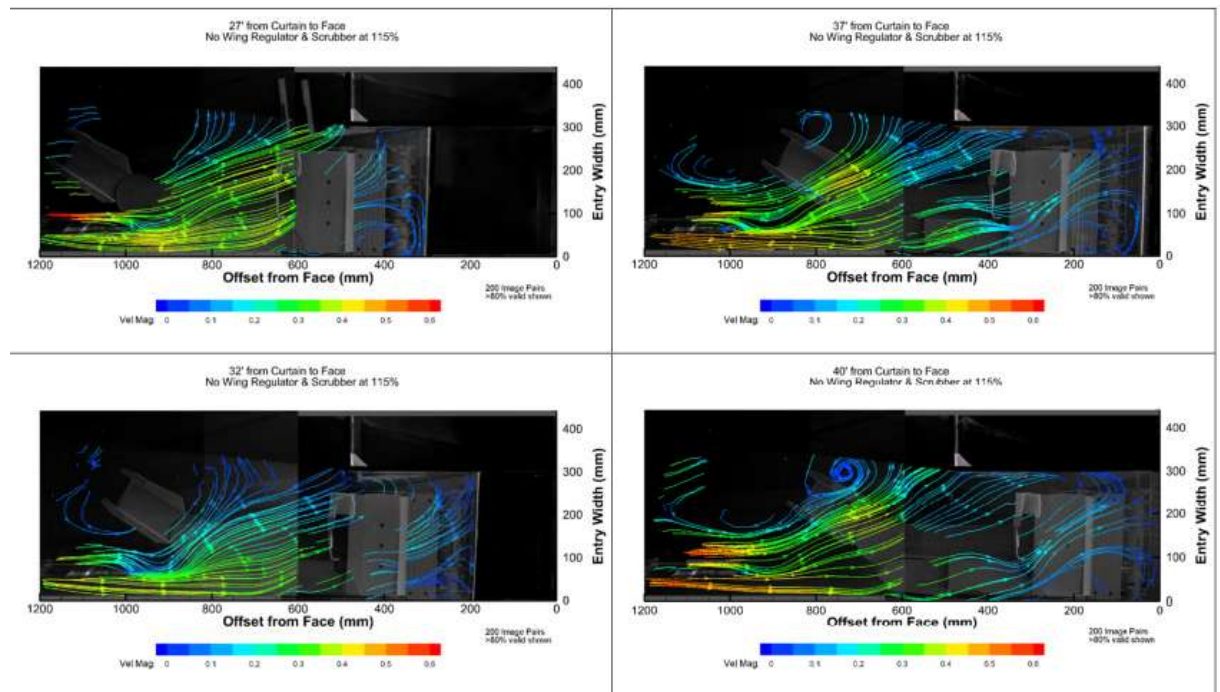


Рис. 3.20. Експортовані дані, що ілюструють зміни потоку повітря під час просування коробчастої виїмки без крила, коли скруббер номінально встановлений приблизно на 115% від цільової швидкості завіси.

Для впуску скрубера приблизно на 115% об'єму повітря завіси, як і у тесті зі співвідношенням 100%, свіже повітря досягає області лицьової поверхні, перш ніж потрапити у лівий впускний отвір скрубера; однак, повітря завіси приєднується до повітря високої швидкості з боку завіси. Це



пов'язано з додатковою тягою від скрубера. Також присутнє утворення вихрів на боці завіси (правій) лицьової поверхні поблизу правого вентиляційного отвору скрубера. На цих діаграмах ліній потоку присутній вихор, утворений вихлопом скрубера. Це також випробувано на повномасштабній моделі та реальних шахтах.

Наступний експеримент моделює безперервний вибійний забій, який використовує продувний забій лише з регулятором крила, коли скрубер вимкнений. Результати PIV (рис. 3.21), з встановленим регулятором крила свіже повітря прискорюється до забію. На глибині 32 м і нижче повітря завіси надходить до забію, проходячи через забій, перш ніж потекти до повернення. Однак, коли коробчаста виїмка стає глибшою, свіже повітря не досягає забою, і перед СМ утворюється великий вир.

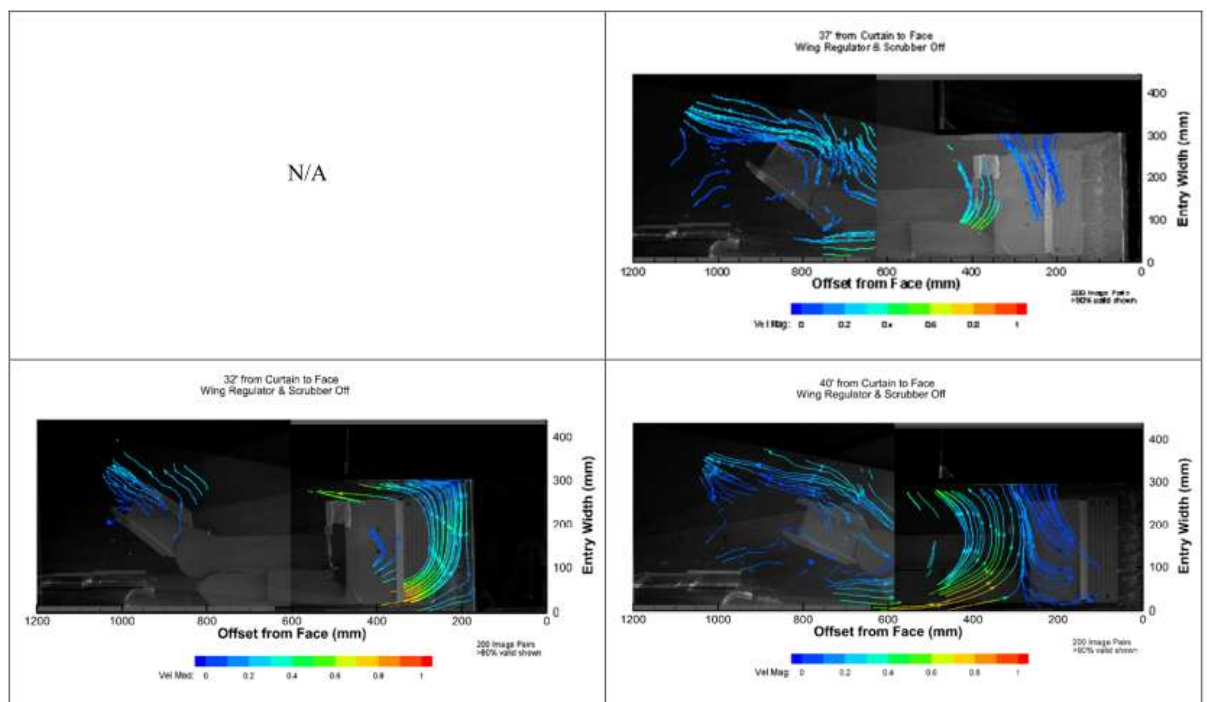


Рис. 3.21 Експорт оптимізованих даних, що ілюструє зміни потоку повітря під час просування коробчастої різьби з крилом та вимкненим скрубером [55-59]

Наступна серія випробувань була розроблена для перевірки впливу поєднання пасивного регулятора та скрубера на рівнях потужності 85%, 100% та 115% від цільового об'єму повітряної завіси.

У цих випробуваннях тестувалися лише відступи 32 м, 37 м та 40 м. Як і в попередньому випробуванні, відступ 27 м не тестувався, оскільки розташування регулятора крила не дозволяє розмістити безперервний видобувний комбайн у цьому місці.

Показано середню швидкість (рис. 3.21), розраховану для трьох відступів: 32, 37 та 40 м при співвідношенні скрубера до завіси 85%. Відразу помітно, що система PIV не змогла належним чином вловлювати рух частинок у горизонтальній площині. У цьому налаштуванні повітря рухається до вибою та змітає його, доки не буде досягнуто повної глибини.

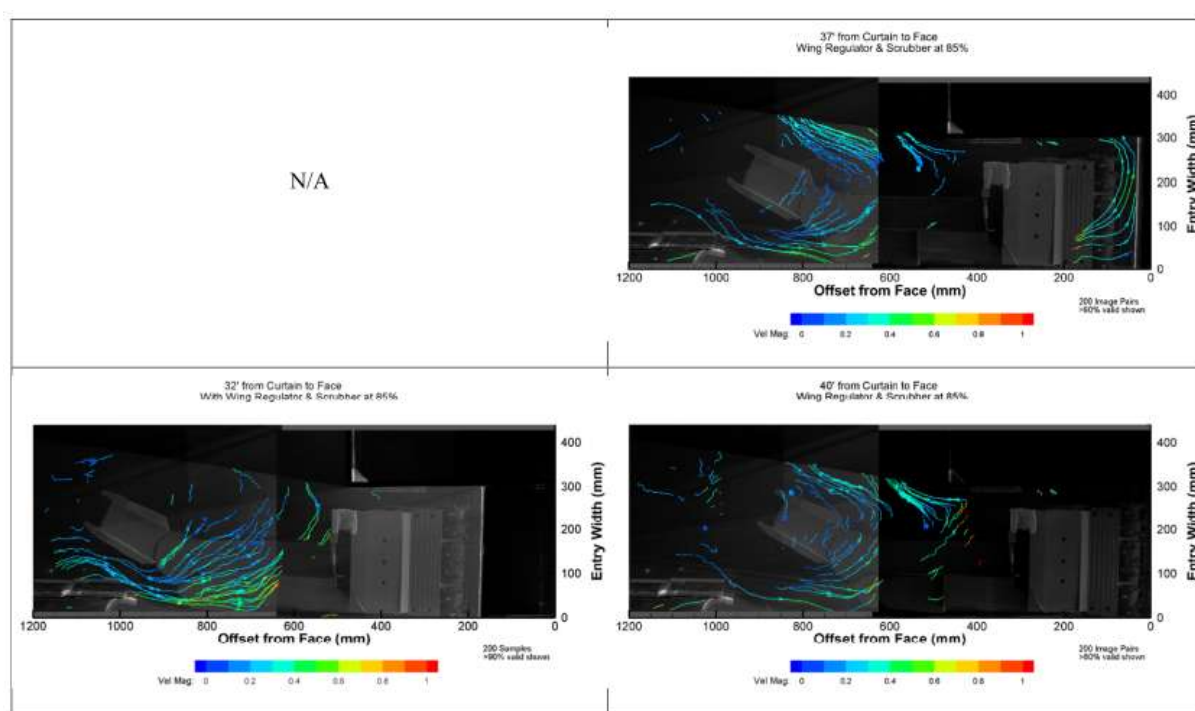


Рис. 3.21 Експортовані дані, що ілюструють зміни потоку повітря під час просування коробчастого зрізу з крилом зі скрубера, номінально встановленим приблизно на 85% від цільової швидкості завіси.

Ефект крила в поєднанні з вакуумом скрубера допомагає повітряю потікати далі в коробчастий виріз. Однак PIV не може обробляти область вибою через високу турбулентність.

На рисунку 3.22 показано середню швидкість, розраховану для трьох відступів: 32, 37 та 40 м. Відразу помітно, що система PIV не змогла належним чином зафіксувати рух частинок у горизонтальній площині. Ці дані показують, що повітря, споживане скруббером, здебільшого переважає ефект, спричинений крилом. Коли скруббер подавав менше повітря, свіже повітря продовжувало надходити на ділянку вибою. Коли скруббер споживає стільки ж повітря, скільки надходить у ділянку, немає звідки більше забирати повітря, окрім потоку, що спрямовується до вибою. У такій конфігурації скруббер руйнує функцію подачі свіжого повітря.

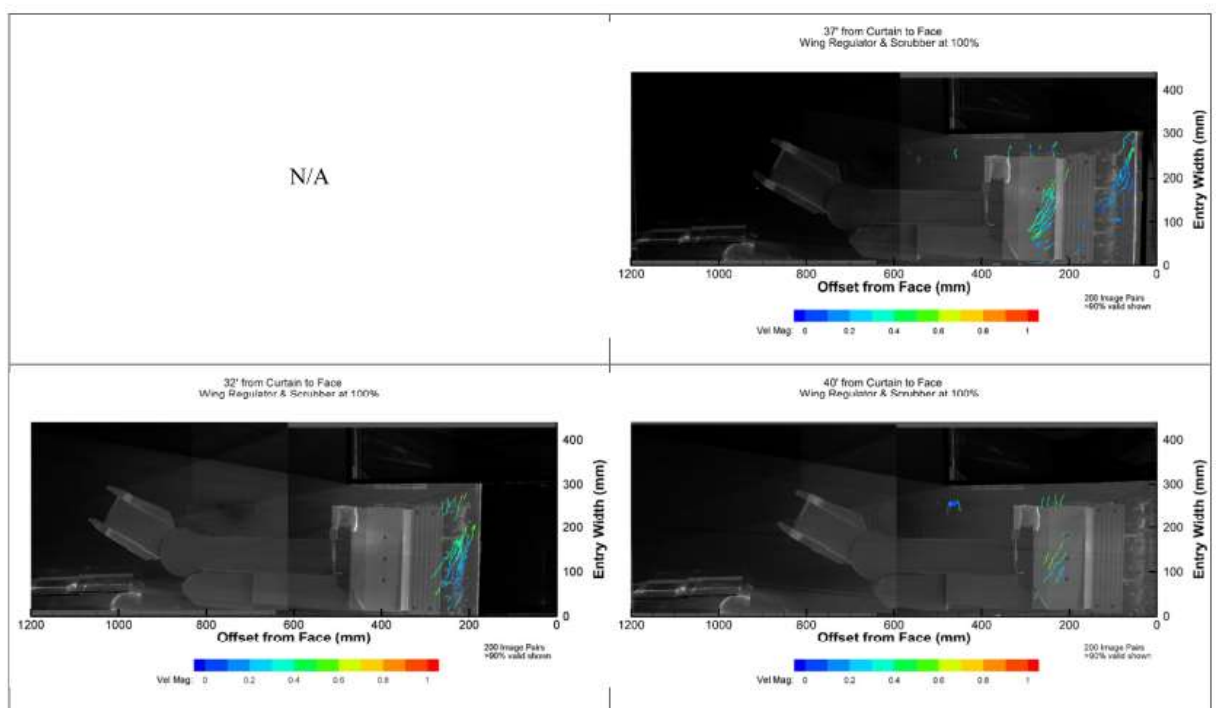


Рис. 3.22. Експортовані дані, що ілюструють зміни потоку повітря під час просування коробчастого зрізу з крилом, де скруббер номінально встановлений приблизно на 100% від цільової швидкості зависі.

На рисунку 3.23 показано середню швидкість, розраховану для трьох відстаней відстаней: 32, 37 та 40 м при співвідношенні скрубера до завіси 115%. Подібно до тестування співвідношення кількості повітря зі 100% скрубера до завіси, система PIV не змогла належним чином зафіксувати рух частинок у цій площині. Турбулентність, створена в цій конфігурації моделі, діє як у горизонтальному, так і у вертикальному плані. Вхідні отвори скрубера тягнуть повітря вниз, під площину PIV, тоді як крило прискорює повітря до стінки.

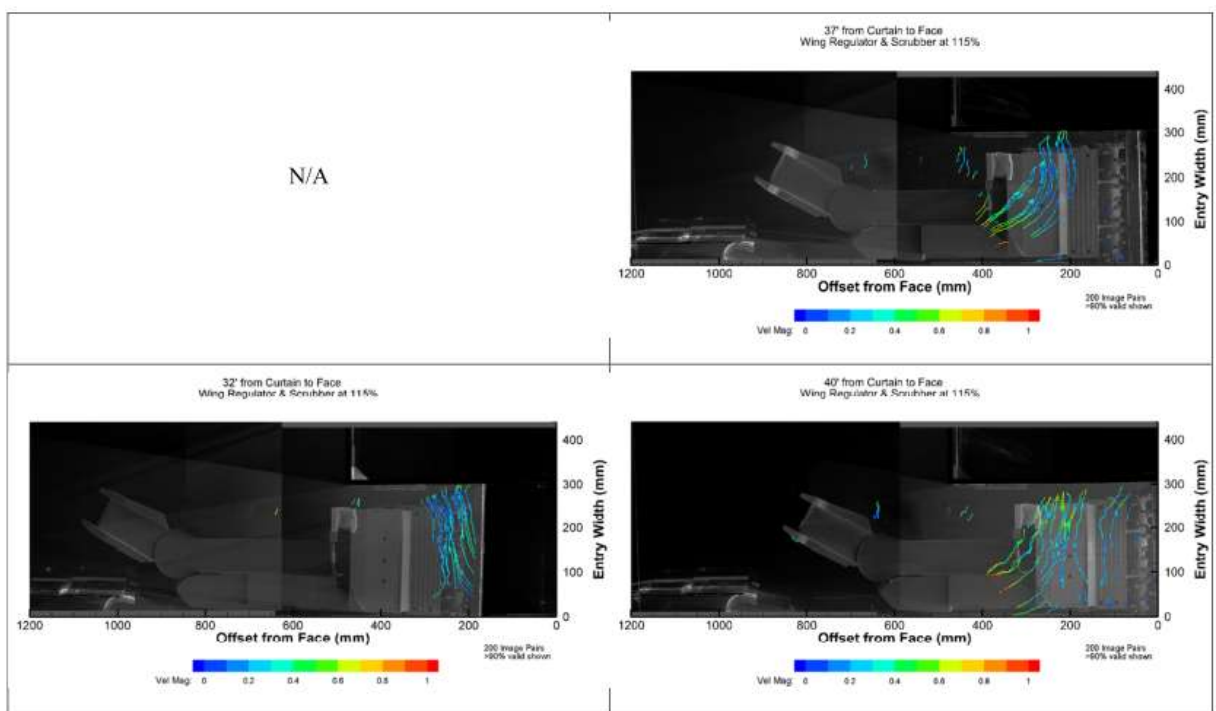


Рис. 3.23. Експортовані дані, що ілюструють зміни потоку повітря під час просування коробчастого зрізу з крилом, де скрубер номінально встановлений приблизно на 115% від цільової швидкості завіси [55-59]

Із зон, згенерованих програмою усереднених швидкостей, можна витягти вектори в точкових інтервалах. Для наступних графіків точки були витягнуті з ребра бокової завіси приблизно на відстані, еквівалентній двом футам від ребра, так само, як це було зроблено в польових та натурних



випробуваннях. Зміна швидкості його руху вздовж цього профілю є характеристикою втрати його поступальної швидкості та його відокремлення від стіни.

Швидкості, виміряні та описані на наступних графіках, є лише швидкістю в напрямку  $x$  або швидкістю руху паралельно стіні. У цій методології використовується умова, що повітря, що входить, вважається «позитивним», тоді як повітря, що виходить, є «негативним». Тому вважається, що місце, де швидкість дорівнює нулю, є критичним місцем, для якого повітря відокремилося від стіни. Вимірювання швидкості (лише  $x$ , лише  $y$  та величина швидкості) проводилися від абсолютного 0 до абсолютних 1000 мм зображення, при цьому для подальшого аналізу було взято 200 точок вибірки.

Слід зазначити, що, хоча під час налаштування випробування було вжито всіх заходів, після його початку швидкість потоку повітря в завісі змінювалася, ймовірно, через рух шахтаря, що призводило до зміни опору потоку. Через зміни швидкості потоку повітря під час випробувань PIV, представлена швидкість була нормалізована до максимальної швидкості кожного тестового набору.

Ця нормалізація дозволяє безпосередньо порівнювати результати випробування. Аналогічно, оскільки неможливо було ідеально вирівняти модель з камерою для кожного випробування, вісь  $x$  графіків представлена у відсотках. Цей відсоток є обчисленням точки вимірювання, як абсолютної, порівняно з іншими точками вимірювання у відсотках від її відстані від забруднення відносно відступу завіси. В результаті 0% представляє фронт, а 100% – відступ завіси. Це спрощує порівняння різних сценаріїв. У Додатку А наведено пояснення номенклатури, що використовується в багатьох легендах графіків.

Використовуючи щойно описану методологію, дані були вилучені для масштабованої моделі з міченим комбайном, де не використовувалися

ні скруббер, ні регулятор крила. Дані двох подібних польових випробувань, з міченим комбайном та без нього, нанесені на один графік (рис. 3.24).

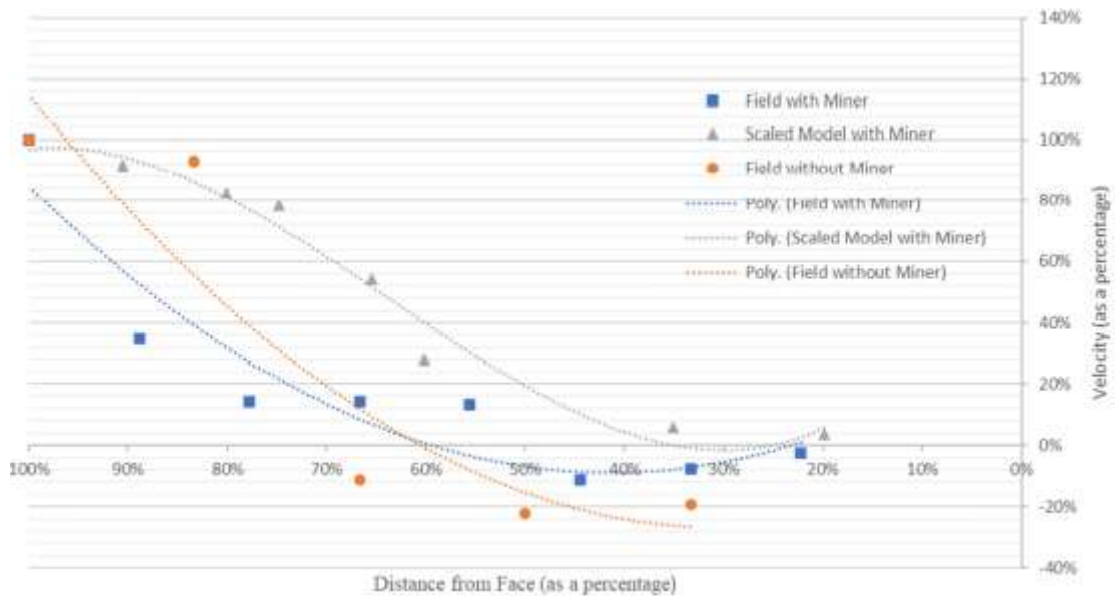


Рис. 3.24 Порівняння кривої швидкості для польової та масштабованої моделі [55-60]

Модель, що використовує масштабування Фруда, створила потік свіжого повітря, який не залишає стінку з боку завіси так рано, як це вимірюється в полі; однак крива швидкості демонструє подібність. Цей зв'язок демонструє зсув кривої між полем та масштабом

Серіз випробувань просування видобувної комбайну виконувалося без скруббера. Кожна крива (рис 3.25) відображає зміну відстані відступу, коли видобувна комбайн просувався у своєму вирізку. Усі криві мають схожу траєкторію, хоча на початку розрізу спостерігається різке збільшення швидкості. Це пов'язано з розміром та формою безперервного мінера, який заповнює вхід і блокує протікання повітря зверху. Це ще більше ускладнює показники PIV над корпусом мінера, оскільки викликає як висхідні потоки, так і турбулентність поблизу площини лазера.

Для визначення точки відриву у відсотках було використано модель поліноміальної регресії, створену на основі точок даних.

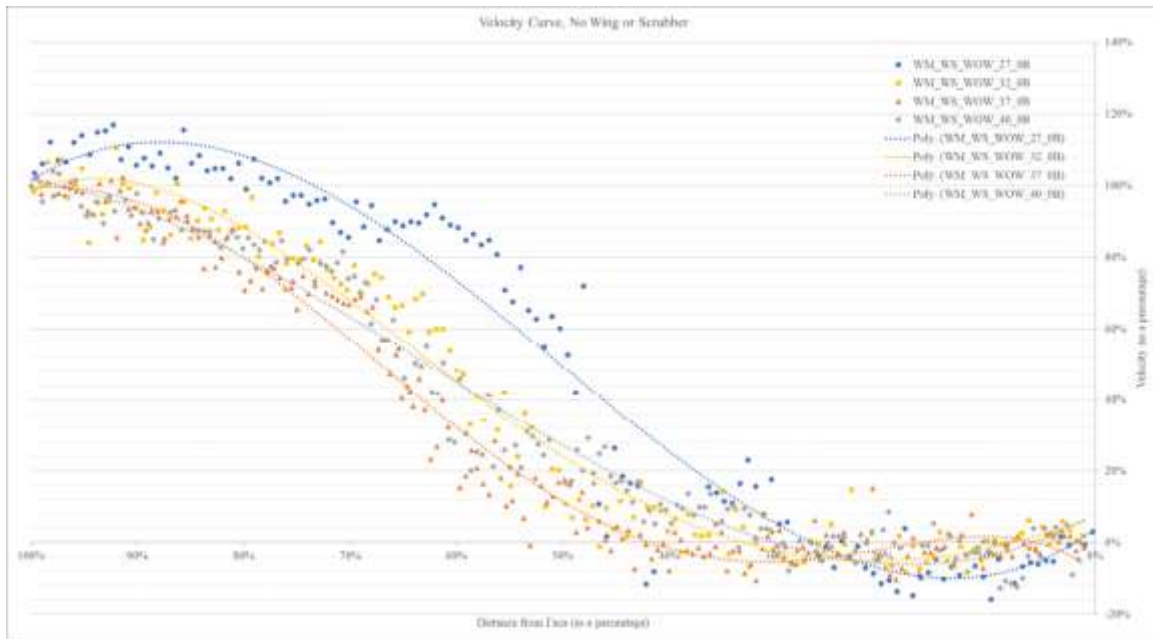


Рис. 3.25 Крива швидкості під час просування розрізу для секції безперервного комбайна без скруббера або регулятора крила. [60-63]

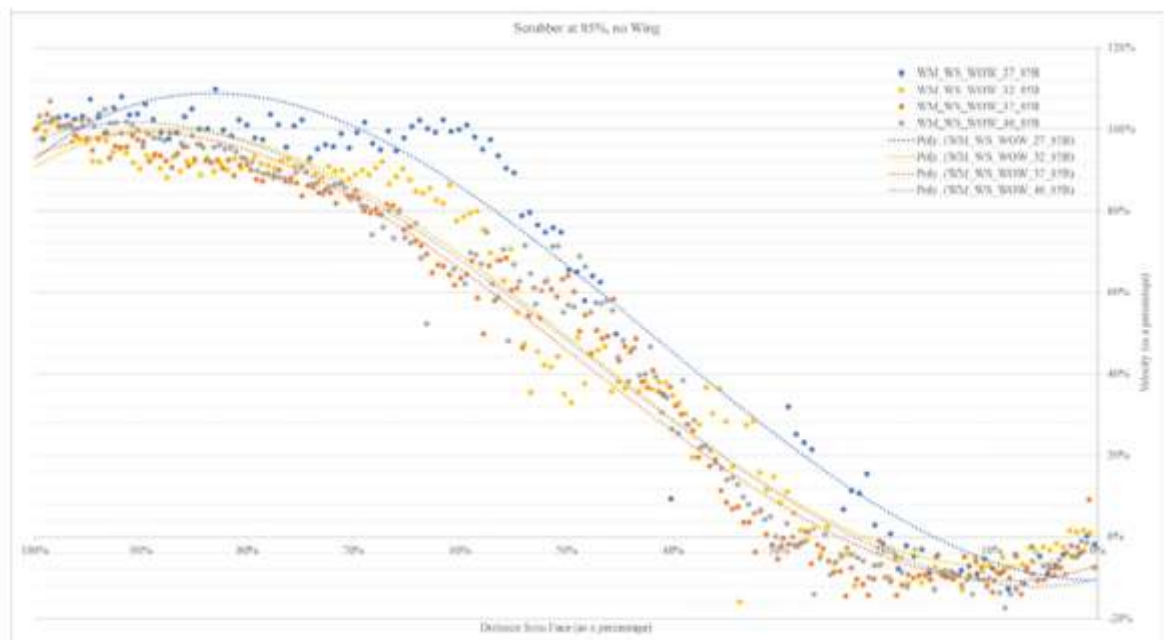


Рис. 3.26 Крива швидкості під час різання для безперервної секції шахтного комбайна зі скруббером, встановленим на 85% від цільової повітряної завіси.

Повітря у відсотках від загального відступу суттєво не змінюється. Розрахована відстань подібна до 100% налаштування скрубера. Наступний графік показує зміну швидкості на витягнутій лінії для тестів, де використовувався скруббер. На рисунку 3.26 крива швидкості побудована для кожного зниження швидкості при співвідношенні скрубера до повітряної завіси 85%. Кожне зниження швидкості відповідає подібній кривій, але, як видно, падіння швидкості круте, що призводить до втрати траєкторії повітря далі від лиць. Більше відносне падіння нижче осі  $x$  вимірює розмір рециркуляції на лиць (рис. 3.10).

Негативна швидкість вказує на зміну напрямку потоку (тобто вихідний потік). Нульова швидкість на цій кривій відповідає відстані, на якій повітря повністю змінило напрямок. Використовуючи поліноміальну регресію точок даних, було знайдено точку перетину з віссю  $x$  (тобто точку відриву свіжого повітря). Кожна крива (рис. 3.27) відображає відстань відступу завіси, коли комбайн виконує свій різблення зі скруббером, встановленим на 100% цільового потоку повітря завіси. Як і в контрольному випадку, швидкість падає, коли повітря завіси просувається до зони вибою.

На початку розрізу було показано, що повітряна завіса досягла аж до забою. Примітно, що цей профіль має іншу тенденцію. У цьому випадку швидкість падала повільніше, а швидке падіння не відбувалося приблизно до 20% відстані від забою до завіси. Швидкість падала з подібною швидкістю для решти випробувань на відступ. Нижче показано точку, в якій кожне випробування, за розрахунками, змінило свій напрямок.

Ці графіки показують, що пилопромивачі повинні втягувати свіже повітря до забою, що максимально, коли забір, вхід скрубера та завіса розташовані найближче один до одного, але значно зменшується зі збільшенням глибини. Як показано на векторних рисунках швидкості, скруббер сам споживає повітря із завіси у співвідношенні один до одного

або вище. Це дійсно втягує його до забою, але не туди, де потрібне свіже повітря.



Рис. 3.27 Крива швидкості під час просування розрізу для безперервної секції видобутку зі скруббером, встановленим на 100% від цільової повітряної завіси.

Модель, що є майже точною копією пилової галереї, має рухому поверхню, що дозволяє досягати різної глибини різання. Лінійна решітка розташована на відстані 40 дюймів від передньої акрилової деталі та 4 дюйми від ребра. Це було однаково для всіх експериментів, показаних у цій дисертації.

Тільки лицьова частина може рухатися за допомогою повзунка підлоги, який позначений для кожного положення відступу: 27", 32" та 37". Відступ 40" – це положення, де лицьова частина не може рухатися далі вперед і щільно притискається до переднього акрилу. Невеликі похибки в положенні лицьової частини викликані рухом вручну, а також зміщенням лицьової частини від перпендикуляра. Тому фактична відстань відступу

розраховується для кожного тесту за допомогою захоплених зображень. У програмі пікселі від лицьової частини до шторки вимірюються, а потім перетворюються на відстань за допомогою даних калібрування зображення.

Швидкість встановлюється на початку тесту, але вона не залишалася постійною протягом всього експериментального запуску. Встановлена процедура не дозволяла переміщувати скляну деталь під час запуску, тому швидкість не могла бути виміряна знову за допомогою зонда анемометра з гарячим дротом та відрегульована. Натомість для вимірювання середньої швидкості свіжого повітря після запуску для коригування значення для кожного відступу використовувалася система PIV. Коефіцієнт скрубера був оновлений, щоб відобразити зміни швидкості свіжого повітря. Сам потік повітря скрубера залишався незмінним протягом усіх випробувань і контролювався дистанційно[50-55].

Точку розділення як відстань визначали шляхом множення скоригованого значення відступу на відсоток, визначений за допомогою раніше показаних регресійних моделей.

Усі експерименти були налаштовані на зниження швидкості 0,52 м/с для імітації кількості повітря завіси 10 000 CFM[54-60]. З окремих вимірювань PIV була виміряна фактична швидкість на завісі в лазерній площині, а також фактичне значення відступу за зображеннями.

## ВИСНОВКИ

У випускній кваліфікаційній роботі проведено комплексний інженерно-технологічний аналіз руху повітря і контролю пилу в очисному вибої під час роботи комбайна. Було проведено необхідні розрахунки геологічної будови, запасів корисних копалин, а також визначено виробничу потужність і режим роботи підприємства.

Під час видобутку вугілля та гірської породи пил розсіюється в повітрі. Цей пил, серед інших забруднювачів, становить серйозну загрозу для здоров'я та безпеки шахтарів. Дуже дрібний пил, відомий як респірабельний пил, може проникати в найглибші частини легень, а тривалий вплив цих частинок призводить до захворювання, яке називається пневмоконіозом вугільників. Випадки цього захворювання постійно знижувалися протягом другої половини 20-го століття, однак нещодавнє дослідження показало з тенденцією до зростання, починаючи з початку століття. Для боротьби з впливом пилу оператори шахт використовують комбінацію водяних розпилювачів та пилових скрубєрів у поєднанні з вентиляцією вибою. Масштабні моделі показали умови для розробки законів масштабування, які допомагають перевірити числове моделювання та розробити більш точні фізичні моделі.

У цій роботі представлені вимірювання потоку повітря, виконані в рамках зменшеної моделі, на різних глибинах різання безперервною виробкою. Результати цих експериментів визначають зв'язок потоку повітря під час фази різання та допомагають дослідникам звузити кількість необхідних симуляцій, оскільки розробляються нові засоби керування вентиляцією або схеми.

ВЕНТИЛЯЦІЯ ВИБОЮ, БЕЗПЕКА ВУГІЛЬНИХ ШАХТ,  
МОДЕЛЮВАННЯ.

## АНОТАЦІЯ

У даній випускній кваліфікаційній роботі магістра досліджено рух повітря і контроль пилу в очисному вибої під час роботи комбайна.

Представлені методики вимірювання потоку повітря. Виконані в рамках зменшеної моделі, на різних глибинах різання безперервною виробкою. Результати цих експериментів визначають зв'язок потоку повітря під час фази різання та допомагають звузити кількість необхідних симуляцій, оскільки розробляються нові засоби керування вентиляцією або схеми

Таким чином вирішено поставлене завдання, в ході виконання випускної кваліфікаційної роботи магістра закріплено знання та навички, отримані за час навчання за освітньо-професійною програмою 184 Гірництво на другому (магістерському) рівні вищої освіти, та підготовлений до роботи в галузі знань 18 Виробництво та технології.

ВЕНТИЛЯЦІЯ ВИБОЮ, БЕЗПЕКА ВУГІЛЬНИХ ШАХТ,  
МОДЕЛЮВАННЯ.



## **ANNOTATION**

In this final qualification work of the master, the movement of air and the control of dust in the cleaning face during the operation of the combine are investigated.

Methods of measuring the air flow are presented. Performed within the framework of a reduced model, at different depths of cutting in continuous mining. The results of these experiments determine the relationship of the air flow during the cutting phase and help to narrow the number of necessary simulations, as new ventilation control means or schemes are developed

Thus, the task was solved, during the performance of the final qualification work of the master, the knowledge and skills obtained during the training in the educational and professional program 184 Mining at the second (master's) level of higher education were consolidated, and prepared for work in the field of knowledge 18 Production and Technology.

**FALL VENTILATION, COAL MINES SAFETY, MODELING**

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кундієв Ю.І., Нагорна О.М. Професійне здоров'я в Україні. – К.: ВД «Авіцена», 2006. – 316 с.
2. Бодаченко Т.П., Бондаренко Г.А., Гладчук Є.А., Ніколенко В.Ю. Динаміка виявлення професійних та професійних обумовлених пилон захворювань // Вісник гігієни та епідеміології. - 1998. - № 1 (3). - 52 с.
3. Мухін В.В., Передерій Г.С., Басанець О.В., Харковенко М.М. Соціально-гігієнічний аналіз механізмів формування професійної захворюваності гірників вугільних шахт, заходи її профілактики // Укр. журн. з пробл. медицини праці. – 2006. – № 2. – С. 63–73.
4. Кундієв Ю.І. Медицина праці – п'ятдесятилітній досвід. - К.: Авіценна, 2002. - 672 с.
5. Зінгер Ф.Х., Кальянов А.В., Гаджієв Г.П. та ін. Професійна захворюваність, інвалідність та смертність гірників шахт вугільний промислоості // Інформаційні матеріали для організаторів вугільного виконання робіт, органів та закладів охорони здоров'я, профспілки, парт. і сов. органів. - Донецьк, 1990. - 73 с.
6. Професійний ризик для здоров'я працівників : керівництво / За ред. Н.Ф. Ізмерова та Е.І. Денісова. - М. НДІ медицини праці РАМН, 2003. - 448 с.
7. Роїк В.Д. Управління умовами та охороною праці: Навчальний посібник. - М.: РАГС, 2004. - 255 с.
8. Система управління безпекою та гігієною праці. Вимоги. ДСТУ-П 18001:2006 (OHSAS 18001:1999, IDT). - Охорона праці, 2006. - № 10. - С. 2-14.
9. Про єдину державну систему показника обліку умов та безпеки праці.– Наказ Держкомохоронпраці України від 31.03.1994 № 27 / Охорона праці, 2006. - № 7. - С. 2-6.

10. Боротьба з газом та пилом у вугільних шахтах: збірник статей. К.: МакНДІ, 1967.
11. Кияшка І.А. Процеси підземних гірських работ. - К.: Вища школа, 1984. - 255 с.
12. Меньйло Н.І Гігієна праці в очисних вибоях вугільних шахт Донбасу/Автореф. дис. ... докт. мед.наук. - Донецьк, 1987. - 56 с.
13. Посібник із боротьби з пилом у вугільних шахтах. - М.: Надра, 1979. - 319 с.
14. Чорноусов Я.М. Геологія вугільних родовищ. - К.: Вища школа, 1977.
15. Желдаков М.Є., Іванова Е.І. Довідник з якості антрацитів Радянського Союзу, - М.: Надра, 1980.
16. Миронов К.В. Довідник геолога. М.: Надра, 1982.
17. ГОСТ 25543-88. Вугілля буре, кам'яне та антрацити. Класифікація з генетичних та технологічних параметрам: Введ. 01.01.90.
18. Антоненко Н.І., Сятковський С.Л. Залежність властивостей вугілля та їх елементного складу від степені метаморфізму // Вугілля України, 2001.№ 2-3. - С. 46-48.
19. Медведєв Е.М., Саранчук В.І., Качан В.М. Оцінка пилоутворюючої здатності вугілля в ряді метаморфізму // Вугілля України, 1984. - № 8. - С. 32-33.
20. Передерій Г.С., Пономаренко О.М., Харковенко Н.М., Шемякін Г.М., Денисенко О.П. Аналіз чинників, що впливають на професійну пилову захворюваність шахтарів України // Укр.журн. з пробл. медицині праці. – 2009. – № 1. – С. 23–33.
21. Меньйло Н.І., Передер Г.С., Догадайло Є.І., Агаєва Н.Т. Гігієнічна оцінка пилу фактора в очисних вибоях при виїмці вугілля з присічкою бічних порід // Гігієна праці та професійні захворювання, 1979. - С. 28-32.

22. Інструкція щодо визначення допустимих термінів роботи працюючих у шкідливих умовах. / Авт. Передерій Г.С., Теплова Т.Є., Шаптала А.А. та ін. – Київ, 2007. – 31 с.
23. ABC Industries. (2021). Brattice/Curtains. Retrieved from <https://www.abc-industries.net/products/brattice-curtains-flypads>
24. Alehossein H, Poulsen BA. Stress analysis of longwall top coal caving. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2010;47(1):30-41
25. Arens M, Åhman M, Vogl V. Which countries are prepared to green their coal-based steel industry with electricity?- Reviewing climate and energy policy as well as the implementation of renewable electricity. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021;2020:143
26. Bise, C. J. (1986). Ventilation. In MINING ENGINEERING ANALYSIS (p. 23). Littleton: SME.
27. Caterpillar Inc. Caterpillar Inc. 2022. Available from: [https://www.cat.com/en\\_US/by-industry/mining.html](https://www.cat.com/en_US/by-industry/mining.html)
28. Coal facts 2022, in London: World Coal Association
29. Coal India Limited (CIL). Coal India Limited (CIL). 2022. Available from: <https://www.coalindia.in/>
30. Colinet, J. F., McClelland, J. J., Erhard, L. A., & Jankowski, R. A. (1990). RI 9313: Laboratory Evaluation of Quartz Dust Capture of Irrigated-Filter Collection Systems for Continuous Miners. Spokane, WA.
31. Colinet, J. F., Reed, W., & Potts, J. D. (2013). Impact on Respirable Dust Levels When Operating a Flooded-bed Scrubber in 20-foot Cuts. In DHHS (Niosh) Publication 2014-105, Ri 9693. Pittsburgh, PA.
32. Colinet, J. F., Rider, J. P., Listak, J. M., Organiscak, J. A., & Wolfe, A. L. (2010). Best Practices for Dust Control in Coal Mining. In IC 9517 Information Circular: Best Practices for Dust Control in Coal Mining (Vol. 01).

33. Das AJ et al. Evaluation of stability of underground workings for exploitation of an inclined coal seam by the ubiquitous joint model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017;93:101-114
34. Ediz IG et al. application of retreatting and caving longwall (top coal caving) method for coal production at GLE Turkey. *Mining Technology*. 2013;115(2):41-48
35. Galvin JM. *Ground Engineering - Principles and Practices for Underground Coal Mining*. Springer International Publishing; 2016
36. Geological Survey of India (GSI). Geological Survey of India, 2022
37. Goodman, G. V. R., Taylor, C. D., Colinet, J. F., & Thimons, E. D. (2000). NIOSH Research for Controlling Respirable Dust and Methane Gas on Continuous Miner Faces. *Proceedings of the 12th International Conference on Coal Research*, Sandton,
38. Goodman, G. V. R., & Taylor, C. D. (1993). Chapter 4: A technique for evaluating scrubber recirculation during deep cut mining. *Proceedings of the 6th US Mine Ventilation Symposium*, 19–24. Littleton, CO: Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
39. Hall, N. B., Blackley, D. J., Halldin, C. N., & Laney, A. S. (2019). Current Review of Pneumoconiosis Among US Coal Miners. *Current Environmental Health Reports*, 6(3), 137–147. <https://doi.org/10.1007/s40572-019-00237-5>
40. Honkanen, M., & Nobach, H. (2005). Background extraction from double-frame PIV images. *Experiments in Fluids*, 38(3), 348–362. <https://doi.org/10.1007/s00348-004-0916-x>
41. Hustrulid WA. *Underground Mining Methods Handbook*. United States of America. 1982
42. Indian Bureau of Mines (IBM). Indian Bureau of Mines. 2022. Available from: <https://ibm.gov.in/>

43. Indian Minerals Yearbook 2019. Indian Bureau of Mines. Indian Minerals Yearbook 2019. 2019
44. Ivaz JS et al. A retrospective comparative study of Serbian underground coalmining injuries. *Saf Health Work*. 2021;12(4):479-489
45. J A Engineering Australia Pvt. Ltd. 2022. Available from: <https://www.jaeaust.com.au/manufacturing/continuous-miners/>
46. Jiang B et al. Ground pressure and overlying strata structure for a repeated mining face of residual coal after room and pillar mining. *International Journal of Mining Science and Technology*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited; 2016;26(4):645-652
47. Kiger, K. (2010). Introduction of Particle Image Velocimetry. Burgers Program For Fluid Dynamics, 57. Retrieved from <https://www2.cscamm.umd.edu/programs/trb10/presentations/PIV.pdf%0Ahttp://www2.cscamm.umd.edu/programs/trb10/presentations/PIV.pdfm>
48. Komatsu Limited. 2022. Available from: <https://www.komatsu.jp/en/industries-we-support/mining>
49. Kumar, A. R., Henderson, K. M., & Schafrik, S. (2021). Scale Modeling, PIV, and Large Eddy Simulations in a Deep Cut Blowing Type Continuous Mining Section. Lexington, KY.
50. Leeming JJ. Introduction of continuous miner technology into Indian coal mines. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2003;2003:327-335
51. Li W et al. Numerical modeling for yield pillar design: A case study. Turkey: *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015;48(1):305-318
52. Lien L. Advances in coal mining technology. In: *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited; 2013. pp. 193-225
53. Lind G. An integrated risk management approach for underground coal pillar extraction in South Africa. *Journal of the Southern African. Southern Africa: Institute of Mining and Metallurgy*. 2005;105(2):137-147

54. Lind G. Coal pillar extraction experiences in New South Wales. South African Institute of Mining and Metallurgy. 2002;102(4):199-206
55. Lind G. Key success elements of coal pillar extraction in New South Wales. South African Institute of Mining and Metallurgy. 2002;102(4):207-216
56. Lind GH. Risk management of underground coal pillar extraction in South Africa. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. 2005;19(3):218-233
57. Liu H et al. Comprehensive study of Strata movement behavior in mining a longwall top coal caving panel of a composite coal seam with partings. Applied Sciences. 2020;10(15)
58. Mandal PK et al. Underpinning-based simultaneous extraction of contiguous sections of a thick coal seam under weak and laminated parting. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2008;45(1):11-28
59. Martin CH. Australia: Australasian Coal Mining Practice. 1986
60. McPherson, M. J. (1993a). Background to Subsurface Ventilation. In Subsurface Ventilation Engineering (pp. 1–8). Mine Ventilation Services.
61. McPherson, M. J. (1993b). Subsurface Ventilation and Environmental Engineering (Vol. 1). <https://doi.org/10.10017/978-94-011-1550-6> 97
62. Ministry of Coal, Government of India (GOI). Ministry of Coal. 2022
63. Mitchell G. Longwall Mining: Australia: Australasian Coal Mining Practice. 2009. pp. 340-373
64. Moolman C, Canbulat I. United States of America: COALTECH 2020. 2003
65. NIOSH. (2008). Work-related lung disease surveillance report 2007, Volume 1 DHHS (NIOSH) Publication No. 2008-143a. Cincinnati, OH.
66. Oswald, N., Prosser, B., & Ruckman, R. (2008). Measured values of coal mine stopping resistance. Coal Age, 113(12), 40–43.
67. Pappas DM, Mark C. Behavior of Simulated Longwall Gob Material. United States of America: Department of the Interior; 1993:1-45

68. Peng S. *Advances in Coal Mine Ground Control*. Woodhead Publishing; 2017
69. Peng SS. *Longwall Mining*. London: CRC Press; 2019. DOI: 10.1201/9780429260049
70. Petrov, T., Wala, A. M., & Huang, G. (2013). Parametric study of airflow separation phenomenon at face area during deep cut continuous mining. *Mining Technology*, 122(4), 208–2014. Retrieved from Academic Search Complete, EBSCOhost
71. Potts, J. D., Reed, W., & Colinet, J. F. (2011). RI 9680 Evaluation of face dust concentrations at mines using deep-cutting practices. Pittsburgh, PA.
72. Provisional Estimates of Annual National Income, 2020-21 and Quarterly Estimates (Q4) Of Gross Domestic Product, 2020-21. Gross Domestic Product, 2020-21, Ministry of Statistics and Programme Implementation
73. Reed, W., & Taylor, C. (2007). Factors affecting the developing of mine face ventilation systems in the 20th century. National Institute for Occupational Safety and Health. Retrieved from <http://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/fatdo.pdf>
74. Republic of South Africa, September 12-15, 2000, 151–154. Johannesburg, South Africa: South Africa Institute of Mining and Metallurgy.
75. Sandvik. 2022. Available from: <https://www.rocktechnology.sandvik/>
76. Schafrik, S. (2019). Alpha Foundation for the Improvement of Mine Safety and Health Final Technical Report AFC215 – 15 Improved Face Ventilation for Extended-Cut Continuous Mining Using a Wing Regulator and Scrubber Control System.
77. Schultz, M. J., & Fields, K. G. (1999). DUST CONTROL CONSIDERATIONS FOR DEEP CUT MINING SECTIONS. In Preprint 99-163. Littleton, CO: SME.



78. Sheorey P et al. Application of the yield pillar technique for successful depillaring under stiff strata. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1995:699-708
79. Sheorey P et al. Coal pillar strength estimation from failed and stable cases. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1987;24(6):347-355. ISSN: 0148-9062. DOI: 10.1016/0148-9062(87)92256-X. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/014890628792256X>
80. Sheorey P et al. Pillar strength approaches based on a new failure criterion for coal seams. *International Journal of Mining and Geological Engineering*. 1986;4(4):273-290
81. Singareni Collieries Company Limited (SCCL). Singareni Collieries Company Limited (SCCL). 2022. Available from: <https://scclmines.com/scclnew/index.asp>
82. Singh AK et al. Coal pillar extraction under weak roof. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020;37(5):1451-1459
83. Singh R et al. Coal pillar extraction at deep cover: With special reference to Indian coalfields. *International Journal of Coal Geology*. 2011;86(2-3):276-288
84. Singh R et al. Optimal underground extraction of coal at shallow cover beneath surface/subsurface objects: Indian practices. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2007;41(3):421-444
85. Singh R et al. Rib/snook design in mechanised depillaring of rectangular/square pillars. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016;84:119-129
86. Taylor, C. D., Chilton, J. E., Hall, E., & Timko, R. J. (2006). Effect of Scrubber Operation on Airflow and Methane Patterns at the Mining Face. *Proceedings of the 11th US/North American Mine Ventilation Symposium*,

- 393–400. Retrieved from  
<https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/eosoo.pdf>
87. Thimons, E. D., Taylor, C. D., & Zimmer, J. A. (1999). Ventilating the Box Cut of a Two-Pass 40-ft Extended Cut. *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa*, Jul 52(3), 108–115. Retrieved from  
<http://www.cdc.gov/niosh/mining/works/cover sheet1090.html>
88. Troolin, D., Hortensius, R., & Lai, W. T. (2020). PIV Leak Assessment of N95 Respirators. Retrieved from tsi.com website:  
<https://tsi.com/resources/piv-leak-assessment-of-n95-respirators/>
89. TSI. (2013). How Frame Straddling Works. Retrieved from tsi.com website: [www.tsi.com/getmedia/80f5dbd-7268-4cc8-a414-cfc6866f91d0/How\\_Frame-Straddling\\_Works\\_\\_1](http://www.tsi.com/getmedia/80f5dbd-7268-4cc8-a414-cfc6866f91d0/How_Frame-Straddling_Works__1)
90. Vinay LS et al. Numerical study of stability of coal pillars under the influence of line of extraction. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2022;13(1):1556-1570
91. Wala, A. M., Vytla, S., Taylor, C. D., & Huang, G. (2007). Mine Face Ventilation: A Comparison of CFD Results against Benchmark Experiments for the CFD Code Validation. *Mining Engineering*, 59(10), 49–55.
92. WHO. (1999). Definitions and Concepts. In *Hazard Prevention and Control in the Work Environment: Airborne Dust* (pp. 1–96).  
<https://doi.org/10.23943/princeton/9780691143620.003.0002>
93. Williams, M. A. (2005). UNDERGROUND COAL MINING : FACTORS , COST , AND TIME CONSIDERATIONS. NCCI: The Coal Institute Fall Meeting. Retrieved from  
[http://www.thecoalinstitute.org/ckfinder/userfiles/files/Fall\\_Skelly\\_Loy.pdf](http://www.thecoalinstitute.org/ckfinder/userfiles/files/Fall_Skelly_Loy.pdf)
94. Xu B. Application of the Longwall Top Coal Caving System in Australian Thick Seam Coal Mines. Australia: University of New South Wales; 2004