

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Гірничий

(повне найменування інституту, назва факультету)

Розробка родовищ корисних копалин

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

І.О. Єфремов

(підпис)(ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 2023 ____ р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

Обґрунтування раціональних параметрів дегазаційних свердловин для ефективного відпрацювання виймкового стовпа в умовах пл. d₄ ПрАТ ШУ "Покровське"

Виконав: студент 2 курсу, групи РККм-22
(шифр групи)

напряму підготовки (спеціальності) 184 Гірництво
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Дробіна А.М.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник канд.техн. наук, доцент Артем МЕРЗЛІКІН
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент: канд.техн. наук, доцент Олексій КУТНЯШЕНКО
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

*Засвідчую, що у цей дипломний робота
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.*

Студент _____
(підпис)

Луцьк – 2023 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Кафедра: Розробка родовищ корисних копалин

Освітньо-кваліфікаційний рівень (освітній ступінь) Магістр

Напрямок підготовки (спеціальність) 184 Гірництво
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

І.О. Єфремов / _____ /

“ _____ ” _____ 2023 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ (ДИПЛОМНУ) РОБОТУ СТУДЕНТУ

Дробіна Антону Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема проекту (роботи): Обґрунтування раціональних параметрів дегазаційних свердловин для ефективного відпрацювання виїмкового стовпа в умовах пл. d4 ПрАТ ШУ "Покровське"

1. Керівник проекту (роботи) к. т. н., доцент Артем МЕРЗЛІКІН
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від “ _____ ” _____ 20 ____ року № _____

Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) матеріали практики _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Стисла характеристика району діючої шахти. Опис шахтного поля і стволів. Аналіз технологічного комплексу поверхні, шахтних підйомних установки, характеристик шахтних стволів, що знаходяться в експлуатації на ПрАТ ШУ "Покровське". Огляд й дослідження фактичного газовиділення. Обґрунтування раціональних параметрів дегазаційних свердловин для ефективного відпрацювання виїмкового стовпа.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1.	Мерзлікін А.В., к.т.н, доцент		

7. Дата видачі завдання 1 жовтня 2022р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Стисла характеристика району діючої шахти	1.10.23-15.10.23	
2	Опис шахтного поля і стволів. Аналіз технологічного комплексу поверхні, шахтних підйомних установки, характеристик шахтних стволів, що знаходяться в експлуатації ПрАТ ШУ "Покровське"	15.10/2023-30.10/2023	
3	Огляд й дослідження фактичного газовиділення.	01.11-2023 10.11.2023	
4	Обґрунтування раціональних параметрів дегазаційних свердловин	10.11.2023-30.11.2023	
5	Економічне обґрунтування запропонованих рішень.	01.12.2023-15.12.2023	

Студент _____
(підпис)

Антон ДРОБІНА _____
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____
(підпис)

Артем МЕРЗЛІКІН _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дробіна Антон Миколайович. Обґрунтування раціональних параметрів дегазаційних свердловин для ефективного відпрацювання виїмкового стовпа в умовах пл. d4 ПрАТ ШУ "Покровське".

Випускна магістерська робота на здобуття освітнього ступеню магістра за спеціальністю 184 «Гірництво» – ДНВЗ «ДонНТУ», Луцьк, 2023.

Зі збільшенням вартості управління газом в умовах інтенсивного розвитку запасів, правильний відбір параметрів технологічних схем дегазації та відокремленого відбору газу необхідна, технічна можливість впровадження якого в основному залежить від прийняті параметри підготовки районів видобутку. Крім того, вибір методів управління газом у умовах глибоких шахт обмежується тенденцією до 70% спонтанного утворення, під час розробки яких використання схем вентиляції, методів дегазування виробленого простору. Ізольований відбір, що передбачає рух повітря у всьому виробленому просторі або значну його частину.

Ефективність робочих потужних пологих газових пластів, схильних до раптового згоряння, забезпечується за допомогою сучасних заходів у поєднанні з дегазацією та ізольованим розподілом метан повітряної суміші, параметри яких визначаються на основі чисельного моделювання аерогозодинамічних процесів в межах видобутку.

Ключові слова

ДЕГАЗАЦІЯ, МЕТАНОВИДІЛЕННЯ, ГАЗОРЯСНІСТЬ, ГАЗОНОСНІСТЬ

ABSTRACT

Anton Mykolayovych Drobina. Justification of the rational parameters of degassing wells for effective working out of the excavation pillar in the conditions of the square. d4 "Pokrovske".

Final master's thesis for obtaining a master's degree in specialty 184 "Mining" - DNVZ "DonNTU", Lutsk, 2023.

With the increase in the cost of gas management in conditions of intensive development of reserves, the correct selection of parameters of technological schemes of degassing and separate gas selection is necessary, the technical possibility of its implementation mainly depends on the accepted parameters of preparation of production areas. In addition, the choice of gas management methods in the conditions of deep mines is limited by the tendency to 70% of spontaneous formation, during the development of which the use of ventilation schemes, methods of degassing of the produced space. Isolated selection, which involves the movement of air in the entire produced space or a significant part of it.

The efficiency of working powerful shallow gas formations prone to sudden combustion is ensured with the help of modern measures in combination with degassing and isolated distribution of methane in the air mixture, the parameters of which are determined on the basis of numerical modeling of aerogasodynamic processes within the mining area.

Keywords

DEGASATION, METHANE RELEASE, GAS CAPACITY, GAS CAPACITY

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Глава 1 Стан питання. Цілі та завдання досліджень	10
1.1 Аналіз умов видобутку та видобутку та видобутку для розвитку газових вугільних пластів.....	10
1.2 Аналіз світового досвіду інтенсивної розробки газоносних вугільних пластів	17
1.3 Оцінка ефективності застосованих технологічних схем для розробки газоносних вугільних пластів.....	22
1.4 Висновки в першій главі.....	29
Розділ 2 Шахтні дослідження впливу параметрів технологічних схем на ефективність управління газовиділенням.....	34
2.1 Вибір методів дослідження	39
2.2 Дослідження впливу параметрів технологічних схем та інтенсивності роботи над ефективністю розробки пластів	42
2.3 Дослідження впливу параметрів застосованих схем дегазації виробленого простору на ефективність вилучення газу	48
2.4 Висновки на другому розділі	52
Розділ 3 Числові дослідження впливу параметрів технологічних схем на ефективність дегазаційних свердловин	53
3.1 Вибір та обґрунтування для аерогозодинамічних моделей для чисельних досліджень.....	54
3.2 Числові дослідження впливу параметрів дегазаційних свердловин на ефективність вилучення газу	59
3.3 Висновки на третьому розділі.....	64
Розділ 4 Технічне та економічне обґрунтування параметрів дегазаційних свердловин для інтенсивного видобутку вугілля	66
4.1 Обґрунтування параметрів технологічних схем інтенсивної розробки потужних газових вугільних пластів.....	66
4.2 Оцінка економічної ефективності розроблених рекомендацій	72
4.3 Висновки на четвертому розділі	77
Висновок.....	79
Список літератури	81

ВСТУП

Актуальність роботи. В останнє десятиліття підвищення надійності та живлення обладнання для очищення забезпечило значне збільшення навантажень на очисні споруди, а також зміну параметрів викидів, що призвело до значного збільшення газового резистентності видобутку та зміни їх балансу газу у напрямку збільшення частки розведення газу з розвинених просторів, особливо для потужних пластів. В умовах відносно невеликої глибини гірничих робіт на шахтах під час інтенсивного розвитку наближених пластів, що вміщують гази в довгих очисних виробках, в дільничих виробках використовується в області розробки, включаючи комбіновану вентиляційну схему, дегазації виробленого простору, використовуючи вертикальні дегазації свердловин, просвердлених від земної поверхні, ізольованого відведення суміші метану. Застосування вертикальних дегазуючих свердловин забезпечує видалення значних обсягів суміші метану -повітря (МВ) з високою концентрацією метану з виробленого простору, однак вартість проведення свердловин під час інтенсивної роботи в товщі на глибинах більше 350 м перевищує витрати на місцеві підготовчі роботи та постійно збільшуються зі збільшенням глибини видобутку.

Зі збільшенням вартості управління газом в умовах інтенсивного розвитку запасів, правильний відбір параметрів технологічних схем дегазації та відокремленого відбору газу необхідна, технічна можливість впровадження якого в основному залежить від прийняті параметри підготовки районів видобутку. Крім того, вибір методів управління газом у умовах глибоких шахт обмежується тенденцією до 70% спонтанного утворення, під час розробки яких використання схем вентиляції, методів дегазування виробленого простору. Ізольований відбір, що передбачає рух повітря у всьому виробленому просторі або значну його частину.

Проблеми з розробки газових вугільних пластів та управління вибухом газу в районах видобутку обговорюються в творах Казаніна О.І., Каледіна Н.О., Качуріна Н.М., Колікова К.С., Коршунова Г. І., Мелік В.В. Myasnikova A.A.,

Puchkova L.A., Ruban A.D., Slustunova S.V., Shuvalova Yu.V. та інші. Відповідно до результатів дослідження. У той же час, в умовах зростання інтенсивності розвитку місць видобутку і збільшення їх геометричних параметрів (збільшуючи довжини стовпів, довжини лав та потужності, перетворені в один шар), невідповідність фактичних та прогнозованих (використання дійсних документів) параметрів вибуху газу при розробці родовища призводить до загазовуванню виробок, додаткових простоїв, що не дозволяє реалізувати потенціал сучасних механізованих комплексів. Все вищезазначене заздалегідь визначає актуальність питань обґрунтування параметрів технологічних схем інтенсивного розвитку пітні газоносних пластів вугілля, схильних до раптового загоряння.

Мета роботи. Підвищення ефективності дегазації під час розробки потужних газоносних пластів, родовищ що розробляють пласти на глибоких горизонтах.

Ідея роботи. Ефективність робочих потужних пологих газових пластів, схильних до раптового згоряння, забезпечується за допомогою сучасних заходів у поєднанні з дегазацією та ізолюванням розподілом метан повітряної суміші, параметри яких визначаються на основі чисельного моделювання аерогозодинамічних процесів в межах видобутку.

Основні завдання досліджень:

1. Аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду зняття обмеження навантаження на очисні вибої за газовим фактором при інтенсивній розробці схильних до самозаймання газоносних вугільних пластів.

2. Шахтні дослідження впливу параметрів схем підготовки, відпрацювання та управління газовиділенням на виїмкових ділянках на ефективність управління газовиділенням з метою зниження (повного зняття) обмежень навантаження на очисні вибої за газовим фактором.

3. Численні дослідження впливу параметрів підготовки та відпрацювання виїмкових ділянок, схем дегазації та ізолюваного відведення на гранично допустиме навантаження на очисний вибій за газовим фактором.

4. Розробка рекомендацій щодо визначення оптимальних параметрів схем підготовки, дегазації виробленого простору та ізольованого відведення метаноповітряної суміші при інтенсивному відпрацюванні схильних до самозаймання потужних газоносних вугільних пластів.

5. Визначення галузі раціонального застосування та оцінка економічної ефективності розроблених рекомендацій.

РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ. ЦІЛІ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз світового досвіду інтенсивного відпрацювання світ газоносних вугільних пластів.

Найвищі показники інтенсивності відпрацювання пологих вугільних пластів, як свідчить світова практика, досягаються при роботі довгих очисних вибоїв. При цьому основною системою розробки слід вважати систему розробки довгими стовпами простягання (стовпову) з залишенням міжлавних ціликів, оскільки безцеликова система розробки не дозволяє забезпечити високих навантажень на очисні вибої і є потенційно небезпечною як по газовому фактору, так і по фактору ендегенна пожежна небезпека].

Слід також відзначити той факт, що впровадження сучасної високопродуктивної техніки та підвищення інтенсивності відпрацювання запасів зумовило суттєву зміну параметрів виїмкових ділянок: довжини лави та довжини виїмкових стовпів – до 300-500 м та 3000-7000 м відповідно. Крім того, зростання навантажень на очисні вибої та швидкостей просування лав зумовило підвищення інтенсифікації геомеханічних та газодинамічних процесів [7, 4, 10].

Характерною особливістю інтенсивного відпрацювання газоносних вугільних пластів є висока газорясність виїмкових ділянок, що зумовлює необхідність пошуку та впровадження ефективних рішень щодо управління газовиділенням.

Одним із перспективних напрямів забезпечення безпеки підземної розробки газоносних пластів є їх завчасна дегазація [1, 2, 4, 5, 8, 10], проте низька проникність масиву поза зонами впливу гірських робіт не дозволяє забезпечити її ефективність та обумовлює її застосування лише у вигляді окремих пілотних проектів або у специфічних умовах.

Недостатній рівень вирішення проблеми управління газовиділенням в умовах погіршення гірничо-геологічних умов та зростання навантажень на

очисні забої є однією з причин підвищеної аварійності ведення гірничих робіт при інтенсивному відпрацюванні газonosних вугільних пластів [13-18].

Характерною особливістю відпрацювання світ газonosних вугільних пластів є переважання газовиділення з виробленого простору, що формується газовиділенням з підроблюваної і надроблюваної частин вуглепородного масиву, над газовиділенням з пласта, що розробляється [4, 5, 23-25]. Враховуючи, що можливості вентиляції визначаються можливістю розведення метаноповітряних сумішей до вибухобезпечних концентрацій і обмежуються гранично допустимими швидкостями руху повітря в привибійному просторі і фактичним перерізом лави, вільним для проходу повітря, що визначається конструктивними особливостями застосовуваного механізованого кріплення і потужністю, що виймається потужністю пласта запасів в умовах підвищеної газорясності виїмкових ділянок слід вважати підвищення ефективності газовиділення за рахунок застосування різних схем дегазації виробленого простору та ізолюваного відведення метаноповітряної суміші.

Різні гірничо-геологічні та гірничотехнічні умови вугільних басейнів світу сприяли розвитку різних способів дегазації. Традиційно методи дегазації в Росії поділяються на завчасну (до початку гірничих робіт), попередню (до початку очисних робіт) та поточну (після початку гірничих робіт у зонах розвантаження). У зарубіжній практиці виділяють два види дегазації: попередня (pre-mine drainage) – до очисних робіт та наступна (post-mine drainage) – після очисних робіт.

Слід зазначити, що у світовій практиці прийнято наступні уявлення газорясності за різної інтенсивності відпрацювання світ газonosних вугільних пластів у шахті (таблиця 1.3). Як видно з таблиці 1,2 інтенсивність відпрацювання запасів з урахуванням умов (природної газonosності пластів) визначають газорясність виїмкової ділянки та тип її газорясності.

Таблиця 1.3 – Класифікація виїмкових ділянок газорясності

Річна виробнича потужність лави, млн т/рік	Газорясність, м ³ /хв						
	Природна газорясність пластів, м ³ /т						
	1	5	10	15	20	25	30
3	6	36	78	114	150	186	228
5	12	60	126	186	252	312	378
7	18	90	174	264	354	438	528
9	24	114	228	342	450	564	678
	<i>звичайні</i>			<i>газорясні</i>		<i>високогазорясні</i>	

Слід зазначити, що відповідно до розглянутої класифікації виїмкові ділянки відпрацьовують запаси потужних газоносних вугільних пластів 120 м³/хв; інтенсивність відпрацювання пласта 50 за винятком тривалих простоїв, які в даний час досягають 6 місяців і більше, може становити 9 млн т/рік при газорясності 150 м³/хв.

Аналіз зарубіжного досвіду інтенсивного відпрацювання світ газоносних вугільних пластів показує, що вибір схеми дегазації та її параметрів визначається обсягами газовиділення на ділянці виїмки.

Як характерні приклади розглянемо окремі випадки з досвіду інтенсивного відпрацювання світ газоносних вугільних пластів в Австралії.

До умов середньої газорясності відносяться шахти з дільницями, що відпрацьовують почти вугільних пластів з природною газоносністю до 8 м³/т [11]. Як приклад відпрацювання таких пластів розглянемо відпрацювання пласта Woodlands Hill потужністю 3,1 м, на глибині 1015-1275 м, природна газоносність від 3 до 8 м³/т (поступово знижуючись у межах від'ємних стовпах, що відпрацьовуються по повстанню) [11]. Вище та нижче пласта залягають інші пласти, сумарною потужністю до 20 м (рисунок 1.7), створюючи значні потенційні обсяги газовиділення при підробітку (надробітку) до 60 м³/м². Попередня дегазація на шахті не проводиться.

Газообильність виїмкових ділянок у умовах досягає 180 м³/хв при середніх навантаженнях на очисний забій близько 15 тис тонн/сут.

Аналіз взаємозв'язку інтенсивності відпрацювання запасів і газорясності (представленої на малюнку 1.8) дозволяє зробити висновок про значний вклад у загальну газорясність виїмкової ділянки виробленого простору, а також про несуттєвий вплив простоїв на газорясність лави і газоряпність виробленого простору в умовах розвитку обвалення покрівлі та повного розвитку зон повних обвалень та інтенсивної тріщинуватості).

В умовах середньої газоносності розроблюваних пластів аналіз досвіду інтенсивної відпрацювання запасів показує можливість застосування лише одного виду дегазації – дегазації виробленого простору для успішного управління газовиділенням на виїмковій ділянці. Однак, значні обсяги метану, що виділяється, вимагають застосування відповідних параметрів дегазації.

В умовах інтенсивного відпрацювання світ газоносних пластів при високій природній газоносності пластів, що розробляються ($15-30 \text{ м}^3/\text{т}$), як правило, застосовується комплексна дегазація, що включає як попередню, так і поточну дегазацію різних джерел.

На малюнку 1.9 представлена схема управління газовиділенням при відпрацюванні пласта потужністю 2,8 м лавами довжиною 300 м (довжина стовпа 3,6 км) з інтенсивністю близько 450-500 тис тонн на місяць, що включає як завчасну дегазацію похило-горизонтальними свердловинами, пробуреними поверхні, попередню дегазацію пласта, що розробляється, так і поточну дегазацію виробленого простору вертикальними свердловинами, пробуреними з земної поверхні.

Висока газорясність виїмкових ділянок у даних умовах визначає необхідність підготовки з використанням будовених виробок, для забезпечення ефективного управління газовиділенням. З початком ведення гірничих робіт було встановлено, що газовиділення зі зближених пластів може сягати $30 \text{ м}^3/\text{т}$ добового видобутку.

У міру відпрацювання запасів виїмкових стовпів обсяги метану, що видаляються засобами вентиляції та дегазації виробленого простору зростали,

досягаючи при відпрацюванні 1-го стовпа виїмкового 120 м³/хв, 2-го - 270 м³/хв, і 360 м³/хв при відпрацюванні 3-го та 4-го виїмкових стовпів.

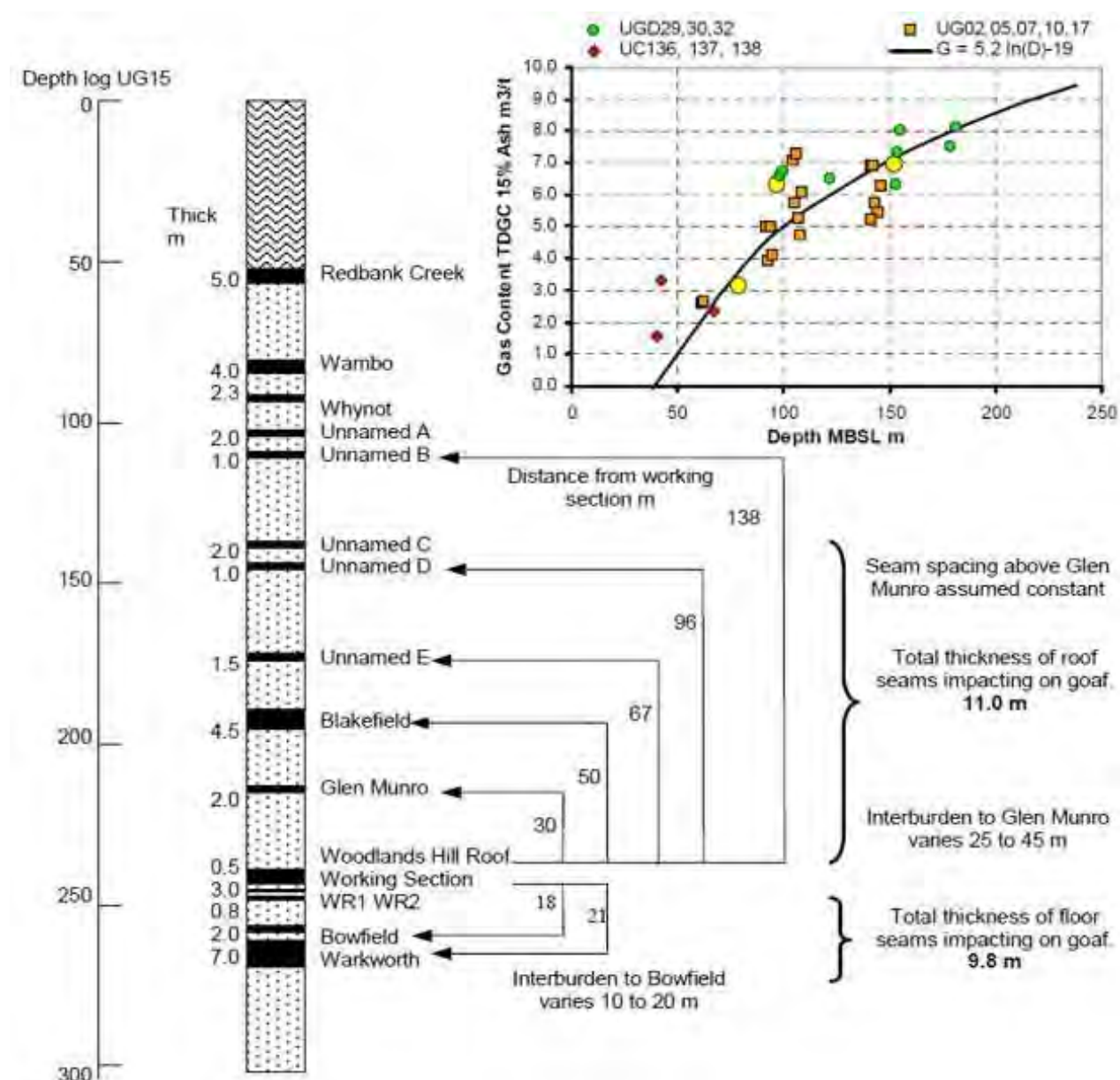


Рис. 1.7 – Стратиграфічна колонка за пластом Woodlands Hill та графік залежності газорясності від глибини [11]

На рис. 1.9 представлена схема управління газовиділенням при відпрацюванні пласта потужністю 2,8 м лавами довжиною 300 м (довжина стовпа 3,6 км) з інтенсивністю близько 450-500 тис тонн на місяць, що включає як завчасну дегазацію похило-горизонтальними свердловинами, пробуреними поверхні, попередню дегазацію пласта, що розробляється, так і поточну дегазацію виробленого простору вертикальними свердловинами, пробуреними з земної поверхні.

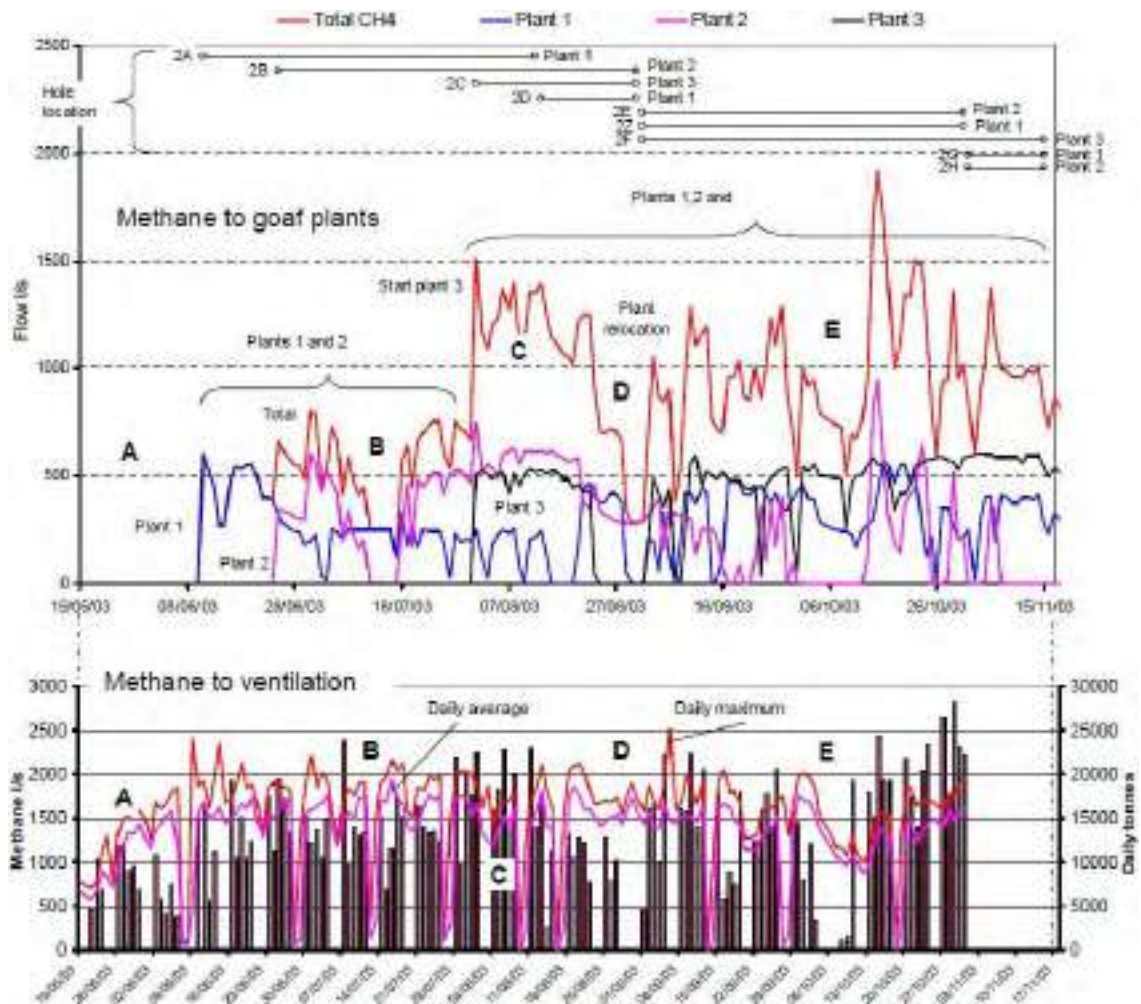


Рис. 1.8 – Взаємозв'язок інтенсивності відпрацювання та газообильності виїмкової ділянки (виробленого простору та лави) [11]

Висока газорясність виїмкових ділянок у даних умовах визначає необхідність підготовки з використанням виробок, для забезпечення ефективного управління газовиділенням. З початком ведення гірничих робіт було встановлено, що газовиділення зі зближених пластів може сягати 30 м³/т добового видобутку.

У міру відпрацювання запасів виїмкових стовпів обсяги метану, що видаляються засобами вентиляції та дегазації виробленого простору зростали, досягаючи при відпрацюванні 1-го стовпа виїмкового 120 м³/хв, 2-го - 270 м³/хв, і 360 м³/хв при відпрацюванні 3-го та 4-го виїмкових стовпів.

Таким чином питома газорясність виїмкової ділянки склала 32 м³/т. Характерною особливістю газовиділення була наявність різких підвищень газообильності, що перевищують середньодобові значення в 1,5-2 рази (рис.

1.10), що висуває високі вимоги до надійності та стійкості газоправління в умовах високої нерівномірності газовиділення.

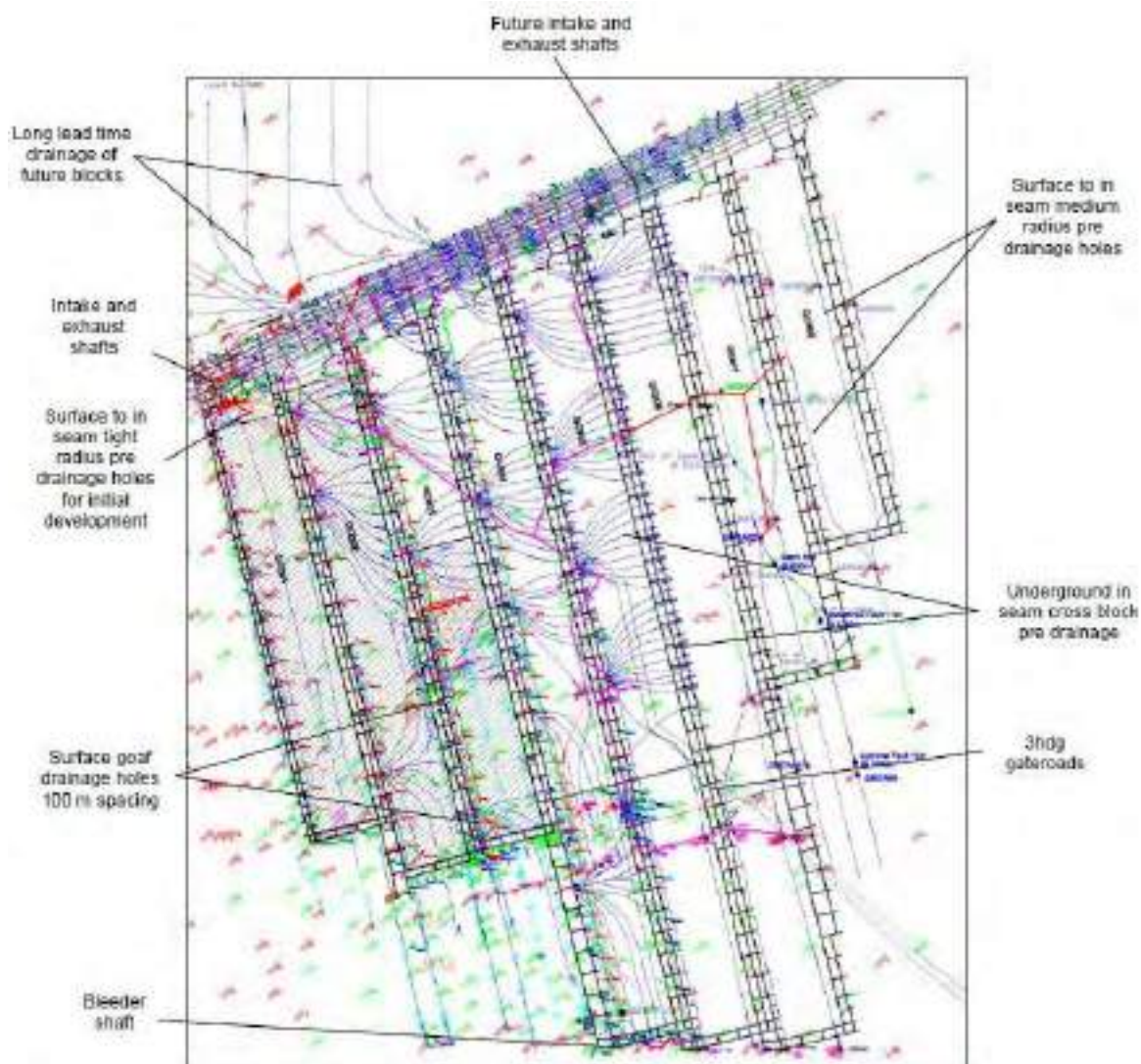


Рис 1.9 – Схема комплексного управління газовиділенням [18]

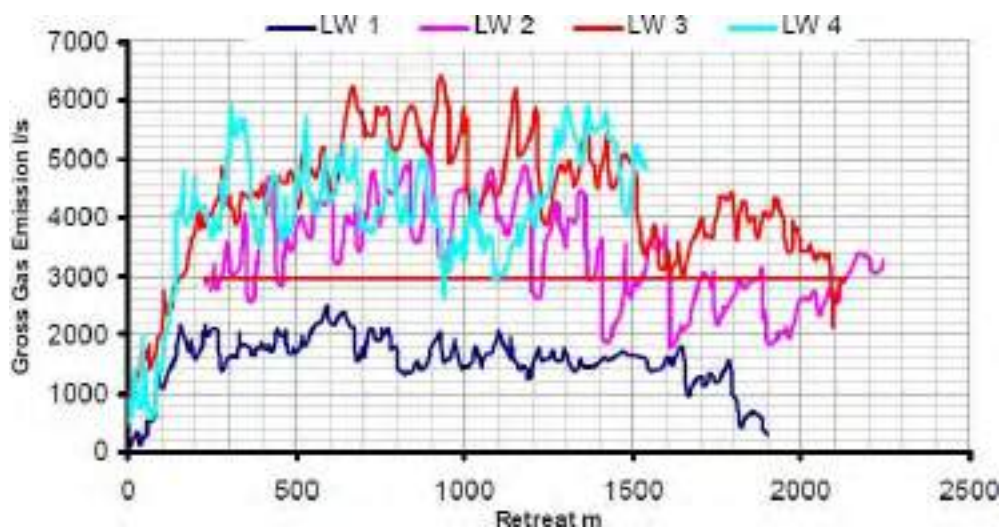


Рис. 1.10 – Динаміка газообильності виїмкової ділянки у міру поруху лави

Таким чином питома газорясність виїмкової ділянки склала $32 \text{ м}^3/\text{т}$. Характерною особливістю газовиділення була наявність різких підвищень газообильності, що перевищують середньодобові значення в 1,5-2 рази (рисунок 1.10), що висуває високі вимоги до надійності та стійкості газоправління в умовах високої нерівномірності газовиділення.

В умовах високої газорясності вироблених просторів добре себе зарекомендувала схема дегазації з використанням вертикальних дегазаційних свердловин діаметром 250 мм, пробурених з земної поверхні, що розташовуються в один ряд уздовж вентиляційної виробки на відстані 100 м. Концентрація метану в цих свердловинах становила в середньому 80% окремі моменти – понад 90%.

Аналіз досвіду застосування дегазації у США показав, що попередня дегазація вертикальними свердловинами, пробуреними із земної поверхні, у 2008 році застосовувалася лише на 6 шахтах, поточна дегазація виробленого простору вертикальними свердловинами, пробуреними із земної поверхні – на 23 шахтах, попередня дегазація пласта, що розробляється - на 9 шахтах; дегазація похилими свердловинами, пробуреними з гірських виробок – не застосовувалася.

Практичний інтерес представляє спосіб дегазації виробленого простору з використанням газодренажного вироблення (рисунок 1.11), що розташовується в товщі, що підробляється. Газодренажна вироблення розташовується на відстані 20-60 м від пласта, що розробляється (в зоні інтенсивної тріщинуватості), в 10-30 м від вентиляційного вироблення. Цей спосіб успішно застосовувався на ряді шахт Китаю.

Аналіз зарубіжного досвіду показав, що газобільність кожної подальшої виїмкової ділянки, що відпрацьовується, в шахтному полі зростає. На малюнку 1.12 представлені дані про характерну динаміку газорясності виїмкових ділянок при середньому навантаженні на довгий очисний вибій (300 м) 5 млн т/рік при газоряби виробленого простору 50%. У міру відпрацювання виїмкових ділянок газоносність пласта підвищувалася з 4 до $6,25 \text{ м}^3/\text{т}$, а газорясність становила від 90 до $160 \text{ м}^3/\text{хв}$.

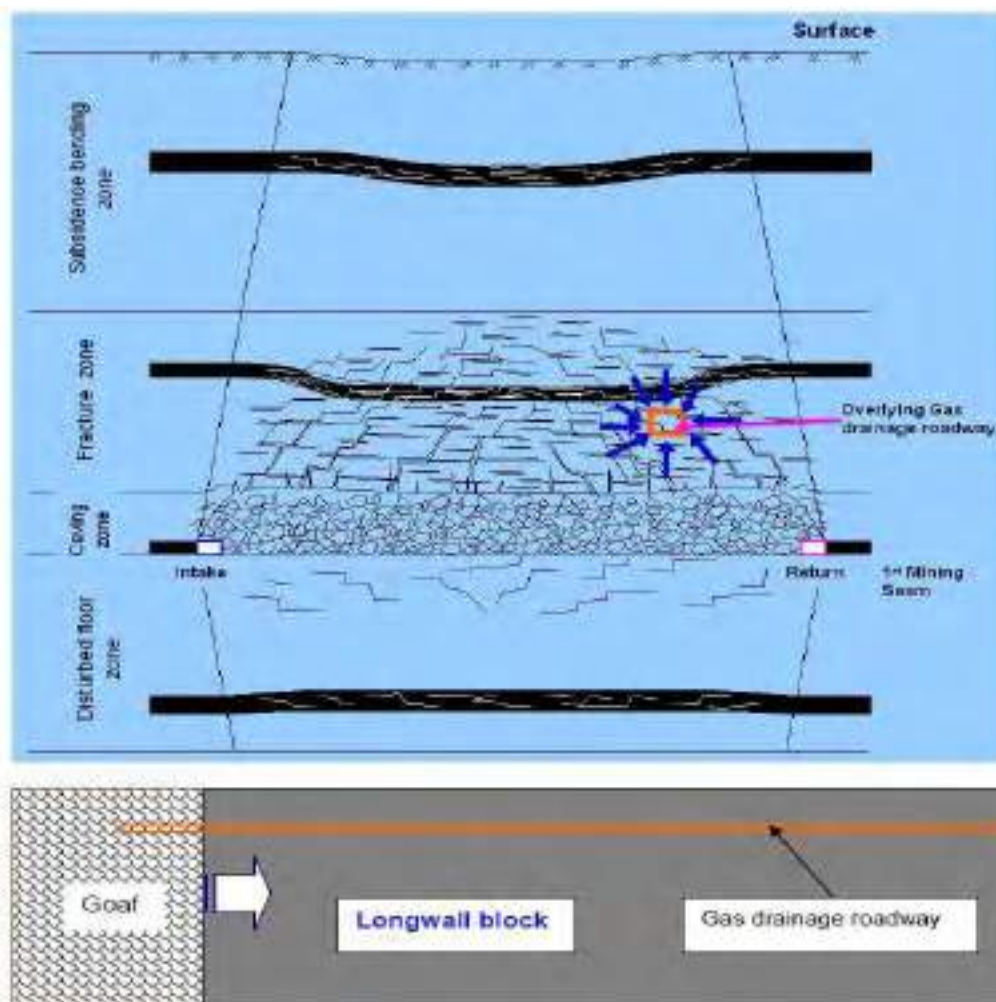


Рис 1.11 -Дегазація виробленого простору з використанням газодренажного вироблення (Китай) [13]

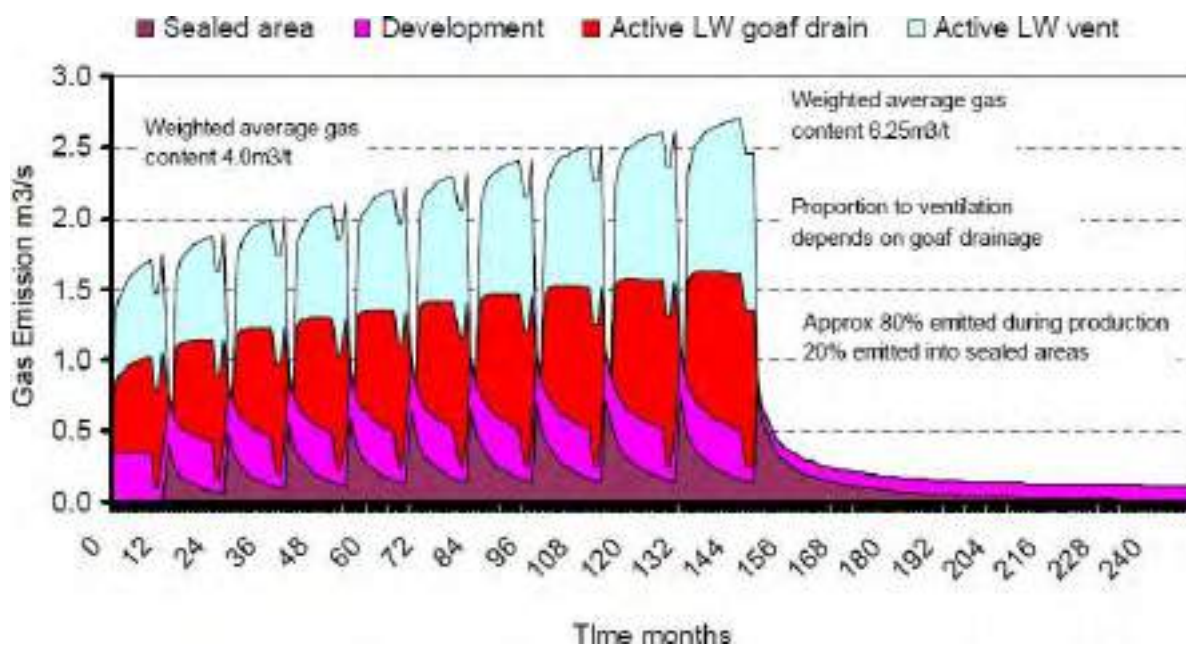


Рис. 1.12 – Динаміка газорясності виїмкових ділянок протягом життєвого циклу шахти

На рис. 1.13 представлені основні способи дегазації виробленого простору, що застосовуються у світовій практиці, а таблиці 1.4 представлений їх короткий порівняльний аналіз.

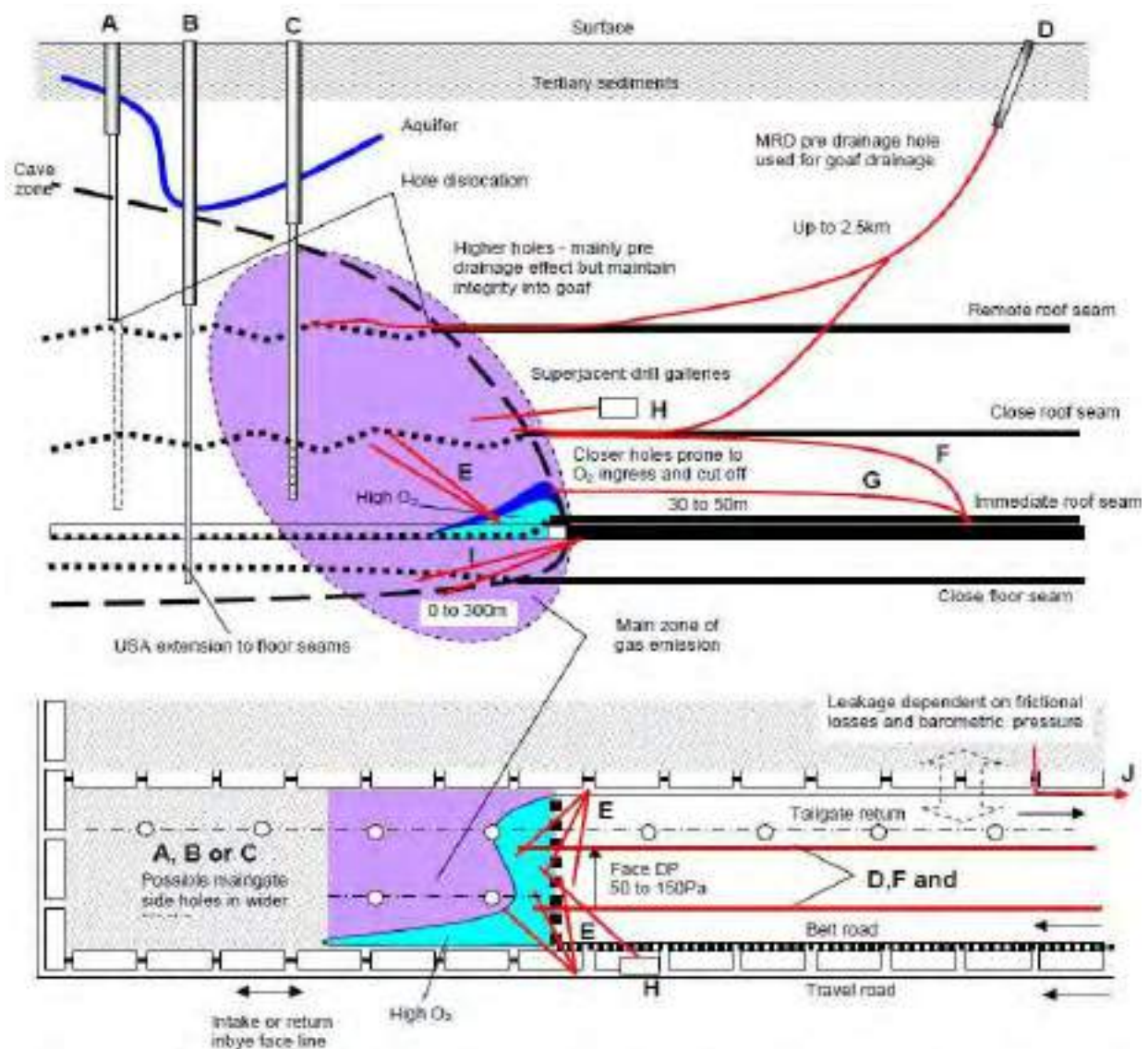


Рис 1.13 – Способи дегазації виробленого простору [12]: А – вертикальними свердловинами з поверхні в зону метанових газів; В - вертикальними свердловинами з поверхні в зону впливу надробітку (розвантаження); С - вертикальними свердловинами з поверхні в зону інтенсивної тріщинуватості; D – спрямованим бурінням з поверхні на надроблювані пласти (у напрямку, паралельному подвигу лави); Е-Похилими свердловинами з підземних гірничих виробок у покрівлю пласта; F - Спрямованими свердловинами з підземних гірничих виробок на пласти супутники (у напрямку, паралельному поруху пласта); G - спрямованими свердловинами у вироблений простір (у напрямку, паралельному поруху пласта); H - свердловини з дренажної виробки, пройденої в покрівлі пласта; I - Похилими свердловинами, пробуреними з дільничних виробок у ґрунт пласту (дегазація надроблюваної товщі); J - Дегазаційними трубопроводами, заведеними за перемичку у вироблений простір

Оцінка економічної ефективності дегазаційних схем, що застосовуються у світовій практиці

Рівень витрат на дегазаційні роботи залежить від низки факторів (вартість обладнання, експлуатаційні витрати, трудовитрати, доступ до земельного відведення - оренда або придбання землі), і варіюються істотно як різних країнах, так і в межах однієї країни. Ця різниця у вартості обумовлена насамперед гірничо-геологічними та гірничотехнічними умовами і тому узагальнення неминуче призводить до вказівки витрат у широких діапазонах.

Таблиця 1.5 представляє узагальнену вартісну оцінку способів дегазації у розрахунку тонну видобутого вугілля (ціни 2009 року). Умови, для яких зроблено розрахунки: пласт потужністю 3 м, що розробляється лавою довжиною 250 м при довжині стовпа виїмкового 2000 м, що залягає на глибині 600 м, навантаження на очисний вибій до 2 млн. тонн (за даними з Китаю і Австралії) [16] .

Таблиця 1.5 - Питома вартість дегазації (у доларах США, 2009)

Спосіб дегазації	Базова технологія	Основні елементи витрат	Основні змінні витрати	Питомі витрати US \$/тонну
Підземна попередня дегазація	Спрямовані довгі свердловини по пласту з випередженням довжині стовпа	Буріння та обладнання	Діаметр та довжина свердловин	от 0,4 до 3,2
	Свердловини через ділянку	Буріння та обладнання	Діаметр та довжина свердловин	от 0,6 до 4
Поверхнева попередня дегазація	Вертикальні свердловини із гідророзривом пласта	Буріння, обсадні труби, гідророзрив, ізоляція	Глибина буріння та кількість пластів	от 1,2 до 9,6
	Вертикальні свердловини з множинними відгалуженнями	Буріння, обсадні труби, спрямоване низхідне буріння, гідророзрив, ізоляція	Глибина буріння та загальна довжина відгалуженої свердловини по пласту	от 1,0 до 8,0
	Похилі свердловини з існуючих виробок	Буріння та обладнання	Діаметр та довжина свердловин	от 0,1 до 1,6

Підземна поточна дегазація	Газодренажні виробки	Проведення додаткового виробок	Відстань до пласта, що розробляється, і розміри вироблення	от 0,3 до 11,2
	Горизонтальні свердловини на пласти супутники	Буріння та обладнання для спрямованого буріння	Проблеми буріння з радіусів повороту	от 0,5 до 4
Поверхнева дегазація з поверхні	Свердловини у вироблений простір	Буріння, обсадка, тампонування.	Глибина	от 1,4 до 15,2

Слід зазначити, що зі збільшенням глибини ведення гірничих робіт велику економічну ефективність набувають способи підземної дегазації. При відпрацюванні світ високогазоносних пластів може знадобитися комбінація різних способів дегазації для досягнення високих навантажень на очисні вибої та забезпечення безпеки ведення робіт. Витрати дегазацію зростають зі складністю геологічних умов. Система дегазації повинна мати високу надійність і мати запас стійкості для виключення критичного впливу на безпеку робіт при руйнуванні окремої свердловини або вироблення. Найбільш ймовірний діапазон витрат на витяг 1 м³ метану становить від 0,06 до 0,24 \$ USA [16].

1.3 Оцінка ефективності застосовуваних технологічних схем відпрацювання світ газоносних вугільних пластів

При відпрацюванні потужних газоносних вугільних пластів застосовується система розробки довгими стовпами з керуванням покрівлею повним обваленням. Одним із основних параметрів стовпової системи розробки є довжина лави. В умовах глибоких шахт довжина лави поступово підвищувалася, досягнувши після об'єднання.

Відпрацювання світ газоносних вугільних пластів вимагає вибору та застосування ефективних схем управління газовиділенням на виїмкових ділянках. У міру розвитку гірничих робіт на шахтах «Котинська» та «№7» та підвищення з глибиною газорясності виїмкових ділянок відбувалася поступово

зміна схем управління газовиділенням, що застосовуються, а також їх параметрів.

Відпрацювання запасів виїмкових ділянок (рис. 1.15) здійснювалася в зоні газового вивітрювання і ускладнювалася лише малою глибиною ведення гірських робіт та наявністю пухких порід, що сприяло значному водопритоку з земної поверхні та зумовлювало низьку стійкість покрівлі при веденні. Відпрацювання наступних виїмкових ділянок супроводжувалося підвищенням газоряби виїмкової ділянки.

Відробіток виїмкової ділянки характеризувався обсягом метановиділення у виробленому просторі 20-43 м³/хв при середніх значеннях 30 м³/хв. При цьому середня концентрація метану на лаві, що виходить, становила від 0,2 до 0,4%. Таким чином, при відпрацюванні запасів на глибинах до 250 м і природної газоносності пласту, що розробляється, до 9 м³/т обмеження навантажень на очисний вибій по газовому фактору були відсутні.

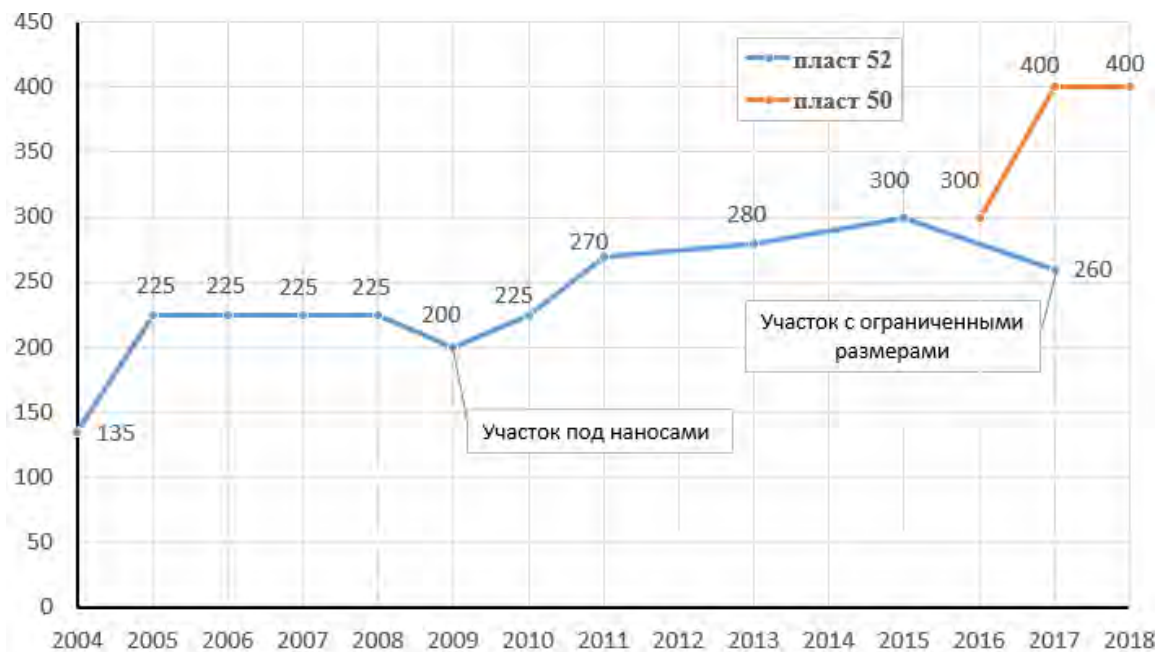


Рис. 1.14 – Динаміка зміни довжини лави під час відпрацювання потужних газоносних пластів

Інтенсивне відпрацювання виїмкової ділянки з навантаженнями до 2000 - 2500 т/добу в умовах природної газоносності пласта 9 м³/т, що здійснюється із

застосуванням одного ряду дегазаційних свердловин характеризується збільшенням газообильності виїмкової ділянки до $140 \text{ м}^3/\text{хв}$ (рис. 1).

На малюнку 1.17 представлені дані про вплив навантаження на очисний вибій на концентрацію метану на лаві, що виходить. Як видно з рисунку 1.18 при загальній тенденції до збільшення концентрації зі зростанням навантажень є значний розкид значень концентрацій для кожного рівня інтенсивності ведення очисних робіт.

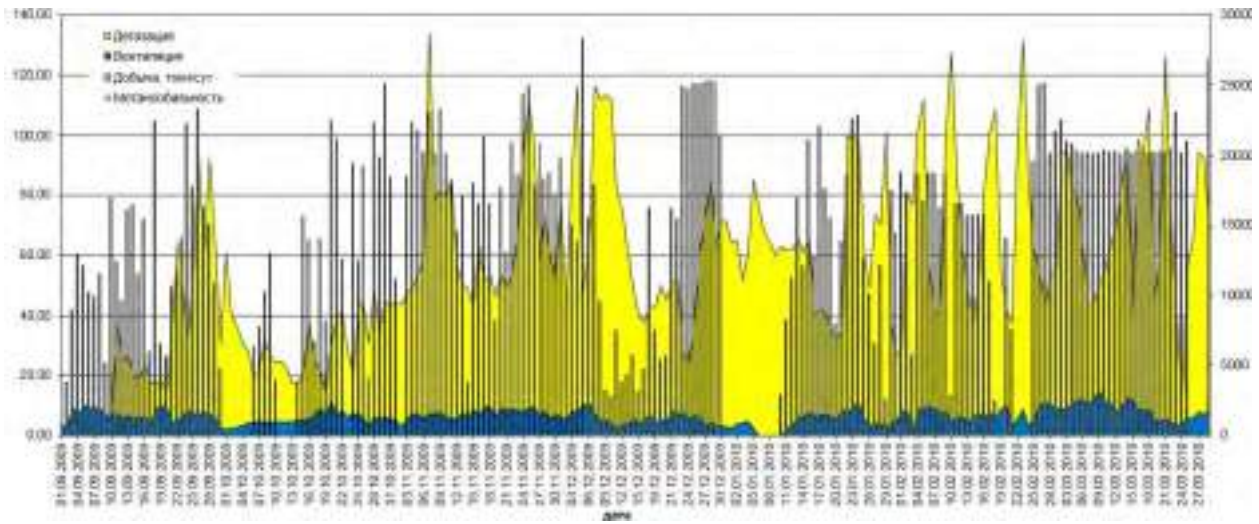


Рис. 1.16 – Динаміка навантажень на очисний вибій та абсолютної метанообильності очисного вибою

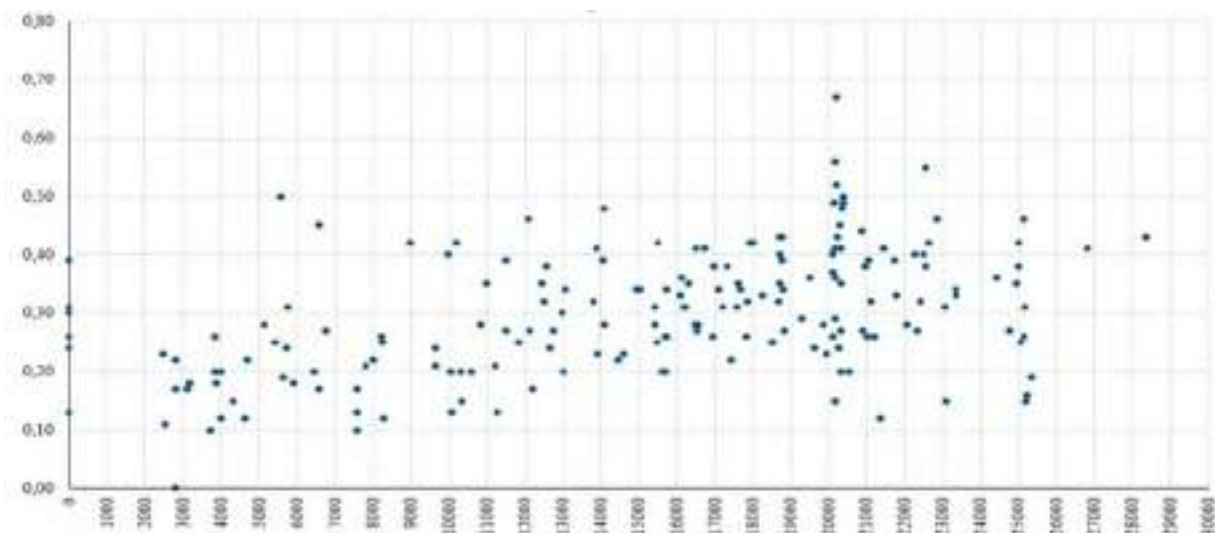


Рис. 1.17 – Вплив навантаження на очисний вибій на концентрацію метану на лаві, що виходить.

Так, наприклад, при навантаженні 2000 тон/доб концентрація метану на вихідній може становити від 0,15 до 0,68%, при середніх значеннях 0,41%, що також свідчить про визначальну роль газовиділення з виробленого простору.

Разом з тим з метою збільшення навантажень на очисний забій в умовах зростаючої природної газоносності пласта, що розробляється при відпрацюванні запасів виїмкового стовпа була вперше застосована комплексна дегазація, що включає:

- попередню дегазацію пласта, що розробляється пластовими свердловинами;
- дегазація виробленого простору вертикальними свердловинами, що пробурені з земної поверхні;
- дегазація (ізолюваний відвід) виробленого простору через свердловини, пробурені з паралельного виробітку через цілик;
- Дегазація виробленого простору через перемички.

Необхідність застосування комплексної дегазації і зокрема дегазації пласта, що розробляється, для забезпечення безпеки інтенсивного відпрацювання газоносних вугільних пластів підкреслювалася цілим рядом авторів [1, 37, 38].

Вартові параметри застосованої комплексної дегазації представлені у таблиці 1.6. Як очевидно з таблиці 1.6 близько 50% всіх витрат за комплексну дегазацію посідає буріння із земної поверхні вертикальних дегазаційних свердловин. Водночас частку дегазації свердловинами, пробуреними із земної поверхні, припадає 36,5 % всього віддаленого метану (рис. 1.18).

Витрати на проведення попередньої дегазації свердловинами, пробуреними по пласту, що розробляється, становлять 37,6 млн рублів (14% всіх витрат на дегазацію), а її частка в загальному балансі метану становить 6,44%.

Аналіз показників застосування комплексної дегазації показав низьку ефективність застосування попередньої дегазації пласта, що розробляється, і

оскільки засобами вентиляції при збільшенні витрати на виїмкову ділянку успішно забезпечувалося ефективне розведення метану, що виділяється з пласта, що розробляється, то дегазація пласта, що розробляється.



Рис. 1.18 – Структура газового балансу виїмкової ділянки

У таблиці 1.7 представлені дані про обсяги метану, що видаляється засобами вентиляції та дегазації при відпрацюванні запасів стовпа.

Аналіз даних, поданих у таблиці 1.8, дозволив побудувати залежність віддалених обсягів метану від середнього місячного видобутку (рис. 1.20). З рис. 1.19 видно, що обсяги метану, що видаляється, прямо пропорційні видобутку вугілля. Також прямо пропорційна обсягу видобутку концентрація метану на струмені, що виходить з лави (рис. 1.20).

Таблица 1.7 – Объемы метана, удаляемые различными способами

Об'єм видаленого метану, м ³	Способы удаления						Загальний об'єм
	Вентиляция	Пластовая дегазация	Поверхневые скважины	Поверхневые скважины (верхний ряд)	Сбросовая дегазация	Дегазация через перемычки	
Всього видалено	6 873 983	6 609 300	24 544 429	35 685 368	22 543 314	66 752 020	163 008 414
Частка в загальному об'ємі видаленого метану	4,2%	4,1%	15,1%	21,9%	13,8%	41,0%	100%

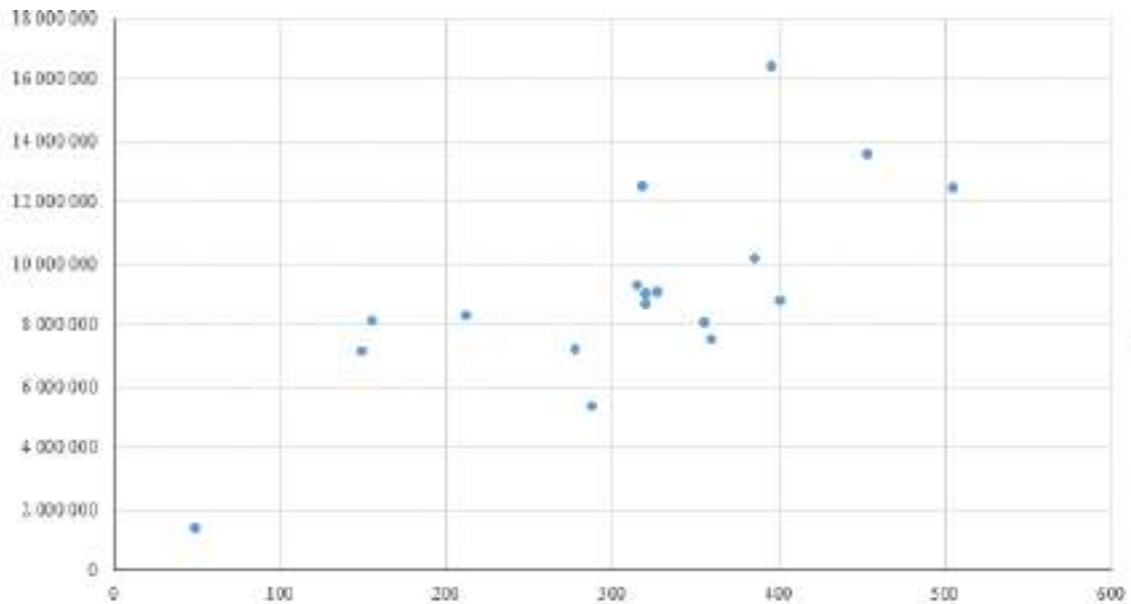


Рис. 1.19 – Взаємозв'язок обсягів видобутку на ділянці виїмки і метану, що видаляється.

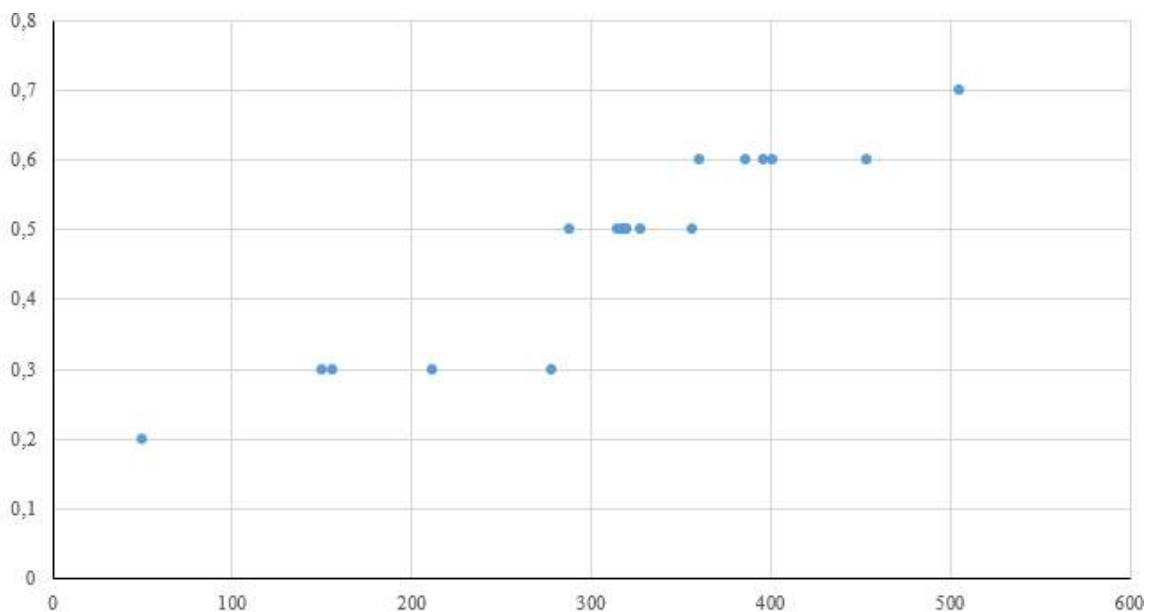


Рис. 1.20 – Взаємозв'язок обсягів видобутку на виїмковій ділянці та концентрації метану на лаві, що виходить.

Виконаний аналіз даних таблиці 1.7 дозволяє зробити висновок наявності істотного резерву можливостей вентиляції. При досягненні місячної продуктивності лави 500 тис тонн можливості вентиляції з витратою 2050 м³/хв при середній концентрації 0,7% фактично вичерпані, проте є резерв зі

збільшення середньої витрати повітря у лаві до 2300 м³/хв з відповідним зростанням на лаві, що виходить (с врахуванням частини повітря, що рухається по виробленому простору). Також суттєвий резерв є у дегазації виробленого простору, який може бути реалізований за рахунок заміни використовуваної вакуум-насосної установки ВВН-50 більш продуктивну ВВН-150 (рисунок 1.21). Таким чином, є резерв для збільшення навантаження на лаву понад 500 тис. тонн на місяць.

Можливості забезпечення ефективного управління газовиділенням без проведення пластової дегазації – за рахунок збільшення середньої витрати повітря у лаві до 2250 м³/хв – підтверджуються роботою в аналогічних умовах лави (рисунок 1.22). На малюнку 1.22 представлені дані про взаємозв'язок місячного навантаження на очисній та концентрації метану на вихідній з лави у порівнянні з раніше розглянутими умовами виїмкової ділянки. Як видно з малюнка 5 збільшення витрати повітря забезпечує зниження концентрації на виході з лави без застосування дегазації пласта, що розробляється.

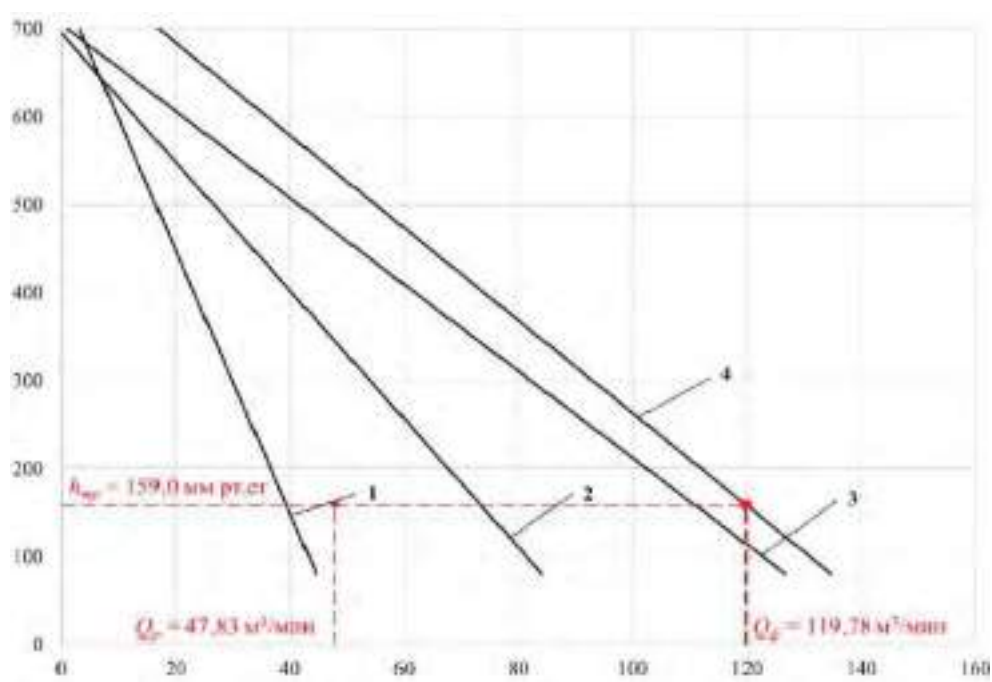


Рис. 1.21 - Аеродинамічні характеристики вакуум-насосних установок

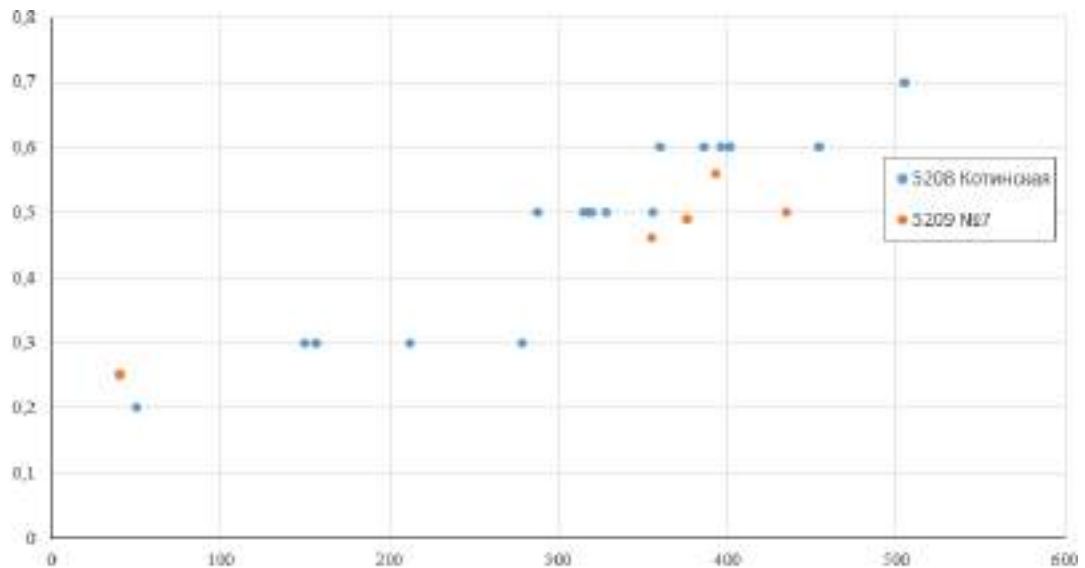


Рисунок 1.22 – Взаємозв'язок обсягів видобутку на виїмковій ділянці

Збільшення довжини лави при відпрацюванні виїмкової ділянки до 300 м призвело до суттєвого зростання газообильності виїмкової ділянки та зростання концентрації метану на вихідній ділянці виїмки і в кутку при вже раніше досягнутих навантаженнях на очисний вибій.

На рис. 1.23 представлені дані про вплив навантаження на очисний вибій на середню та максимальну концентрацію метану.

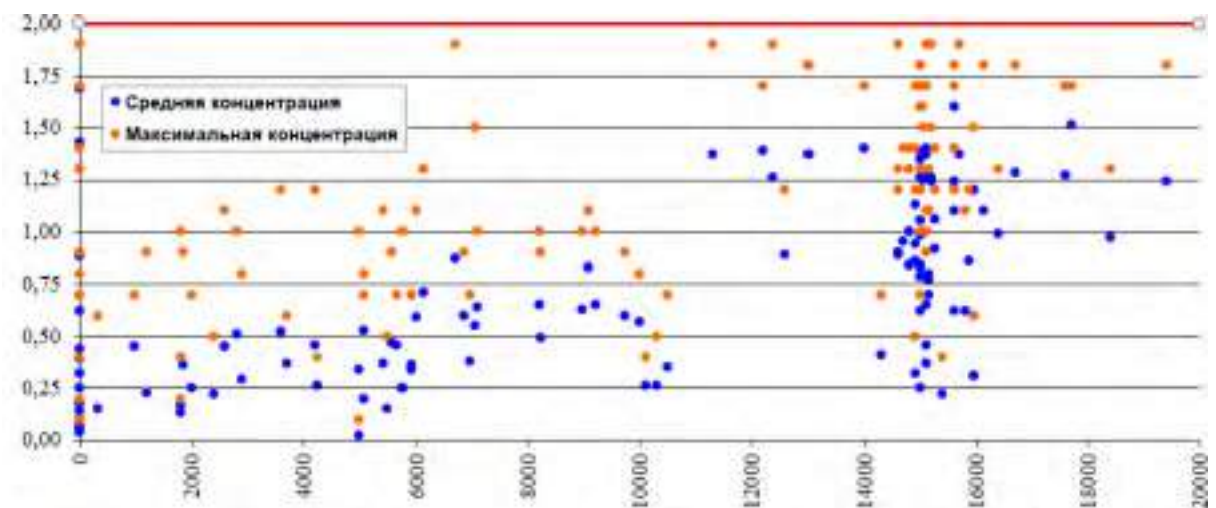


Рис. 1.23 – Взаємозв'язок навантаження на очисний вибій та концентрації метану

З рис. 1.20 видно, що середня і максимальна концентрації метану в діапазоні фактичних навантажень на лаву знаходиться в допустимих межах (1%), проте очевидно досягнуто межі навантаження на очисний вибій за газовим фактором і подальше збільшення навантажень буде пов'язане з підвищеною небезпекою загазування виробок.

Аналогічний висновок можна зробити за даними про концентрацію метану на лаві, що виходить (рис. 1.24). Граничне навантаження на очисний вибій у разі становить 15 тис. тонн.

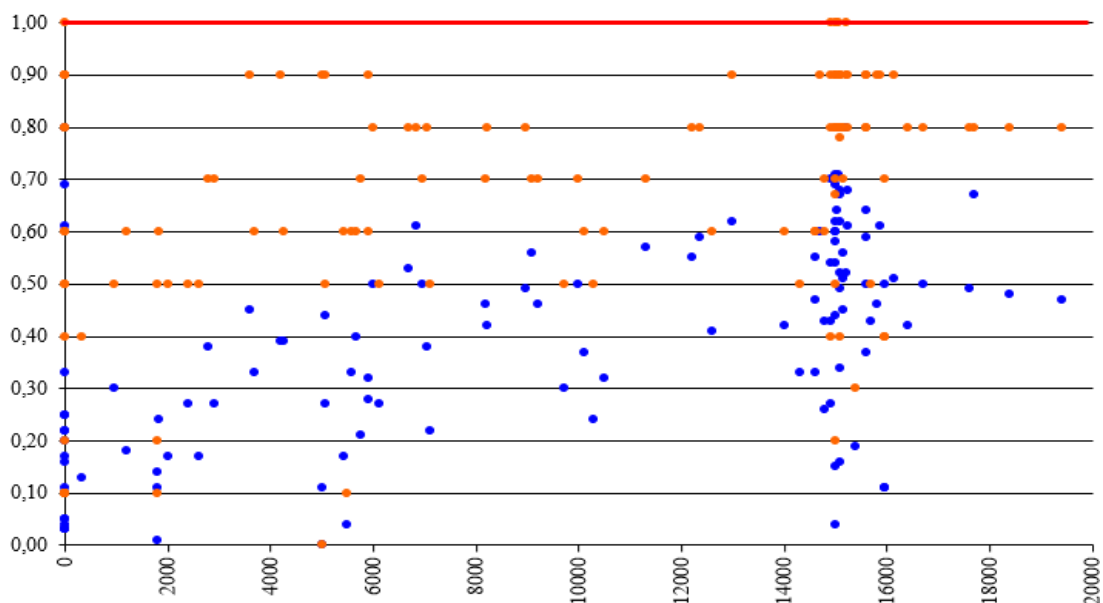


Рис. 1.24 – Вплив навантаження на очисний вибій на концентрацію метану

На нашу думку, зниження ефективності управління газовиділенням у даному випадку обумовлено недостатньою ефективністю ізолюваного відводу, який в ідеалі повинен забезпечити відведення всієї частини повітря, що рухається виробленим простором і недопущення його повернення на кінцевій ділянці лави. Загальне погіршення газової обстановки в лаві та поява вираженого газового бар'єру з граничним навантаженням 15000 т/добу обумовлено зростанням газообильності виробленого простору внаслідок збільшення довжини лави, так і вичерпанням можливостей ефективного ізолюваного відведення метаноповітряної суміші з використанням збійних дегазаційних свердловин, що підтверджується досягненням граничних значень (3,5%) концентрації метану в

газовідсмоктувальному трубопроводі. Таким чином, необхідною умовою забезпечення інтенсивного відпрацювання газоносних пластів при довжині лави 300 м і більше є забезпечення ефективного відведення відведення за рахунок збільшення витрати повітря.

Відомості про динаміку місячних навантажень очисний вибій при відпрацюванні запасів пласта містяться на рис. 1.25.

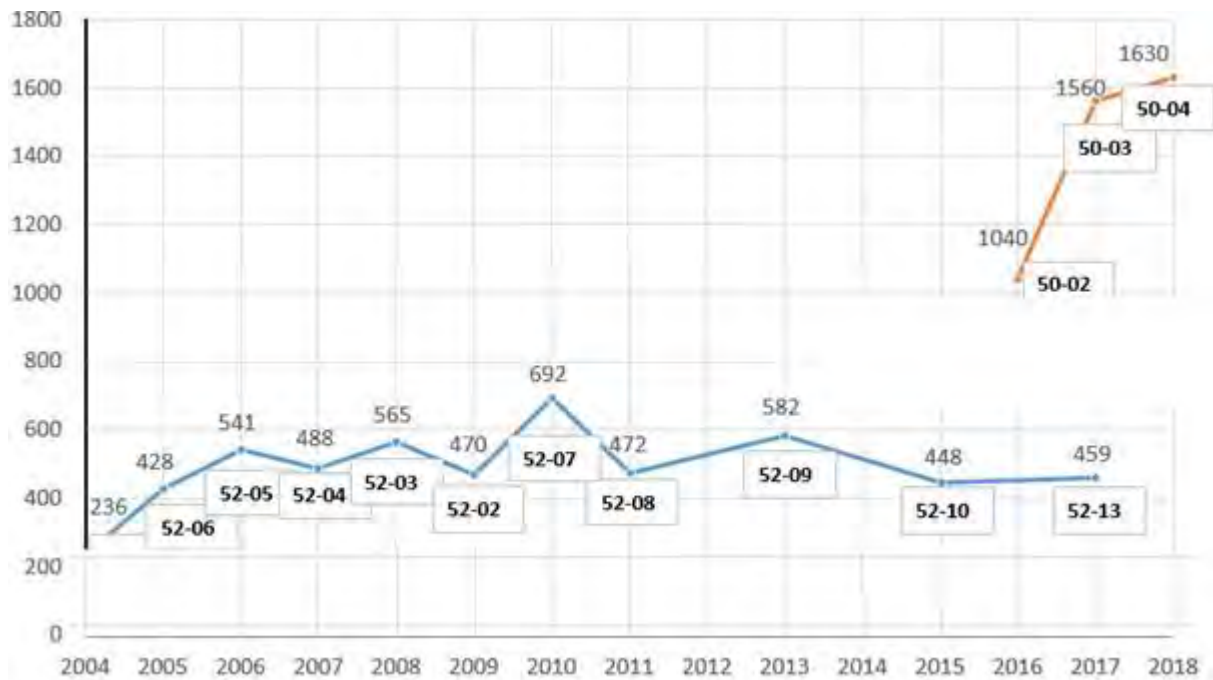


Рис. 1.25 – Динаміка зміни інтенсивності відпрацювання запасів виїмкових ділянок

Як видно з малюнка 1.25 спостерігається зниження інтенсивності відпрацювання запасів пласта 52 навіть з урахуванням підвищення у 2011 році потенційних можливостей очисного механізованого комплексу за рахунок зростання довжини лави до 270-300 м. На нашу думку, збільшення довжини лави призвело до збільшення площі активного газовиділення газорясності вироблених просторів.

Підвищення інтенсивності відпрацювання пласта 50 обумовлено як сприятливими за газовим фактором умовами ведення робіт (робота у зоні впливу підробітку пластом), так і застосуванням в цих умовах більш

високопродуктивного обладнання та більш досконалих схем газоправління, що дозволили суттєво підвищити ефективність ізолюваного відведення метаноповітряної суміші.

Висновки про можливість ефективного управління газовиділенням при інтенсивному відпрацюванні потужних пологих газоносних пластів в умовах глибоких шахт з навантаженнями до 500-600 тис. тон на місяць викладені автором у його роботі [5]. Разом з тим аналіз досвіду застосування комбінованої схеми провітрювання виїмкових ділянок з використанням дегазаційних свердловин, пробурених із земної поверхні, а також ізолюваного відведення метаноповітряної суміші показав наявність значної кількості варіантів її реалізації з різними параметрами як схеми дегазації, так і ізолюваного відведення, ефективність та вартість реалізації яких, зрештою, змінювалася у значному діапазоні навіть у межах однієї шахти [85]. На малюнку 1.26 представлені варіанти розташування вертикальних дегазаційних свердловин при відпрацюванні пласта.

Також у роботі [8] вказується, що: “основними варіантами розташування свердловин є: розташування рядів свердловин вздовж повітроподаючої та повітровідвідної виробок (рис. 1.26, А); вздовж відведення повітря і по центру виїмкового стовпа (рис. 1.27, В); вздовж відведення повітря (рис. 1.26, С); по центру стовпа виїмки. Крім різних схем розташування рядів варіанти відрізняються також відстанню ряду свердловин від відповідного вироблення (основні варіанти – зміщення ряду на 30 м або 70 м) та відстанню між дегазаційними свердловинами, яка становить від 40 до 80 м”.

Виконаний аналіз витрат на підготовку виїмкових ділянок та буріння дегазаційних свердловин в умовах глибоких шахт (таблиця 1.8) дозволив зробити висновок про те, що на глибинах менше 300 м-коду витрати на буріння дегазаційних свердловин становлять близько 30-40% від витрат на підготовку ділянки; на глибинах 300-300 м - досягають 60% витрат на підготовку, а при глибині понад 330 м зазначені витрати можна порівняти.

Слід зазначити, що, на думку, зростання витрат за буріння обумовлений як збільшенням глибини гірських робіт і природної газоносності пластів, а й підвищення довжин лав, оскільки збільшення довжин лави збільшує площу підробітку і дальність її впливу.

Значна різноманітність застосовуваних схем розташування вертикальних дегазаційних свердловин вимагає детального вивчення впливу параметрів дегазації виробленого простору на ефективність управління газовиділенням, що обумовлено як постійно зростаючою з глибиною вартістю їх буріння, так і визначальним вкладом виробленого простору в газорясних виїмкових ділянок при інтенсивному відпрацюванні світових газоносів очисними вибоями.

1.4 Аналіз та узагальнення літературних джерел з обґрунтування параметрів технологічних схем інтенсивного відпрацювання схильних до самозаймання газоносних вугільних пластів

Аналіз діючих нормативних документів [6, 12, 20, 21] дозволив виявити основні вимоги до параметрів схем інтенсивного відпрацювання схильних до самозаймання газоносних вугільних пластів.

Відповідно до п.1.2.4. «Посібники з проектування вентиляції вугільних шахт» [8] дані про фактичну природну газоносність вугільного пласта в контурі проєктованих виїмкових стовпів є основою для вибору схеми провітрювання проєктованих до відпрацювання виїмкових стовпів і розрахунку параметрів провітрювання, а також для ухвалення рішення про необхідність застосування попередньої пластової дегазації.

При відпрацюванні виїмкового стовпа була “встановлена незадовільна збіжність прогнозних та фактичних даних про газорясність очисного вибою та виїмкової ділянки” [7] (рис. 1.27).

Слід зазначити, що висновок про “недостатню вивченість процесів газовиділення, яка стала виявлятися саме в останні роки з впровадженням

сучасної високопродуктивної техніки” при інтенсивному відпрацюванні газonosних вугільних пластів робиться багатьма сучасними вченими, які зазначають, що статистична спроможність функцій, прийнятих у

«Посібнику з проектування вентиляції вугільних шахт» [8] для опису закономірностей газовиділення в лаві при сучасних швидкостях просування очисних вибоїв фактично вичерпано [7].

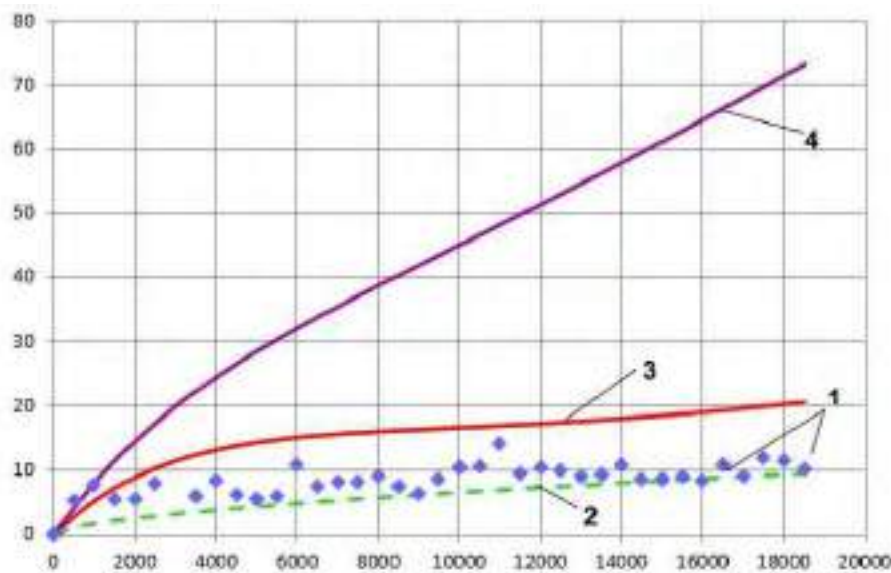


Рис. 1.27 – Порівняльний аналіз фактичного та прогнозного газовиділення в очисний вибій

Як було встановлено в роботах [7], “фактична газорясність всіх відпрацьованих на шахті виїмкових ділянок значно нижча за прогнозні значення газовиділення, визначених за даними природної газоносності пласта, що розробляється. Причому ця відмінність при різних навантаженнях на очисний вибій становить від 2 до 5 разів.

Таким чином, прогноз газообильності виїмкових ділянок в умовах глибоких шахт за даними природної газоносності пласта, що розробляється, для забезпечення інженерної точності розрахунків, не допустимий. Результати таких розрахунків фактично ставлять під сумнів можливість відпрацювання виїмкових ділянок, так як вентиляційна мережа шахти не в змозі забезпечити подачу

повітря на виїмкову ділянку в обсязі, що в кілька разів перевищує фактичний обсяг, що подається на відпрацьовані дільниці.

Отже, для прогнозу газообильності виїмкових ділянок, у тому числі визначення максимально допустимого навантаження на очисний забій необхідно використовувати інші методи розрахунку, передбачені чинними нормативними документами.

Відповідно до вимог «Посібник з проектування вентиляції вугільних шахт» [7] та «Інструкція з визначення та прогнозу газоносності вугільних пластів та вміщуючих порід при геологорозвідувальних роботах» передбачається коригування природної газоносності вугільного пласта, що розробляється за даними фактичного газовиділення [21].

На підставі вимог даних документів проводиться коригування природної газоносності пласта, що розробляється, в межах проєктованих до відпрацювання виїмкових ділянок на основі даних фактичної газорясності очисних і підготовчих виробок.

Для отримання інформації про фактичну природну газоносність пласта в контурі проєктованих до відпрацювання виїмкових стовпів вибираються підготовчі виробки - конвеєрний штрек, конвеєрний штрек, а також відпрацьована ділянка лави.

Слід зазначити, що одним із обмежувальних факторів, що визначають граничні можливості вентиляції, є максимальна витрата повітря, яку можна подати в очисний виробіток при використанні для вилучення вугілля механізованого комплексу.

при проектуванні схем провітрювання виїмкових ділянок з ізолюванням відведенням метану з виробленого простору на пластах, схильних і схильних до самозаймання, повинні передбачатися [21]:

- ізоляція гірничих виробок від вироблених просторів діючих та раніше відпрацьованих виїмкових стовпів вибухостійкими ізолюючими перемичками”;

- проведення газовідвідних збіжок або буріння свердловин на відстані один від одного, що дорівнює $2/3$ запланованого просування лінії очисного вибою за інкубаційний період самозаймання вугілля;

- проведення комплексу профілактичних заходів щодо дезактивації розпушених втрат вугілля;

- інертизація вироблених просторів діючих та відпрацьованих виїмкових ділянок.

Проектування дегазації підробленої товщі та виробленого простору в здійснюється відповідно до чинного нормативного документа «Інструкція з дегазації вугільних шахт» [20].

Дегазія залягаючих у вугленосній товщі зближених пластів та вироблених просторів свердловинами з поверхні здійснюється за глибини розробки до 600 м за умови, що поверхня дозволяє розмістити бурове та дегазаційне обладнання. Дегазаційні свердловини буряться вздовж стовпа виїмки. Вибої дегазаційних свердловин повинні перебувати в розвантажуваній зоні пласта, що підробляється. Перша свердловина буриться на відстані 30 – 40 м від монтажної камери [20].

Схеми дегазації виробленого простору та пластів, що підробляються, представлені на рис. 1.28.

Таким чином, застосовувані нині в Росії нормативні документи містять лише рекомендації щодо розташування одного ряду дегазаційних свердловин з боку вентиляційного вироблення та розглядають розташування додаткових рядів дегазаційних свердловин. Крім того, викликають сумніви наступні рекомендації: «При відпрацюванні виїмкових ділянок пласта, оконтурених з обох боків виробленими просторами, вертикальні свердловини розташовуються в ряд посередині виїмкового стовпа [20], оскільки таке розташування суперечить принципу розташування свердловин уздовж вентиляційного вироблення і не забезпечує, На думку, ефективного видалення метану в частині виробленого простору з боку вентиляційного вироблення.

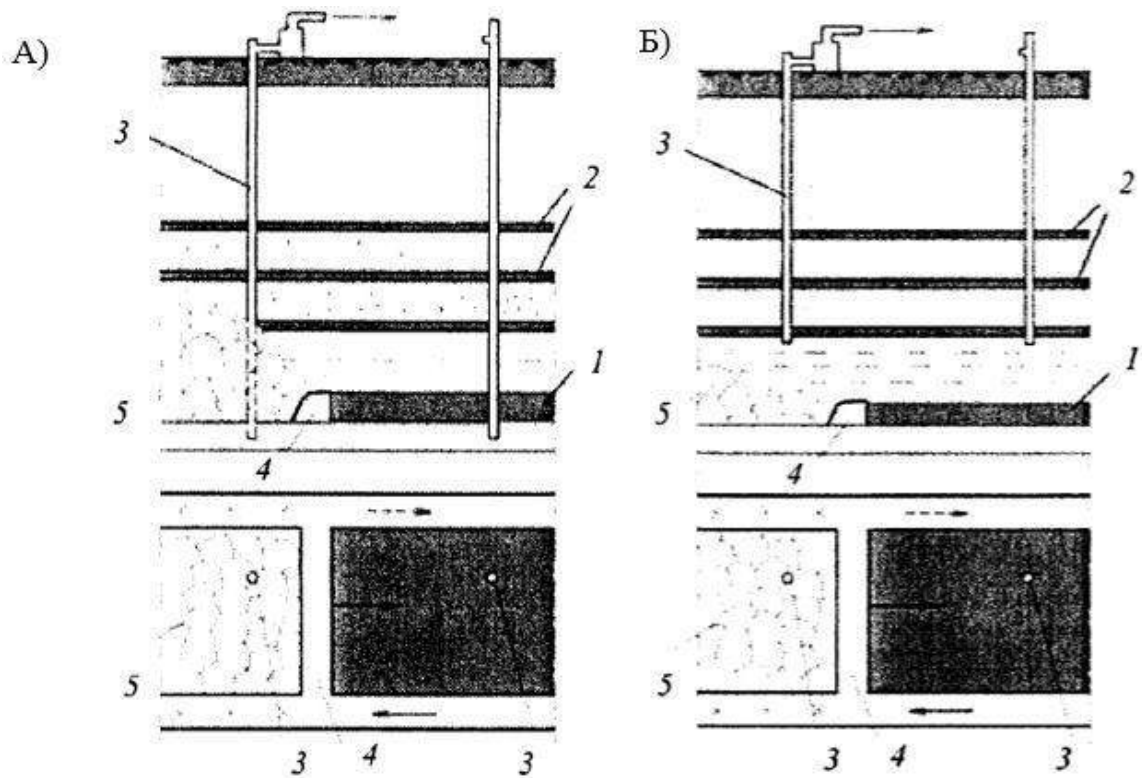


Рис. 1.28 – Схеми дегазації вертикальними свердловинами, пробуреними з земної поверхні [20]: А) Дегазація вироблених просторів та пластів, що підробляються; Б) Дегазація пластів, що підробляються

Представляє інтерес рекомендації щодо раціонального порядку відпрацювання світ газоносних вугільних пластів, який на думку деяких авторів [80] повинен забезпечувати не тільки високопродуктивну та безпечну відпрацювання цих пластів, а й забезпечувати максимальне вилучення та утилізацію шахтного метану.

1.5 Висновки за першим розділом

1. Гірничо-геологічні та гірничотехнічні умови відпрацювання потужних газоносних пластів в цілому характеризуються як сприятливі для забезпечення інтенсивного відпрацювання запасів з використанням сучасного високопродуктивного обладнання: потужні пласти, що розробляються, мають

відносно просту будову і відносно витримані за потужністю; вугілля пластів характеризуються високою тріщинуватістю і мають малу міцність; відсутні великі диз'юнктивні порушення.

Як основні фактори, що ускладнюють умови відпрацювання, слід виділити:

- високі водопритоки вироблення виїмкових ділянок;
- суттєву метанообильність виїмкових ділянок при інтенсивному відпрацюванні запасів;
- схильність пластів, що розробляються до самозаймання;

2. Аналіз зарубіжного досвіду інтенсивного відпрацювання світ газоносних вугільних пластів показує, що одним з найбільш ефективних способів дегазації виробленого простору є спосіб дегазації вертикальними свердловинами, пробуреними із земної поверхні. До переваг цього способу слід віднести: проведення дегазації незалежно від гірничих робіт; можливість вилучення великих обсягів газу з високою концентрацією метану; невисока вартість на малих та середніх глибинах. Недоліками способу є зростання витрат зі збільшенням глибини ведення гірничих робіт, наявність обмеження застосування способу по глибині.

3. Аналіз ефективності технологічних схем відпрацювання потужних газоносних схильних до самозаймання вугільних пластів дозволив зробити наступні висновки:

- застосування пластової дегазації розроблюваної дегазації без гідророзриву пласта є неефективним і високовитратним способом керування газовиділенням;
- дегація виробленого простору з використанням дегазаційних свердловин, пробурених із земної поверхні реалізується з використанням великої кількості варіантів розташування та кількості дегазаційних свердловин та характеризується значним діапазоном ефективності дегазації та вартості її реалізації;

- вартість буріння дегазаційних свердловин на виїмкових ділянках шахт, що відпрацьовують потужні пласти перевищує вартість проведення комплексу дільничних підготовчих виробок;

- застосування комбінованої схеми провітрювання з ізольованим відведенням метаноповітряної суміші є обов'язковою умовою успішного керування газовиділенням на ділянці виїмки;

- обмеження навантажень на очисні вибої при відпрацюванні потужних газоносних схильних до самозаймання пластів пов'язані, в першу чергу, з наступними небезпеками: загазування кутка (погашується за лавою частини конвеєрного штреку); перевищенням допустимої концентрації метану (3,5%) у газовідвідному трубопроводі;

- Інтенсивне відпрацювання запасів з використанням ізольованого відведення метаноповітряної суміші через сбоечні свердловини характеризується значними обсягами буріння, високою частотою перемикання свердловин, низькою ефективністю застосування внаслідок малих витрат метаноповітряної суміші (до 150-200 м³/хв);

4. Виконаний аналіз світового досвіду інтенсивного відпрацювання пологих газоносних вугільних пластів, аналіз ефективності технологічних схем, що застосовуються, дозволив сформулювати наступні завдання та мету досліджень.

РОЗДІЛ 2 ШАХТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ УПРАВЛІННЯ ГАЗОВИДІЛЕННЯМ

2.1 Вибір методики проведення досліджень

Предметом досліджень є вплив параметрів технологічних схем, що застосовуються на ефективність управління газовиділенням на виїмкових ділянках.

Мета досліджень: встановлення впливу параметрів технологічних схем, що застосовуються, на ефективність управління газовиділенням на виїмкових ділянках.

При проведенні досліджень виконувався аналіз даних шахтної багатофункціональної газоаналітичної системи «Мікон 1Р», даних добових звітів про середні значення параметрів газовиділення та вентиляції, дані про фактичне газовиділення у вироблення виїмкових ділянок, дані про обсяги та характеристики дегазованої вертикальними свердловинами та відведеної ізольованим відведенням метану.

Для виїмкової ділянки передбачалося застосування (рис. 2.1):

1) Дегазація виробленого простору за допомогою вертикальних свердловин, пробурених у купол обвалення гірських порід із земної поверхні;

2) Дегазація ізольованого відведення метаноповітряної суміші з виробленого простору лави через сбоечні свердловини діаметром 250 мм, звідки вилучена метаноповітряна суміш по газопроводу діаметром 325 мм, прокладеному по конвеєрному штреку станцією по свердловині видається поверхню.

Для аналізу зміни газової обстановки на ділянці виїмки в залежності від інтенсивності відпрацювання запасів (навантаження на очисний вибій) і параметрів застосовуваної схеми управління газовиділенням виконувався аналіз

як поточних (архівних) показань даних системи АГК (кілька вимірювань за хвилину), так і середньодобових значень параметрів, характеризують газову обстановку: концентрація метану, швидкість повітря, витрата метаноповітряної суміші.



Рис. 2.1 – Схема керування газовиділенням на виїмковій ділянці

2.2 Дослідження впливу параметрів застосовуваних технологічних схем та інтенсивності відпрацювання на ефективність управління газовиділенням

При дослідженнях аерогазодинамічних процесів необхідно врахувати основні гірничотехнічні фактори, здатні істотно вплинути на газову обстановку на виїмкових ділянках. Враховуючи значну кількість гірничотехнічних факторів, що впливають, і різноманітність гірничо-геологічних умов ведення гірничих робіт при відпрацюванні пластів аналіз шахтних даних проводиться в тісній прив'язці до конкретної виїмкової ділянки з урахуванням основних гірничо-

технічних і гірничо-геологічних особливостей. На рис 2.2 представлено викопування з плану гірничих робіт.

Слід зазначити, що виїмкові ділянки, що розглядаються, принципово відрізняються наступними параметрами технологічних, що надають істотний вплив на газову обстановку в їх межах змінюється по довжині стовпа виїмки, що обумовлено необхідністю формування вододренажної камери і залишенням цілика. Розмір цілика по довжині стовпів виїмкових поступово знижується і становить від 400 м - при відпрацюванні виїмкової ділянки, до 110 м - при відпрацюванні ділянки. Максимальна довжина лави виїмкових ділянок, що розробляються, постійно підвищувалася і становила 230, 270, 280 і 300 м відповідно для виїмкових ділянок.

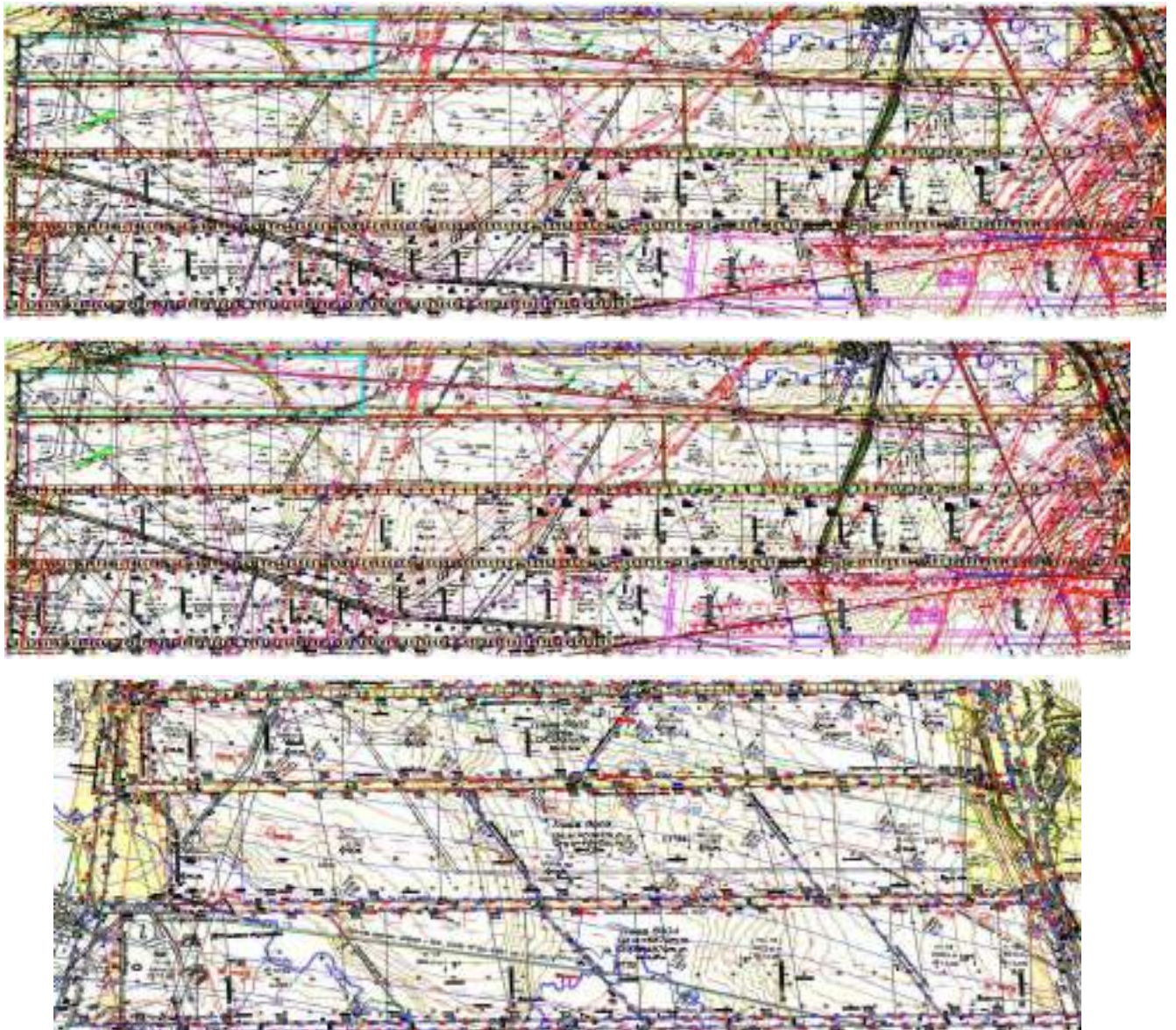


Рисунок 2.2 - Викопування із планів гірничих робіт

На рис. 2.3 та 2.4 представлені графіки динаміки газорясності виїмкових ділянок та навантажень на очисні забої при відпрацюванні потужних пластів у період з 2009 по 2018 рр. Як видно з малюнку 2.3 робота очисних вибоїв на шахті при відпрацюванні запасів пласта характеризується нестійкою – навантаження на очисні вибої змінюються у значних діапазонах, мають місце тривалі простої високопродуктивного очисного обладнання. Однак, детальний аналіз показує, що зниження навантажень на очисні вибої спостерігається зі збільшенням глибини ведення гірничих робіт і одночасного зростання довжини очисних вибоїв.

Більш стабільною роботою відрізняється лава на шахті, що обумовлено нижчими навантаженнями на очисний вибій.

Інтерес представляють дані про роботу виїмкової ділянки на шахті, що характеризується рекордною інтенсивністю відпрацювання запасів – до 5 000 т/добу та значеннями довжини лави – 400 м (рис 2.4). Як видно з рис 2.4 відпрацювання пласта здійснюється в умовах, коли сумарна газорясність (обсяги видобутого метану засобами вентиляції, дегазації та ізольованого відведення) не перевищують $120 \text{ м}^3/\text{хв}$, що пояснюється малою глибиною (до 250 м) ведення гірничих робіт.

Для умов родовища такий рівень газообильности відповідає відпрацюванню пласта на виїмковій ділянці з навантаженнями на лаву довжиною 220 м до 3 000 т/доб при веденні гірських робіт.

Аналіз роботи очисних вибоїв на шахті дозволяє зробити висновок про поступове зниження інтенсивності очисних робіт у міру збільшення глибини та зростання газорясності виїмкових ділянок, що пояснюється появою газового бар'єру, що не дозволяє не тільки нарощувати, а й зберегти навантаження на очисний вибій на досягнутому рівні .

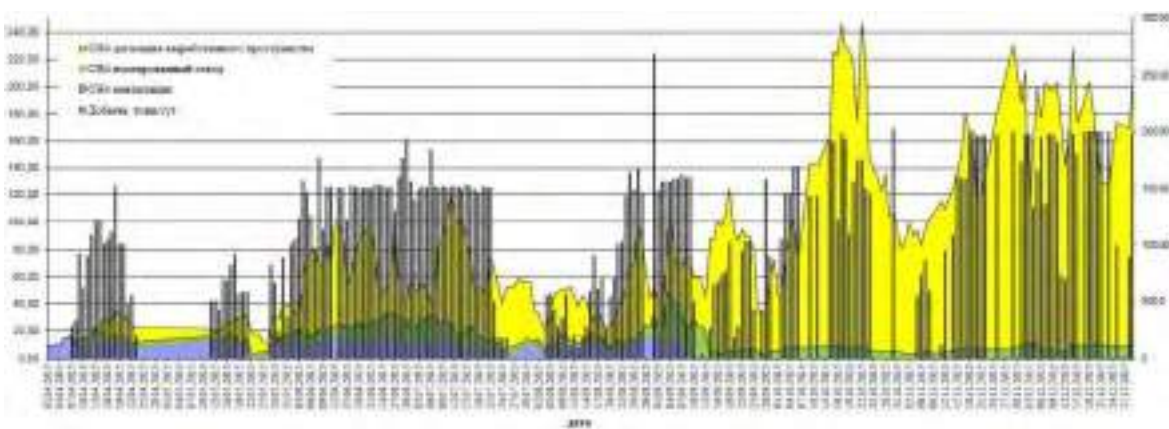
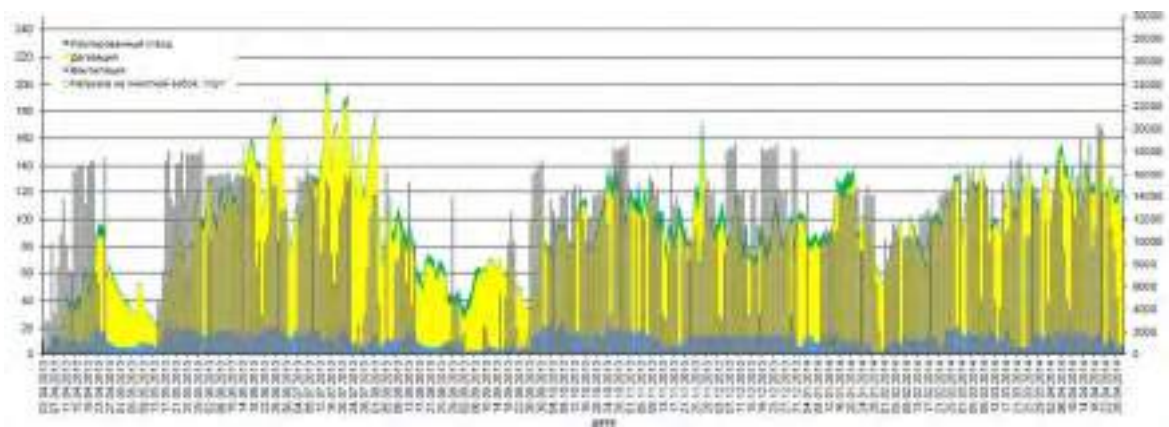
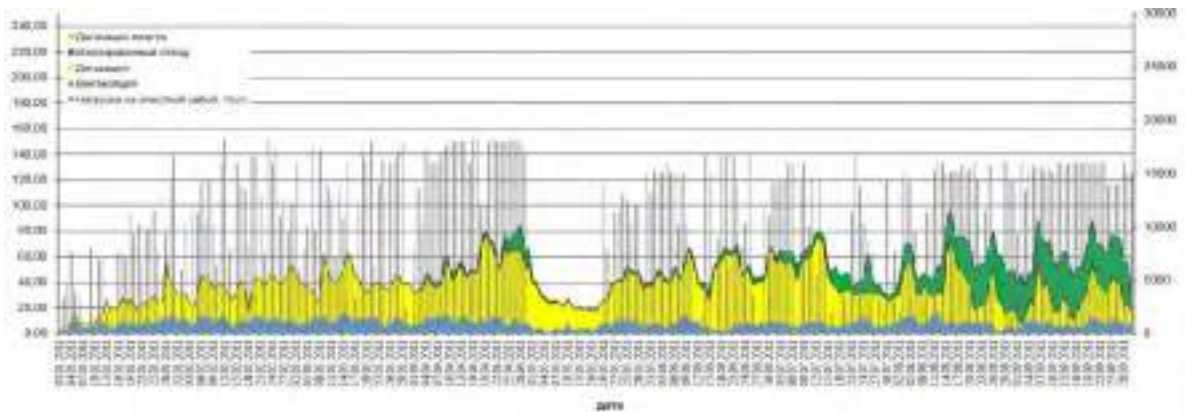
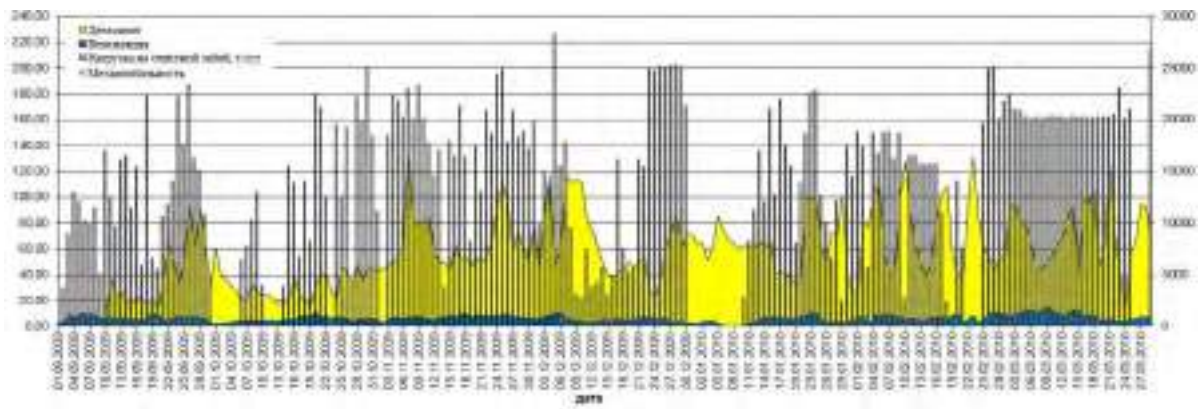


Рис. 2.3 – Взаємозв'язок інтенсивності відпрацювання запасів та газорясності виїмкових ділянок

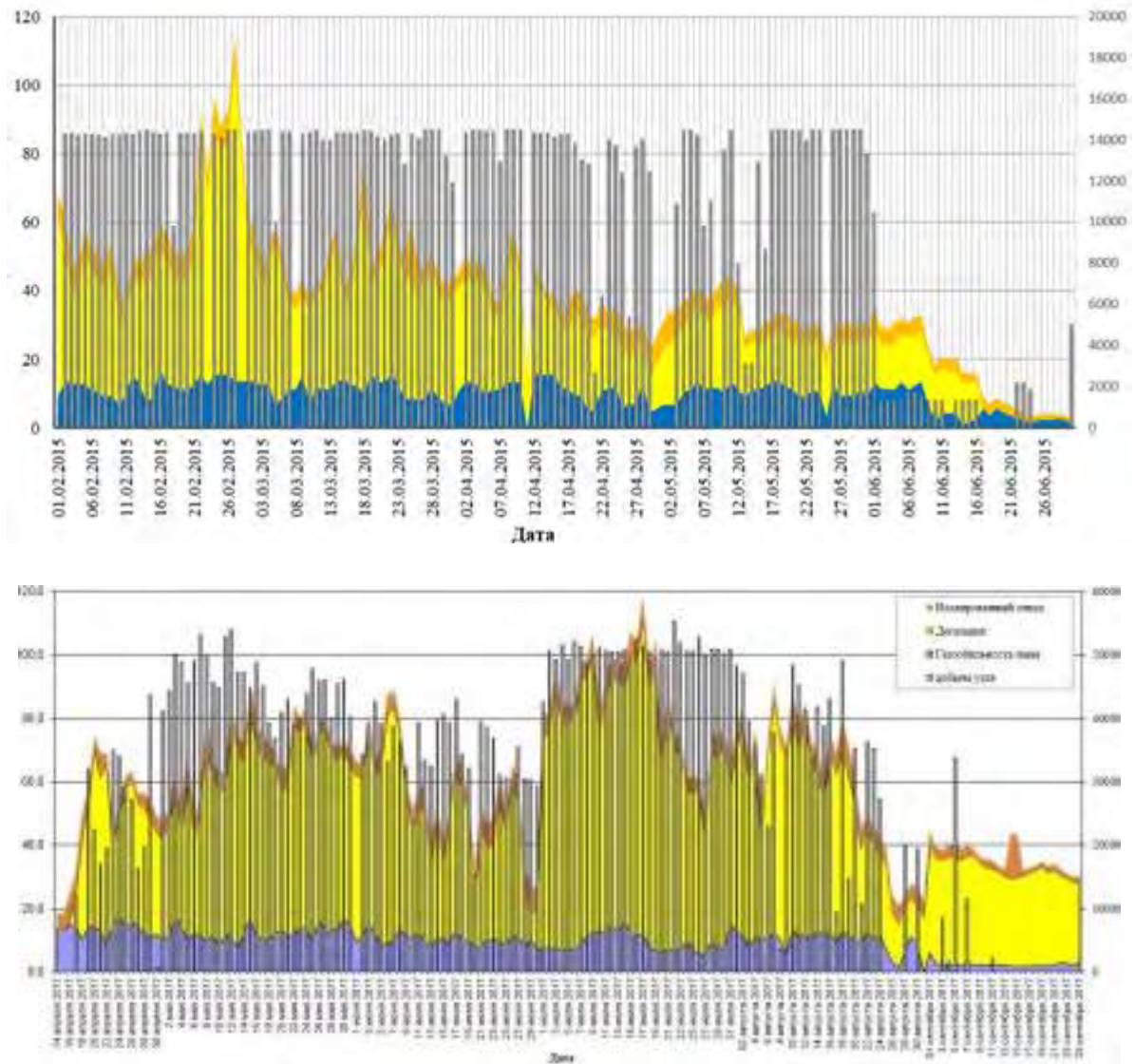


Рис. 2.4 – Взаємозв'язок інтенсивності відпрацювання запасів та газообильності виїмкових ділянок

На рис. 2.5-2.6 представлені результати аналізу взаємозв'язку інтенсивності роботи та газорясності лав. Як видно з рис. 2.5 у міру збільшення глибини ведення гірничих робіт та зростання природної газоносності спостерігається закономірне збільшення газорясності лав. Разом з тим, найбільшою газообильністю характеризується робота лави⁹.

Узагальнення поданих на рис. 2.5 та 2.6 даних дозволило встановити залежності газообильності лав від інтенсивності їхньої роботи при відпрацюванні запасів родовища (рис. 2.7).

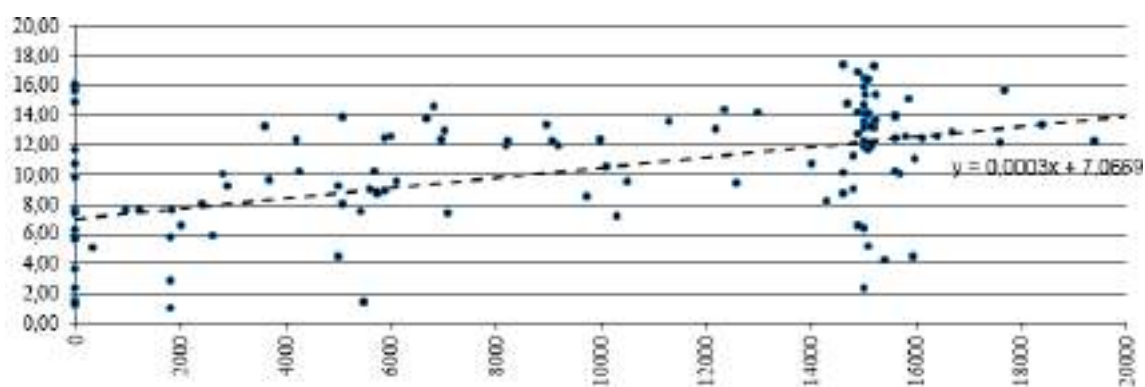
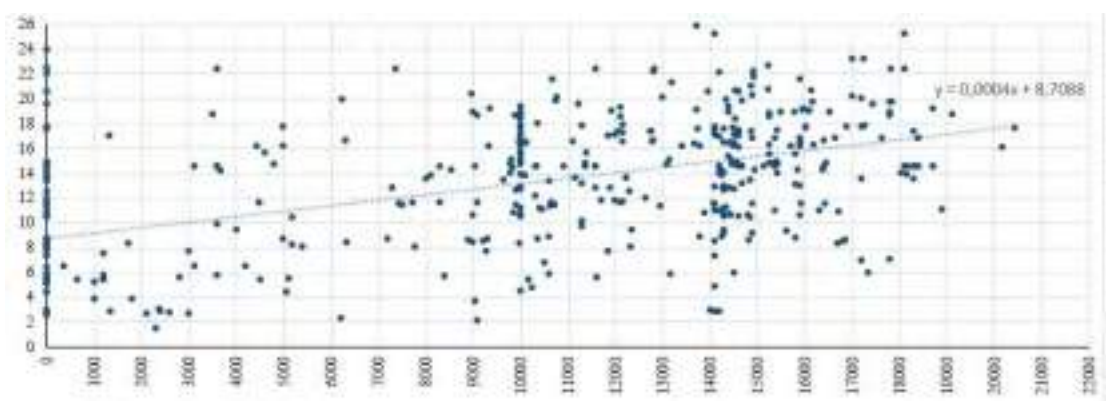
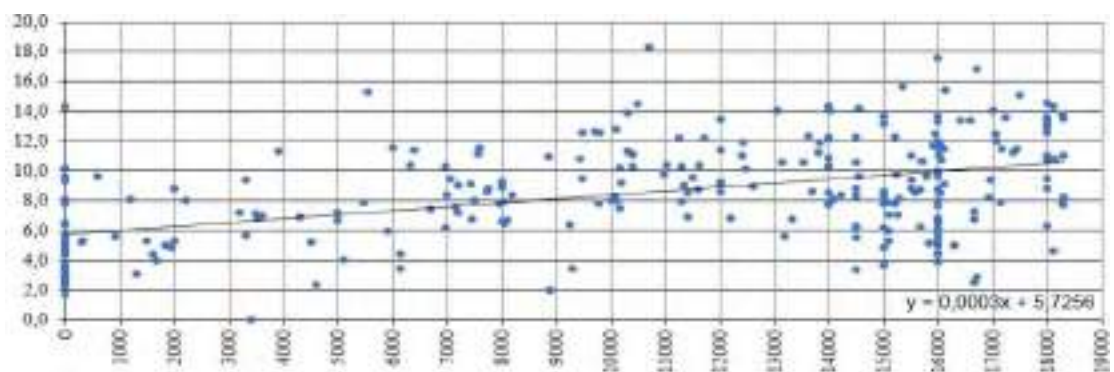
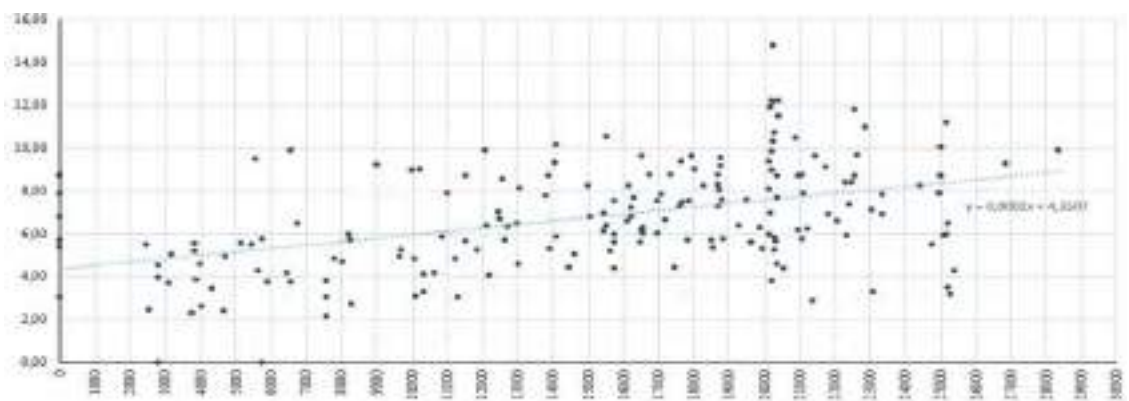


Рис. 2.5 – Взаємозв'язок інтенсивності відпрацювання запасів та газообильності лави при відпрацюванні виїмкових ділянок

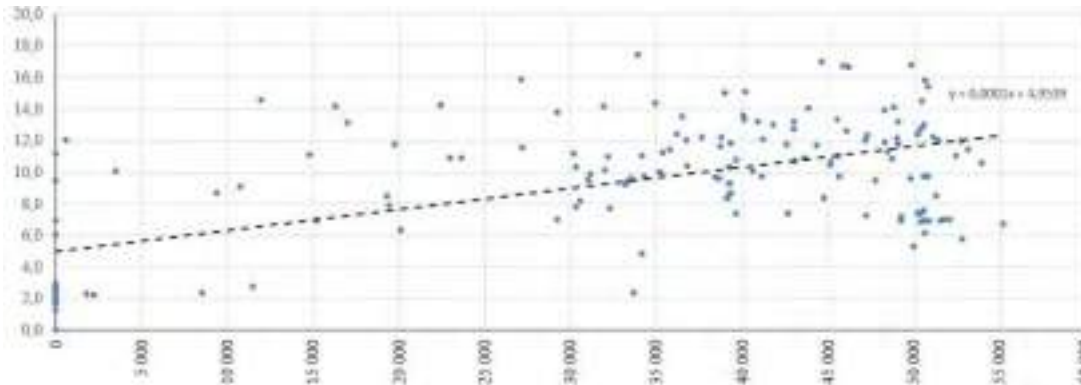
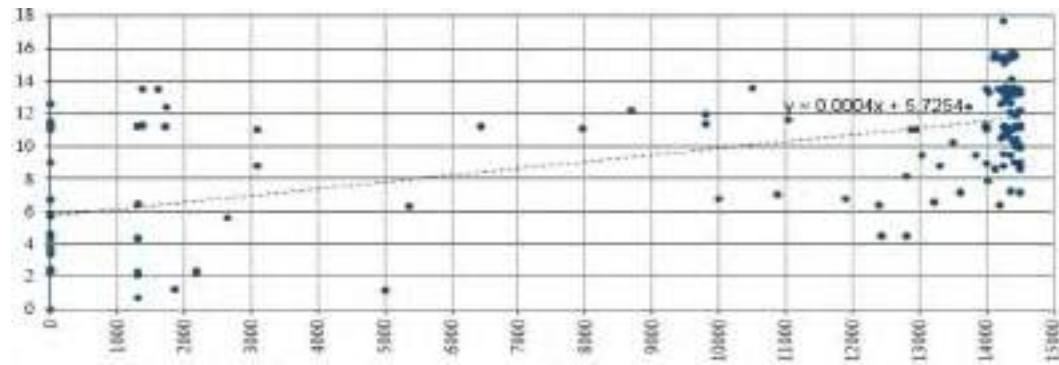


Рис. 2.6 – Взаємозв'язок інтенсивності відпрацювання запасів та газообильності лави при відпрацюванні виїмкових ділянок

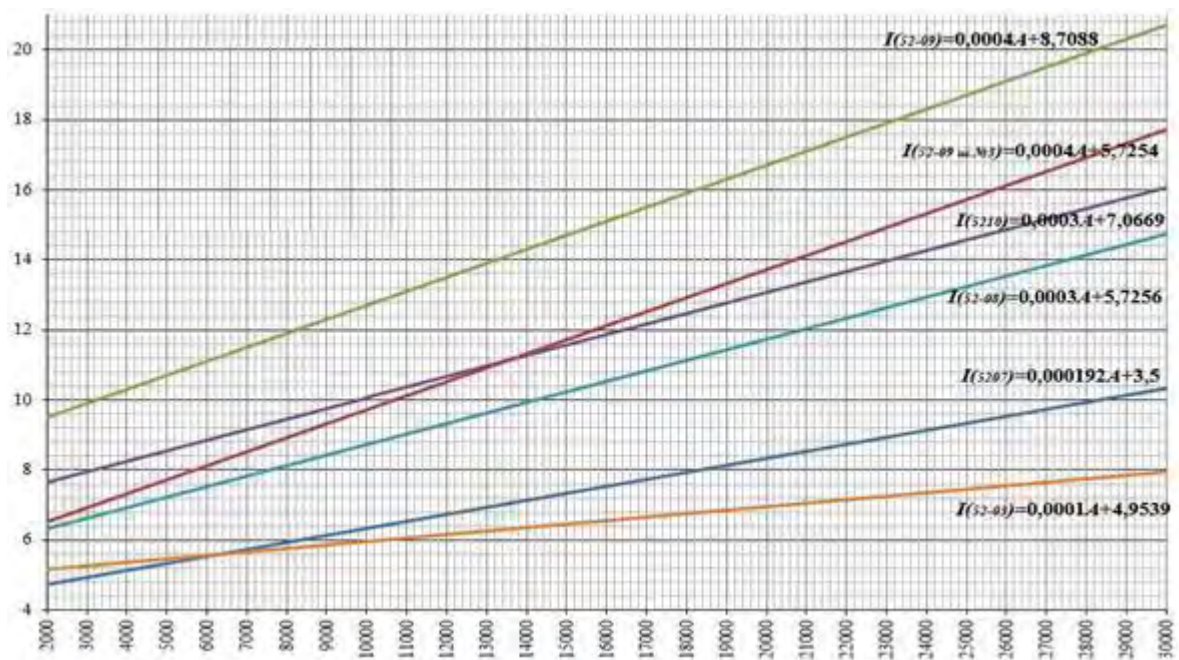


Рис. 2.7 – Взаємозв'язок інтенсивності відпрацювання запасів та газообильності лави при відпрацюванні потужних пластів.

З рис 2.7 можна дійти невтішного висновку у тому, що у межах шахтних полів закономірності зміни газообильності виїмкових ділянок різняться.

Найбільшою швидкістю зростання газорясності лав характеризується відпрацювання виїмкових ділянок по пласту, що і пояснює обмеження навантаження на очисні вибої, що розглядаються, на рівні 15 00 т/добу. Найменшою швидкістю зростання газорясності характеризується відпрацювання пласта на шахті, що пояснюється роботою в зоні надробітку, яка забезпечила зниження газорясності підроблюваного масиву та дозволила досягти рекордних навантажень на очисні забої. Відпрацювання пласта характеризується середніми темпами наростання газорясності у міру збільшення навантажень на очисні вибої, що дозволяє забезпечити інтенсивність відпрацювання запасів на рівні 1-2 млн тонн на рік.

Детальний аналіз взаємозв'язку інтенсивності відпрацювання запасів на шахті дозволила виявити наявність обмежень інтенсивності відпрацювання запасів за газовим фактором, які ставали більш вираженими в міру відпрацювання виїмкових ділянок та призвели до необхідності обмеження навантажень на очисні вибої. На рис. 2.8 представлені графіки, що відображають взаємозв'язок середніх та максимальних значень концентрації метану та інтенсивності роботи лави. З рис. 2.8 видно, що в умовах гранична по газовому фактору навантаження на очисний вибій становить 15 00 т/добу. Однією з основних причин поряд із зростанням природної газоносності пласта, що розробляється, і газообильності лави є низька ефективність застосовуваної схеми ізольованого відведення метаноповітряної суміші з використанням сбоечних свердловин (рис.к 2.1), оскільки застосовувані дегазаційні установки забезпечували витрати метаноповітряної суміші в обсязі 80-160 м³/хв.

З рис 2.8, видно, що концентрація метану в дегазаційному ставі при ізольованому відводі перевищує 3,5% навіть при незначних навантаженнях на очисний забій, що вимагає застосування спеціальних заходів для забезпечення безпечного відпрацювання запасів. Вичерпання можливостей ізольованого відведення збійної дегазації зумовило необхідність застосування інших способів ізольованого відведення метаноповітряної суміші (рис. 2.9):

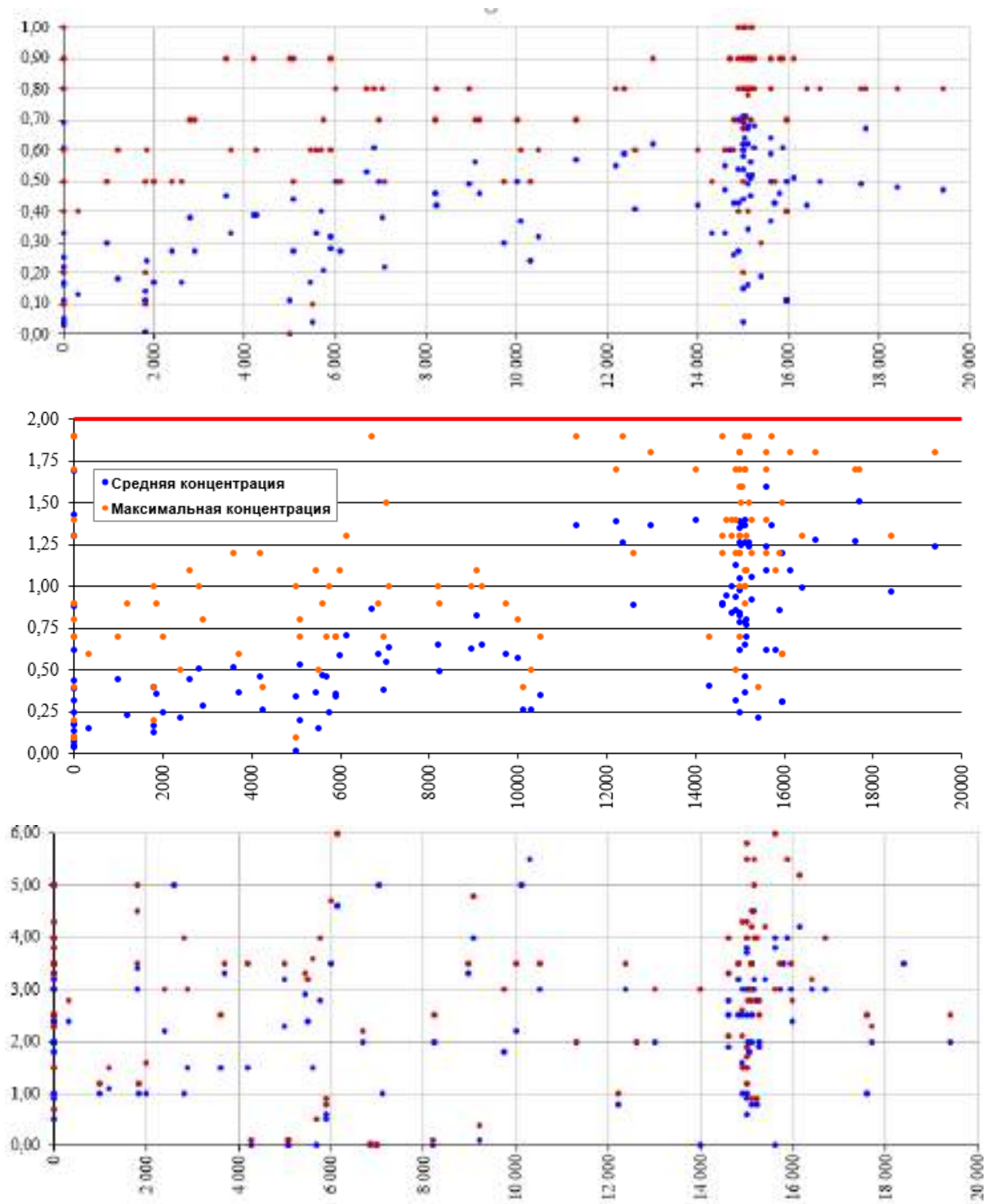


Рис. 2.8 – Взаємозв'язок інтенсивності відпрацювання запасів та концентрації метану при інтенсивному відпрацюванні виїмкового стовпа

- ізолюваний відвід через задню збійку в камеру змішування (рис.2.9,А).
Спосіб реалізований при відпрацюванні запасів виїмкової ділянки за пластом у 2017-2018 роках.

- Ізольоване відведення метаноповітряної суміші з використанням двох вентиляторів УВЦГ-9 та дегазаційних ставів, заведених за перемичку в задній вентиляційній збійці (рис 2.9, Б). Спосіб реалізований при відпрацюванні запасів виїмкових ділянок на шахті у 2017-2018 роках.

Застосування таких схем управління газовиділенням забезпечило зниження витрат на буріння (за рахунок відмови від збоїчних свердловин), але зумовило необхідність визначення раціональної відстані між вентиляційними збійками, оскільки застосовувані на шахтах та схеми підготовки, що передбачають проведення збійок на відстані 270-430 м не забезпечували надійного ефективного ізольованого відведення метаноповітряного струменя по частині вентиляційної виробки, що погашається, оскільки в міру відходу лави від вентиляційної збійки на відстань 200 м підвищення опору погашається частини вироблення внаслідок обвалення покрівлі і перекриття її перерізу, а також зростала концентрація метану в газовідсмоктувальному трубопроводі через суттєве відставання змішувальної камери від працюючих дегазаційних свердловин.

Аналіз ефективності управління газовиділенням дозволив як основні недоліки схеми газоправління з використанням змішувальної камери слід зазначити:

- необхідність подачі значних обсягів повітря (понад 2000 м³/хв) для розведення метаноповітряної суміші, що видається в камеру, до 2% (на її виході);

- Складність забезпечення стійкого витрати метаноповітряної суміші, що надходить в змішувальну камеру в міру просування лави і зміни аеродинамічного опору частини вентиляційної виробки, що погашається (необхідність постійного регулювання);

- підвищена небезпека загазування вироблення, в якій встановлена камера змішування.

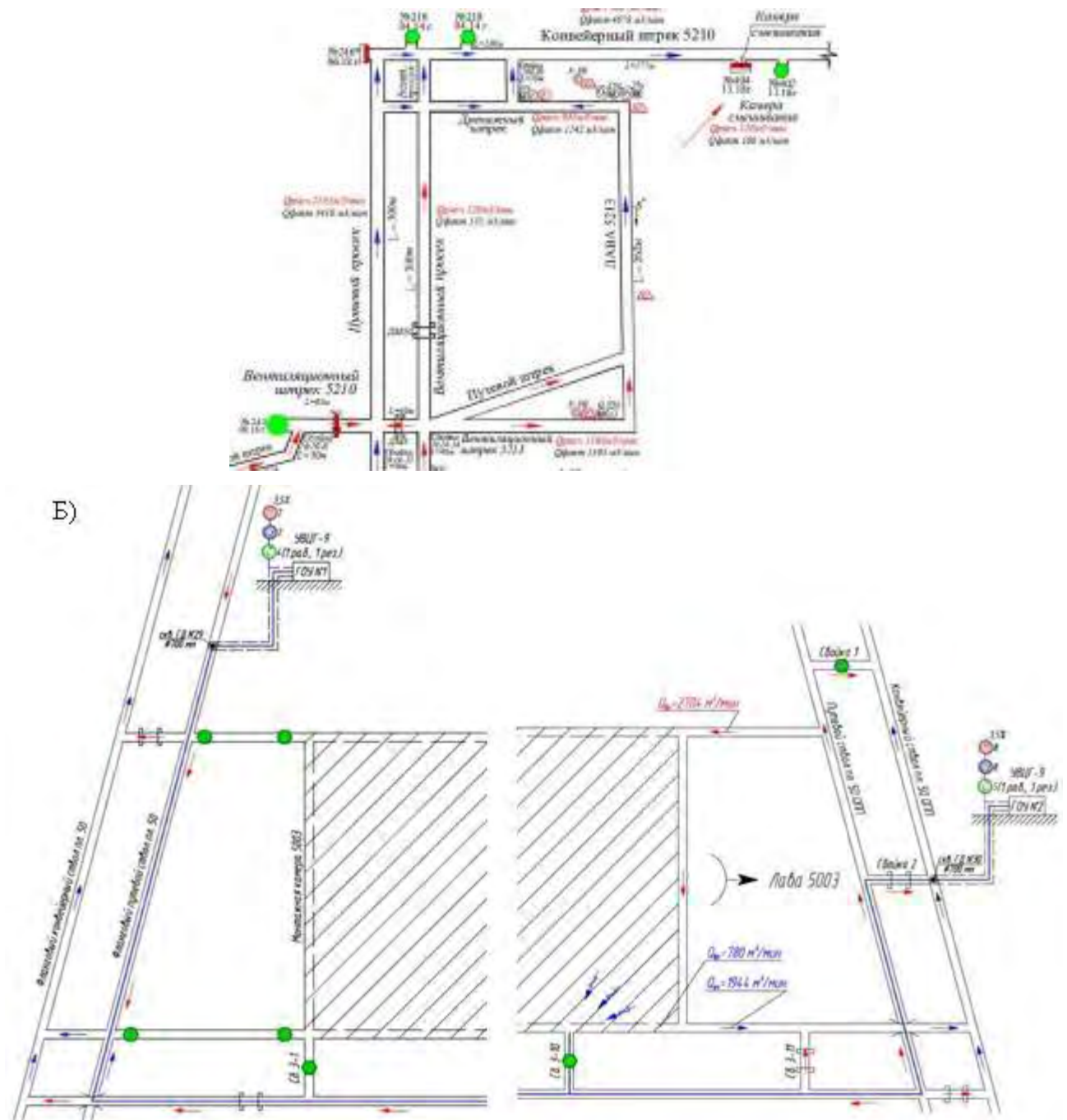


Рис. 2.9 – Схеми провітрювання

Застосування вентиляторів УВЦГ-9 для ізольованого відведення метаноповітряної суміші дозволяє забезпечити витрату до $600\text{--}700\text{ м}^3/\text{хв}$ за одночасної роботи двох вентиляторів і використання двох дегазаційних свердловин і до $1400\text{ м}^3/\text{хв}$ при використанні одночасної роботи чотирьох вентиляторів на двох дегазаційних свердловинах. Особливістю даного способу є необхідність буріння вертикальних свердловин дегазаційних великого діаметра 700 мм . Крім того, аналіз ефективності ізольованого відводу при застосуванні

вентиляторів УВЦГ-9 показав, що в міру відходу лави від задньої збійки концентрація та обсяги метану, що видаляється ізольованим відведенням, збільшуються (рис. 2.10).

На рис. 2.11 представлені залежності зміни обсягів метану, що видаляється ізольованим відведенням від відстані між лавою та задньою збійкою.

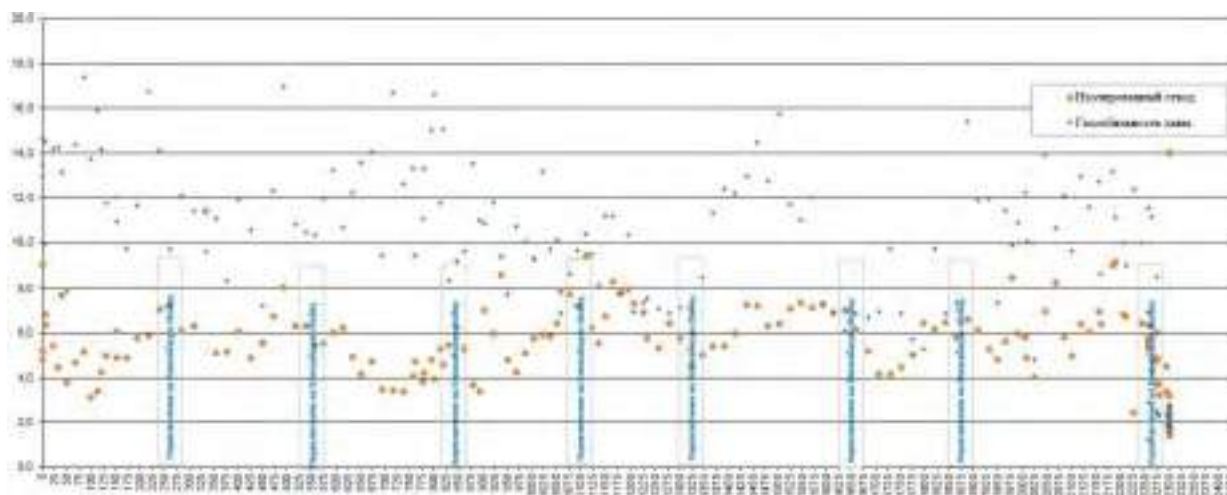


Рис 2.10 – Зміна об'ємів газу, що видаляється ізольованим відведенням, у міру подвигу очисного вибою та перемикання ізольованого відводу на наступну збійку

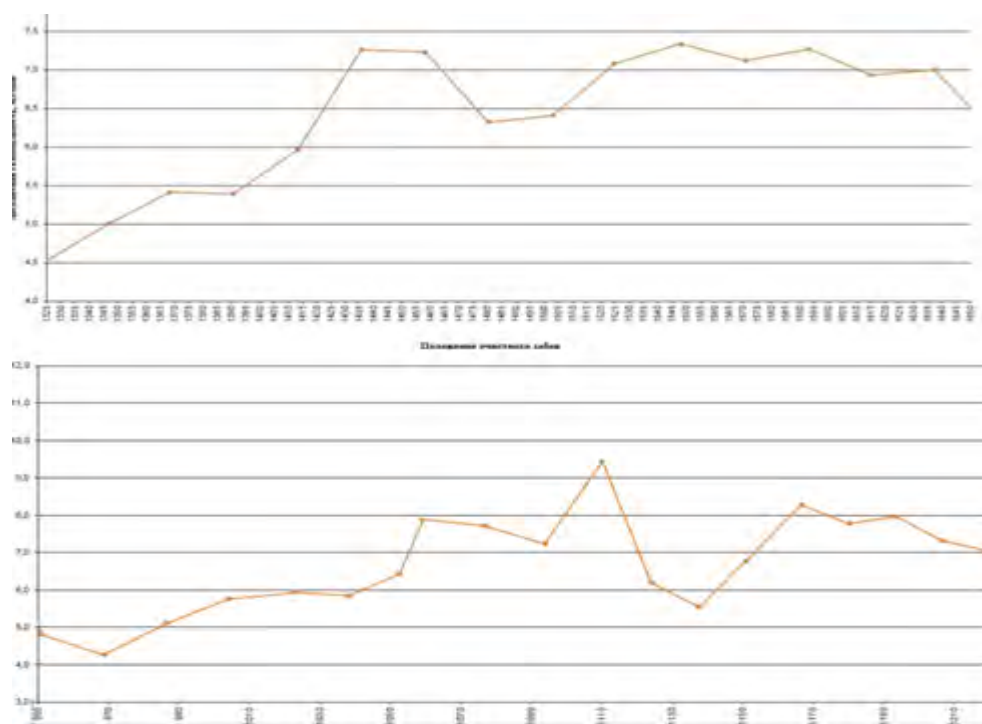


Рис. 2.11 – Зміна об'ємів метану видалених ізольованим відведенням у міру збільшення відстані від лави до задньої збійки

2.3 Дослідження впливу параметрів застосовуваних схем дегазації виробленого простору на ефективність управління газовиділенням

Для оцінки впливу параметрів схеми дегазації виробленого простору вертикальними свердловинами, пробуреними із земної поверхні, було виконано детальний аналіз ефективності управління газовиділенням для виїмкових ділянок з різними схемами розташування свердловин.

Мінімальний обсяг буріння дегазаційних свердловин уражає схем дегазації з одним рядом дегазаційних свердловин. Такий варіант дегазації виробленого простору застосовувався на шахті у 2010 році при відпрацюванні дільниці виїмки. При роботі лави, довжина якої становила 220 м, з випередженням очисних робіт бурили одні ряди дегазаційних свердловин (на відстані 75 м від конвеєрного штреку) відстань між свердловинами в якому становила 80 м (рис 2.12).



Рис. 2.12 – Викопування з плану гірничих робіт на ділянці з розташуванням дегазаційних свердловин

На рис 2.12 представлений графік, що відображає динаміку вилучення метану вертикальними свердловинами дегазаційними в період роботи лави. Як видно з малюнка 2.13 пікові значення об'ємів метану, що видаляється свердловинами, досягали $127 \text{ м}^3/\text{хв}$ при середніх значеннях $48 \text{ м}^3/\text{хв}$.

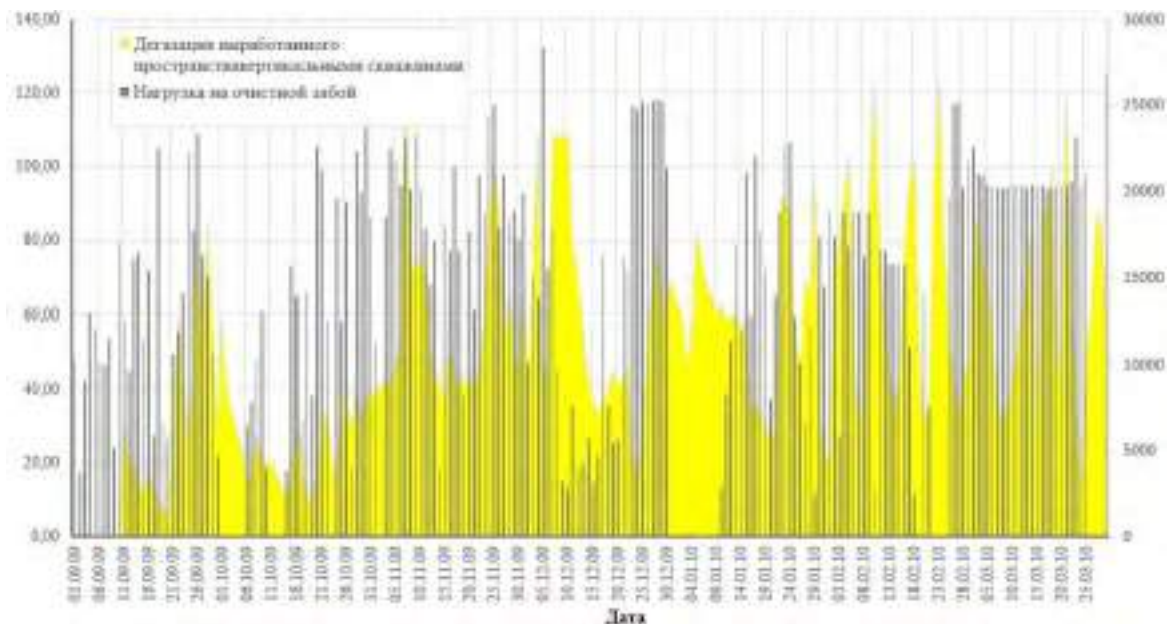


Рис. 2.13 – Взаємозв'язок обсягів метану, що видаляється, і навантаження на очисний вибій

При цьому концентрація метану в дегазаційних свердловинах досягала 85% за середніх значень 24% (рисунок 2.14). Низькі значення концентрації метану в дегазаційних свердловинах, на нашу думку, обумовлені їх значною відстані (75 м) від вентиляційної виробки. Більш раціональним розташуванням виробок було б їх зміщення на відстань близько 30 м від вентиляційної виробки.

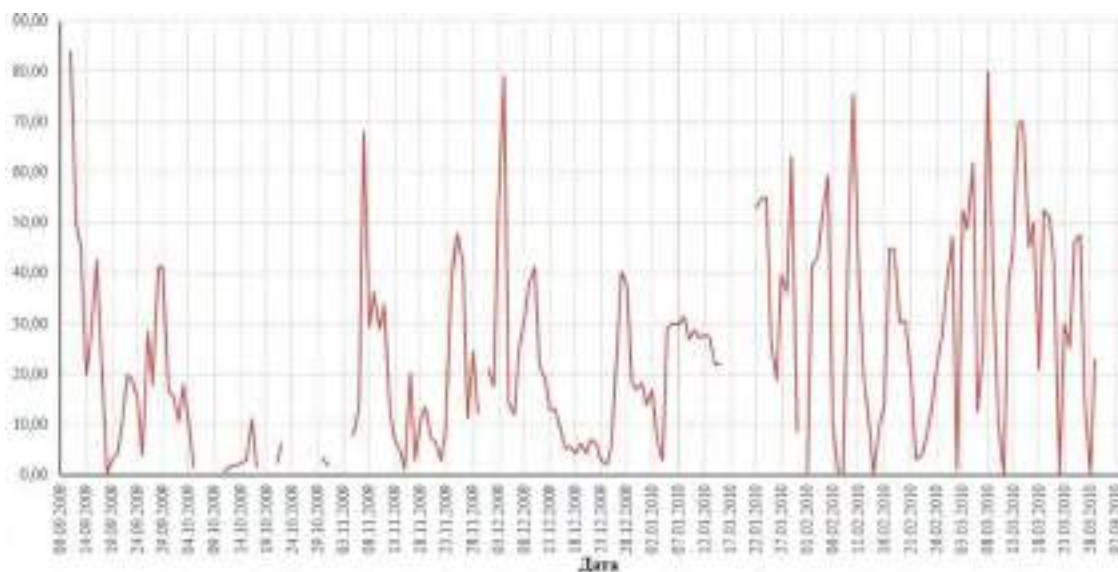


Рис 2.14 – Динаміка концентрації метану у видаленій з виробленого простору метаноповітряної суміші

Найбільші обсяги буріння свердловин мали місце при відпрацюванні ділянки виїмки при розташуванні дегазаційних свердловин в 3 ряди. На рис 2.15 представлена схема розташування свердловин у три ряди: основний ряд - на відстані близько 35 м від вентиляційної виробки (конвеєрний штрек) з відстанню між свердловинами 50 м; допоміжний ряд А – на відстані 30 м від повітроподавальної виробки (вентиляційний штрек) з відстанню між свердловинами порядку 120-150 м; допоміжний ряд Б – на відстані 70 м від повітроподавальної виробки (вентиляційний штрек) з відстанню між свердловинами порядку 150 м. Свердловини основного ряду підключалися до дегазаційної установки з номінальною продуктивністю 150 м³/хв, ск м³/хв.



Рис 2.15 – Викопування з плану гірничих робіт на ділянці шахти з розташуванням дегазаційних свердловин

В результаті виконаного аналізу ефективності роботи вертикальних дегазаційних свердловин були побудовані графіки динаміки концентрації метану (рис 2.16) та обсягів метану, що видаляється (рис 2.17) для кожного ряду вертикальних дегазаційних свердловин. Як видно з рис 2.16 метаноповітряні суміші, що видаються з виїмкових ділянок, характеризуються високими концентраціями метану, проте найбільші концентрації спостерігаються під час роботи основного ряду свердловин. Також слід зазначити, що сумарна ефективність роботи рядів свердловин А і Б може вважатися умовно постійною, оскільки збільшення концентрації метану в ряду А призводить до її зниження в

ряді Б і навпаки. Цей взаємозв'язок обумовлений наявністю зони інтенсивного газовиділення у виробленому просторі на деякій відстані від лави, внаслідок чого свердловини в межах даної зони характеризуються високою концентрацією метану, а за її межами – низькими. Чергування свердловин рядів А і Б призводить до попереминого виходу із зони (у міру поруху лави) тієї чи іншої свердловини у відповідному ряду.

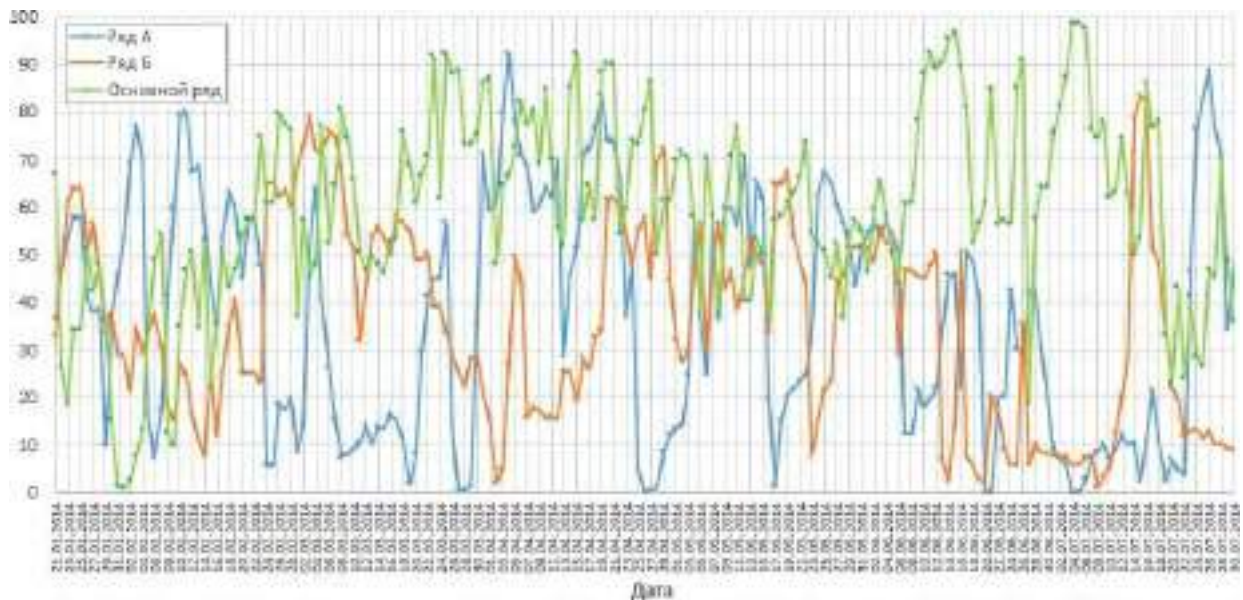


Рис. 2.16 – Динаміка концентрації метану у видаленій з виробленого простору метаноповітряної суміші

Аналіз графіків, представлених на рис 2.16 дозволяє зробити висновок про те, що основні обсяги метану (понад 50% всього газовиділення у виробленому просторі) припадають на роботу основного ряду свердловин у вентиляційній виробці.

Розглянуті графіки (рисунок 2.16 і 2.17) дозволяють зробити висновок, що робота рядів свердловин А і Б є взаємовиключною та з урахуванням незначних витрат метаноповітряної суміші у свердловинах цих рядів можна рекомендувати відмовитися від ряду А, робота якого характеризується найменшою ефективністю.



Рисунок 2.17 – Динаміка обсягів метану, що видаляється з виробленого простору, з використанням вертикальних дегазаційних свердловин

Аналогічний варіант дегазації представлений малюнку 2.18. На відміну від розглянутого варіанта (рис 2.14) даний варіант передбачає буріння двох рядів дегазаційних свердловин (рис 2.17): основний ряд – на відстані від вентиляційного штреку (вентиляційне вироблення) близько 30-40 м з відстанню між свердловинами 50; додатковий ряд - на відстані 20-30 м від конвеєрного штреку (повітряна вироблення) з відстанню між свердловинами порядку 70-80 м. Таким чином при відмові від третього ряду свердловин відстань між свердловинами в другому ряду істотно скорочується.



Рис. 2.18 – Викопування із плану гірничих робіт на ділянці з розташуванням дегазаційних свердловин

Зроблений висновок про низьку ефективність роботи дегазаційних свердловин, що розташовуються в ряду у виробництві повітря, що подає, дозволив рекомендувати зміщення даного ряду свердловин до центру і далі від центру в бік ряду свердловин у вентиляційної вироблення. У 2017-2018 роках на шахті за такою схемою здійснювалося буріння свердловин на ділянці виїмки 3 (рис 2.19). Як видно з малюнка при роботі лави довжина якої становила 262 м здійснювалося буріння двох рядів свердловин: основного ряду - на відстані порядку 35 м від вентиляційної виробки з відстанню між свердловинами 40 м і допоміжного ряду (А) на відстані від вентиляційної вироблення 120 м з відстанню між свердловинами 70 м. У кожному ряду в одночасній роботі знаходилося по дві свердловини, підключені до поверхневої дегазаційної установки з номінальною витратою $150 \text{ м}^3/\text{хв}$ (фактична витрата метаноповітряної суміші по свердловині становила $70\text{-}90 \text{ м}^3/\text{хв}$).



Рис. 2.19 – Викопування із плану гірничих робіт на ділянці з розташуванням дегазаційних свердловин

Аналіз ефективності роботи ПДУ при відпрацюванні запасів ділянки дозволив побудувати графіки (рис 2.20 і 2.21) зміни концентрації метану і зміни обсягів метану, що видаляється при розглянутій схемі розташування дегазаційних свердловин (рис 2.18).

Як видно з рис. 2.20 і 2.21 робота основного ряду дегазаційних свердловин характеризується більшою ефективністю, внаслідок чого обсяги метану, що видаляється, по основним свердловин перевищують на 10-20% обсяги метану по допоміжному ряду свердловин. Разом з тим величина відхилення є незначною і очікуваною з урахуванням відносно ближчого розташування свердловин допоміжного ряду до вироблення, що подає повітря.

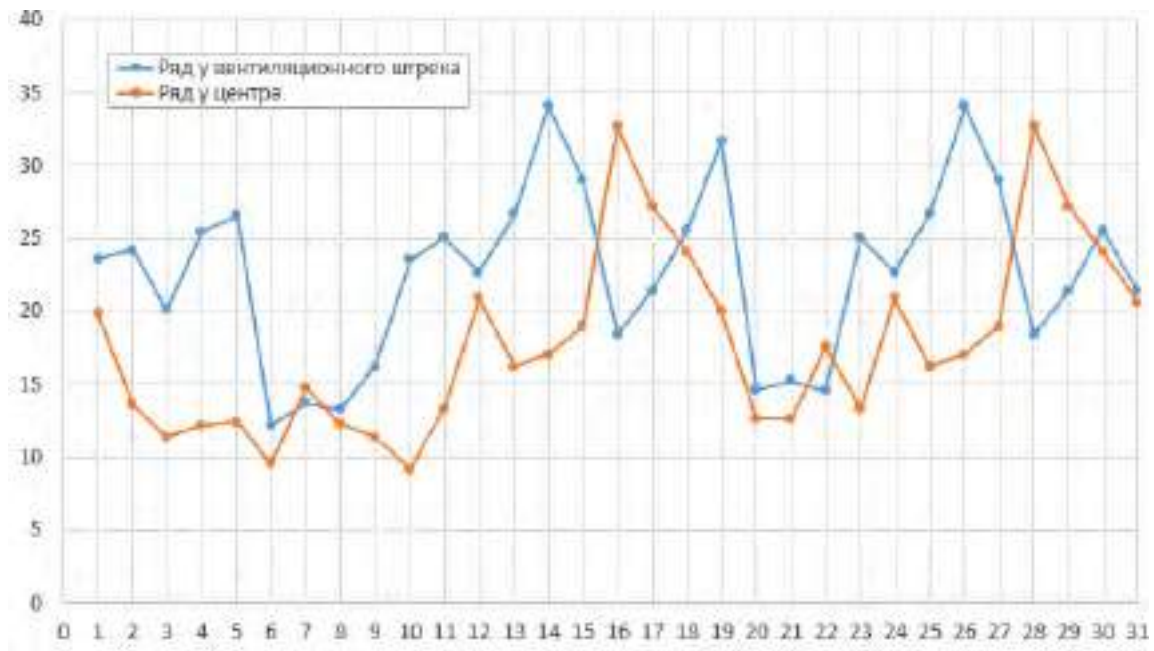


Рис 2.20 – Динаміка концентрації метану у видаленій з виробленого простору метаноповітряної суміші

Разом з тим відносно невисокі концентрації (від 2 до 35% при середніх значеннях 20%) та обсяги метану (від 30 до 80 м³/хв при середньому значенні 56 м³/хв, що видаляється з виробленого простору дегазаційними свердловинами, дозволяють зробити висновок про можливість зниження числа дегазаційних свердловин у допоміжному ряду або повній відмові від їх застосування.

Аналіз ефективності роботи дегазаційних свердловин при інтенсивному відпрацюванні пласта 50 на шахті ім. (рис. 2.22) також має високий нереалізований резерв, оскільки концентрація метану свердловин додаткового ряду, зміщеного від вентиляційної вироблення на 140 м протягом життєвого циклу свердловин, як правило, становить в середньому 20-25% при

максимальних значеннях близько 40%. У той же час основний ряд свердловин ряд свердловин, як правило, видає метаноповітряну суміш із середньою концентрацією метану 30-40% при максимальних значеннях до 65%.

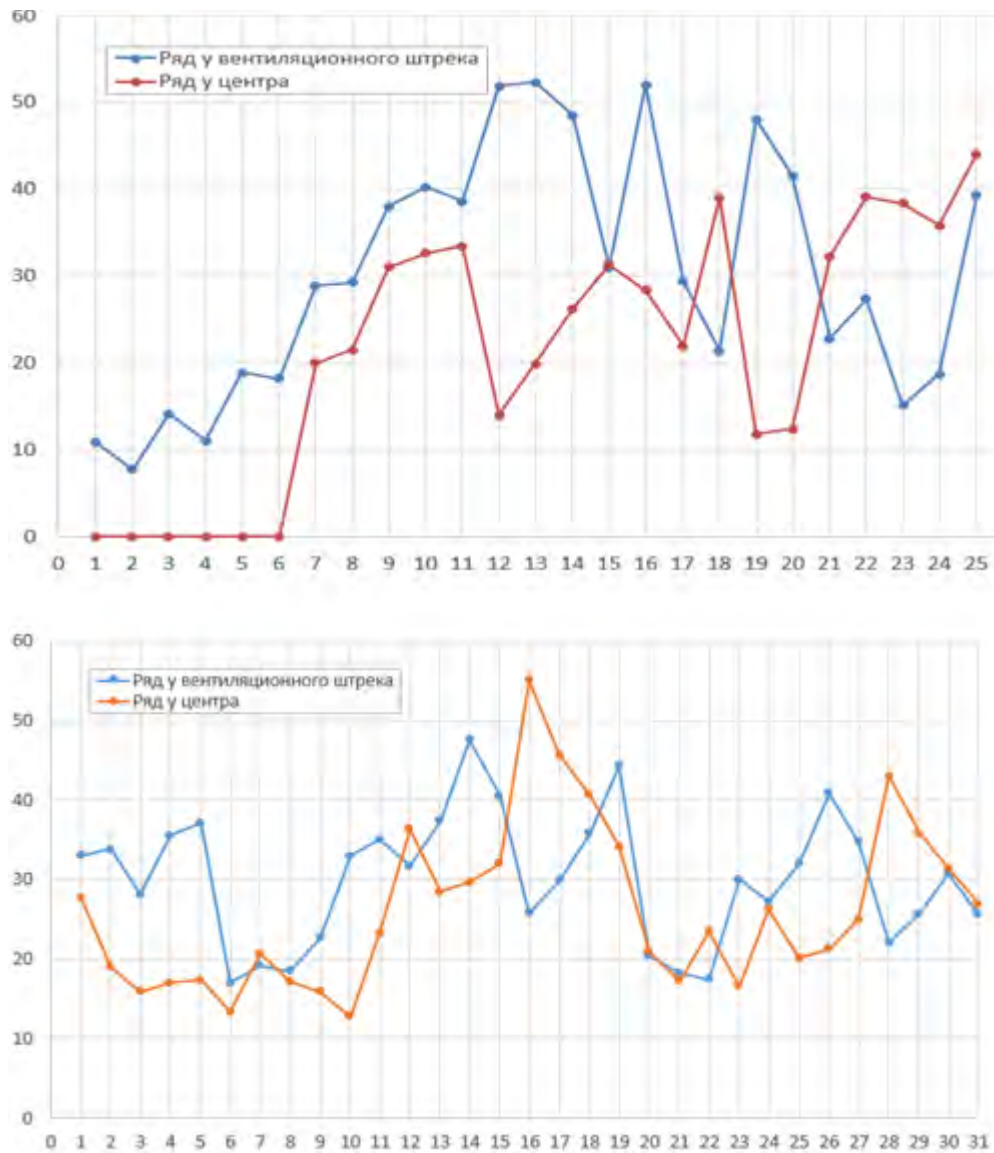


Рис. 2.21 – Динаміка обсягів метану, що видаляється з виробленого простору

Динаміка зміни концентрації метану протягом характерного життєвого циклу свердловин відповідного ряду представлена рис 2.23.

Таким чином, виконані шахтні дослідження підтвердили наявність значного надлишкового резерву в роботі дегазаційних свердловин та низьку ефективність роботи свердловин додаткового ряду, а також можливість та доцільність застосування схеми дегазації виробленого простору.



Рис 2.22 – Викопування із плану гірничих робіт по пласту

Свердловинами, пробуреними із земної поверхні, з розташуванням свердловин в одні ряд уздовж вентиляційного вироблення в умовах газоряби вироблених просторів до 90-100 м³/хв.

2.4 Оцінка впливу геологічної порушеності на метанообильність виїмкових ділянок

Питання управління газовиділенням у зонах геологічних порушень вимагають ретельного розгляду та вивчення, внаслідок своєї важливості та складності рішення.

Як характерний приклад роботи в зоні впливу геологічних порушень розглянемо ділянку виїмкового стовпа 52-10, представлену на рис 2.24, що характеризується наявністю декількох розривних порушень з амплітудою 0,9-2,0 м. масиву, викликаній різким підвищенням газопроникності вуглепородного масиву в зонах впливу геологічних порушень, а також зниженням деформаційно-міцнісних характеристик масиву, що зумовлює високу аварійність роботи дегазаційних свердловин.

Графік зміни газорясності, представлений на рис 2.25, наочно демонструє різке суттєве збільшення (в 2 рази і більше) газоряби виїмкової ділянки в зоні геологічних порушень.

На малюнку 2.26 представлено викопування з плану гірничих робіт за пластом, на якій представлена ділянка виїмкового стовпа, що характеризується наявністю цілого ряду геологічних порушень з амплітудою 0,75-1,5 м. Дані про газорясність виїмкового дільниці у період відпрацювання дільниці з порушеннями (грудень 2009-січень 2010 року) представлені на рис 2.27.



Рис. 2.24 – Викопування з плану гірничих робіт на ділянці високої геологічної порушеності з розташуванням дегазаційних свердловин



Рис. 2.26 – Викопування з плану гірничих робіт на ділянці високої геологічної порушеності з розташуванням дегазаційних свердловин

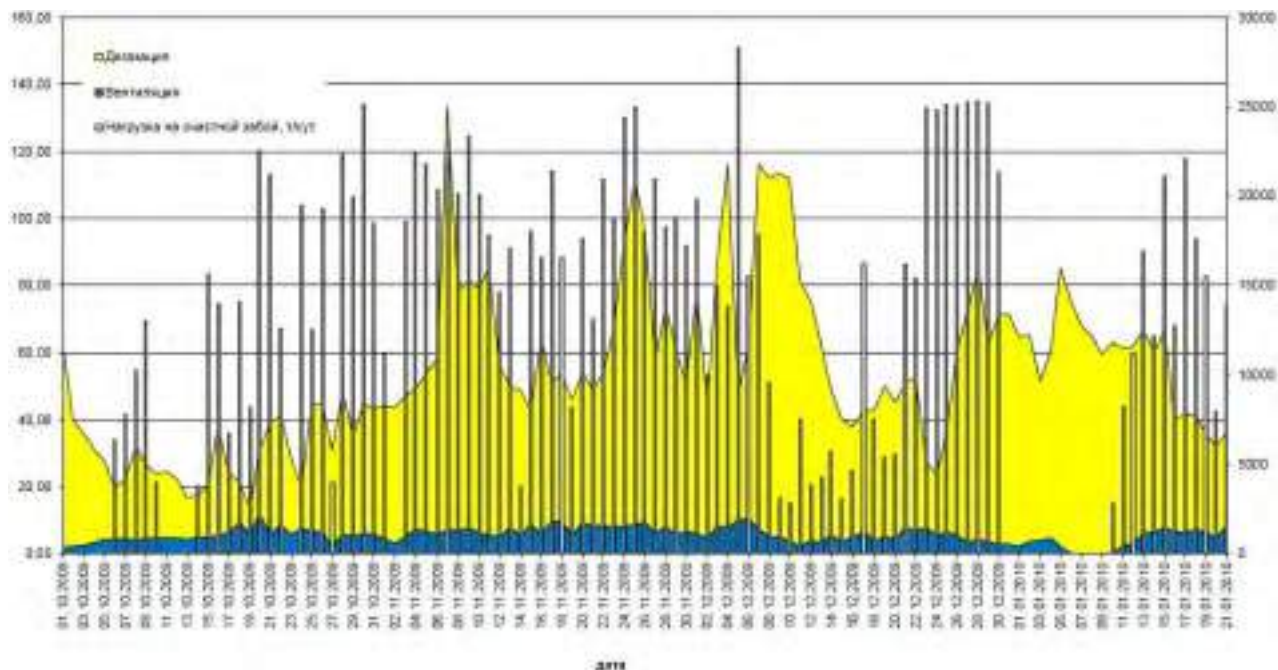


Рис. 2.27 – Динаміка газообильності виїмкової ділянки (за джерелами) у міру відпрацювання запасів виїмкової ділянки

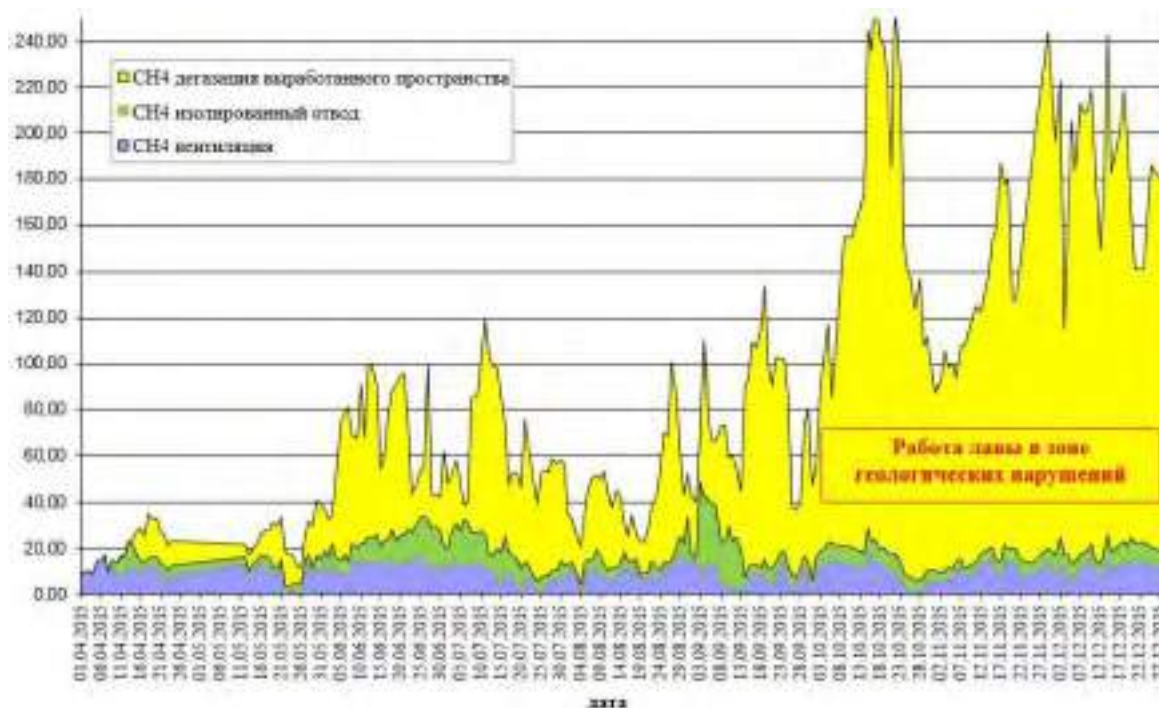


Рис 2.25 – Динаміка газорясності у міру відпрацювання запасів виїмкової ділянки

З малюнка 2.25 видно, що робота у зоні геологічних порушень супроводжується різким зниженням навантажень на очисний вибій та підвищенням газовиділення більш ніж у 2 рази. При цьому зупинка лави на

початку січня 2010 року. супроводжувалася зниженням обсягів газовиділення у лаві, але збереженням і навіть підвищенням обсягів газу, що видобувається з виробленого простору.

Слід також відзначити суттєвий вплив на газову обстановку виїмкових ділянок зміною фізико-механічних властивостей гірських порід синкліналі, що проходить через виїмкові ділянки, відпрацювання яких характеризувалася найбільшими обсягами газовиділення на виїмкових ділянках.

Таким чином, відпрацювання запасів у зонах геологічних порушень супроводжується суттєвим (в 2 рази і більше) підвищенням газовиділення у вироблений простір і вимагає зниження швидкостей просування очисних вибоїв для зменшення площ підробітку-надробітку в зонах підвищеної проникності масиву та інтенсивності газовиділення у вироблений простір. Для забезпечення ефективного управління газовиділенням на виїмкових ділянках при роботі в зонах геологічних порушень підвищується частота буріння свердловин дегазаційних для видалення значних обсягів метану і забезпечення можливості перемикання дегазаційних установок у разі переходу свердловин в аварійний стан.

2.5 Висновки з другого розділу

1. Виконані шахтні дослідження впливу інтенсивності відпрацювання запасів потужних газоносних пластів родовища на газорясність виїмкових ділянок дозволили зробити такі висновки:

- Газорясність виїмкових ділянок визначається газорясністю вироблених просторів, яка може досягати 150-210 м³/хв, у зв'язку з чим можливість інтенсивного відпрацювання запасів визначається ефективністю дегазації виробленого простору.

- Зниження інтенсивності відпрацювання аж до повної зупинки лави призводить до поступового – з відставанням у часі у кілька годин – зниження інтенсивності газовиділення у вироблений простір.

- обмеження навантаження, що спостерігаються, на очисний вибій пов'язані, в першу чергу, з низькою ефективністю ізолюваного відведення метаноповітряної суміші з використанням збійних дегазаційних свердловин, оскільки існуючі обмеження по концентрації метану в підземному газовідсмоктувальному трубопроводі (3,5%) не дозволяють при витратах метаноповітряної суміші порядку 15 -200 м³/хв забезпечити необхідну ефективність ізолюваного відводу і приводять при збільшенні навантаження на очисний вибій до перевищення допустимої концентрації метану в «кутку» і в газовідсмоктувальному трубопроводі.

- Аналіз досвіду відпрацювання пласта 50 показує, що зняття обмежень навантажень на очисні вибої може бути забезпечене при використанні ізолюваного відведення метаноповітряної суміші з використанням вентиляторів УВЦГ та газовідсмоктувальних трубопроводів, заведених за перемичку, встановлену в найближчій до лави вентиляційної збійки.

2. Аналіз ефективності роботи дегазаційних свердловин за різних схем їх розташування дозволив зробити такі висновки:

- Найбільшою ефективністю роботи характеризуються свердловини, що розташовуються вздовж вентиляційного вироблення, а найменшою – свердловини, що розташовуються вздовж повітроподаючого вироблення.

- Ефективність роботи свердловин, розташованих ближче до центру стовпа виїмки підвищується в міру їх зсуву щодо центру лави у бік вентиляційного вироблення.

- Схеми розташування дегазаційних свердловин у два ряди, що застосовуються при відпрацюванні потужних пластів Соколовського родовища при газорясності вироблених просторів до 90-100 м³/хв, мають значний

надлишковий резерв і їх застосування характеризується низькою ефективністю роботи додаткового ряду свердловин і високими витратами на буріння.

- схеми розташування свердловин, що застосовуються в умовах відпрацювання потужних пластів Соколівського родовища, характеризуються значним різноманітністю варіантів розташування дегазаційних свердловин та показників ефективності їх роботи, що зумовлює необхідність дослідження впливу їх розташування та параметрів дегазації на ефективність управління газовиділенням на ділянці виїмки.

3. Відпрацювання запасів виїмкових стовпів на ділянках підвищеної геологічної порушеності супроводжується істотним (в 2 рази і більше) підвищенням газообильності виїмкової ділянки за рахунок зростання газовиділення у вироблений простір обумовленого збільшенням газової проникності вуглецевого масиву, що вміщує розроблюваний пласт.

5. Для забезпечення ефективного управління газовиділенням на ділянках виїмкового стовпа, що характеризуються підвищеною геологічною порушеністю, слід передбачити збільшення частоти буріння вертикальних дегазаційних свердловин у додатковому ряду для забезпечення надійного видалення метану з виробленого простору та підвищення продуктивності дегазації для забезпечення її необхідної ефективності.

РОЗДІЛ 3 КІЛЬКІСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ УПРАВЛІННЯ ГАЗОВИДІЛЕННЯМ

3.1 Вибір та обґрунтування аерогазодинамічних моделей для проведення чисельних досліджень

Для обґрунтування параметрів схем дегазації виробленого простору використовували методи обчислювальної газодинаміки (програмний продукт Ansys CFX). Ефективність застосування програмного комплексу Ansys на вирішення завдань визначення раціональних параметрів схем дегазації відзначалася багатьма авторами [33, 34]. Тривимірною аерогазодинамічною моделлю виїмкової ділянки, розроблена на базі підходів інших авторів [18-12, 15-16], реалізована в масштабі 1:1 і включає (рис 3.1): очисний вибій, вироблений простір, дільничні підготовчі вироблення, примикання вибою, вертикальні дегазаційні свердловини, горизонтальні свердловини, пробурені через цілу вугілля з паралельного вироблення. Метанообильність виїмкової ділянки задавалася шляхом завдання рівномірної витрати метану з очисного вибою пласта, що підробляється і надроблюваного масиву (рис 3.1). Обсяги метановиділення за джерелами задавалися відповідно до розрахункових (параграф 1.3) та фактично встановлених значень (глава 2).

Слід наголосити на необхідності завдання різної проникності виробленого простору, яка підкреслюється багатьма дослідниками [18, 19, 15, 16]. У моделі проникність ділянки виробленої простору за лавою досягала величини $5 \cdot 10^6 \text{ м}^2$, а в іншому виробленому просторі знижувалася до $3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$. Проникність зони виробленого простору, що примикає до лави, значно впливає на ефективність дегазації та вентиляції, оскільки визначає величину витоків повітря [18, 19]. Шахтні спостереження показали наявність залишкового перерізу вироблення за лавою, вільного для проходження повітря, що значно впливає на аеродинамічні процеси і враховувалося при розробці моделі шляхом завдання різної проникності погашених за лавою дільничних виробок. Проникність

погашеної вентиляційної виробітку в моделі мала значно більшу величину, що обумовлювалося як її погашенням на кордоні в умовах масив-виробленого простору, в порівнянні з погашеною в умовах ціле-вироблений простір повітроподаючою виробкою, а також використанням кріплення посилення для збереження залишкового перерізу погашеного вироблення досягала значень $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Аналіз раніше виконаних досліджень показав доцільність моделювання за лавою лише частини виробленого простору, довжиною 300 м [18-12]. Оскільки саме у цій частині виробленого простору відбувається найбільш активне метановиділення, а також рух повітряних потоків при застосуванні комбінованої схеми провітрювання. Виконаними шахтними дослідженнями було встановлено обмежену протяжність зони активного метановиділення близько 90-140 м за межами.

Яка робота свердловин характеризується видаленням метаноповітряної суміші з концентрацією порядку 2-5%. У цьому зв'язку при моделюванні газовиділення з масивів, що підробляється і надробляється, в зоні активного метановиділення перевищувало газовиділення в інших зонах в 15 разів. Положення зони активного газовиділення ставилося з відставанням від лави до кроку обвалення основної покрівлі 40 м, а загальна довжина зони - 120 м.

На початковому етапі було виконано моделювання існуючих схем дегазації. Як приклад результатів такого моделювання на малюнку 3.2 представлені поля розподілу метану на ділянці 52-09 при відпрацюванні з використанням трьох рядів дегазаційних свердловин (рис 2.14). Результати моделювання (рис 3.2) повністю відповідають результатам шахтних спостережень, представлених на рис 2.15 та 2.16.

Після чого було здійснено коригування параметрів моделі (проникності виробленого простору) для досягнення відповідності реальним шахтним даним.

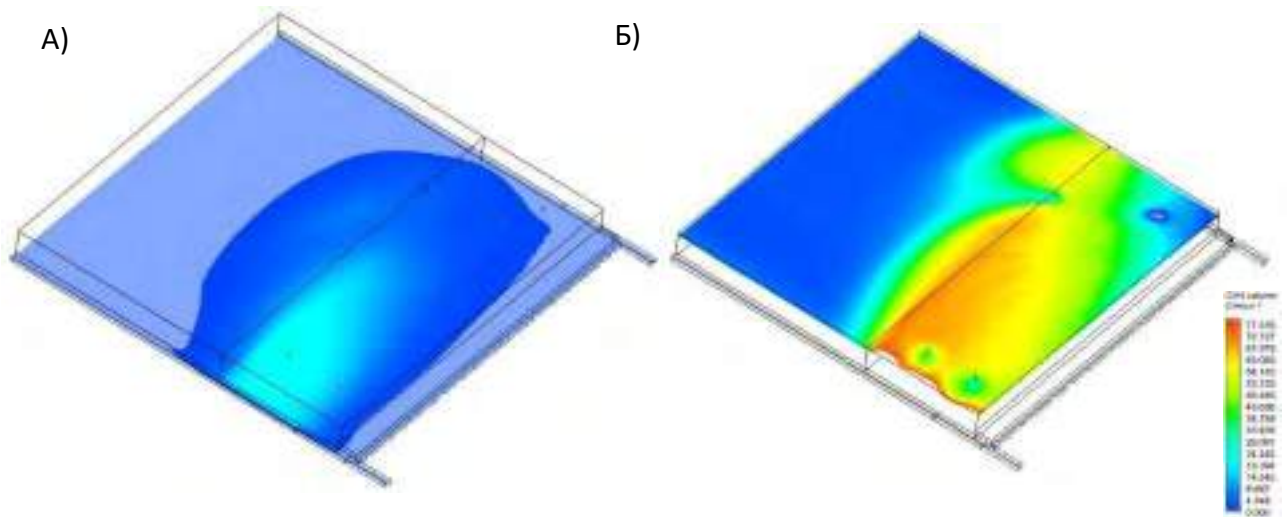


Рис 3.2 – Поля концентрацій метану на ділянці виїмки: А) 2 м від ґрунту пласта; Б) 22 м від ґрунту пласта

3.2 Чисельні дослідження впливу параметрів технологічних схем на ефективність керування газовиділенням

В результаті виконаних з використанням розроблених аерогазодинамічних моделей чисельних досліджень отримані поля концентрації метану, кисню, швидкостей повітря, а також шляхи руху повітря у виробках виїмкової ділянки та у виробленому просторі при різних параметрах схем дегазації та ізолюваного відведення. При виконанні досліджень застосовувалися дві основні розрахункові схеми, які принципово відрізняються способами ізолюваного відведення метаноповітряної суміші: з використанням сбоечних свердловин (рис. 3.1) та із застосуванням ізолюваного відведення через задню вентиляційну збірку із застосуванням вентиляторів УВЦГ-9.

Виконані дослідження показали можливість реалізації схеми дегазації виробленого простору з використанням одного ряду свердловин, зміщених щодо відведення повітря на 30 м в поєднанні з ізолюваним відведенням метану з використанням сбоечних свердловин з витратою метаноповітряної суміші до 200 м³/хв при газообильності до 75 м³/хв. Подальше збільшення газорясності

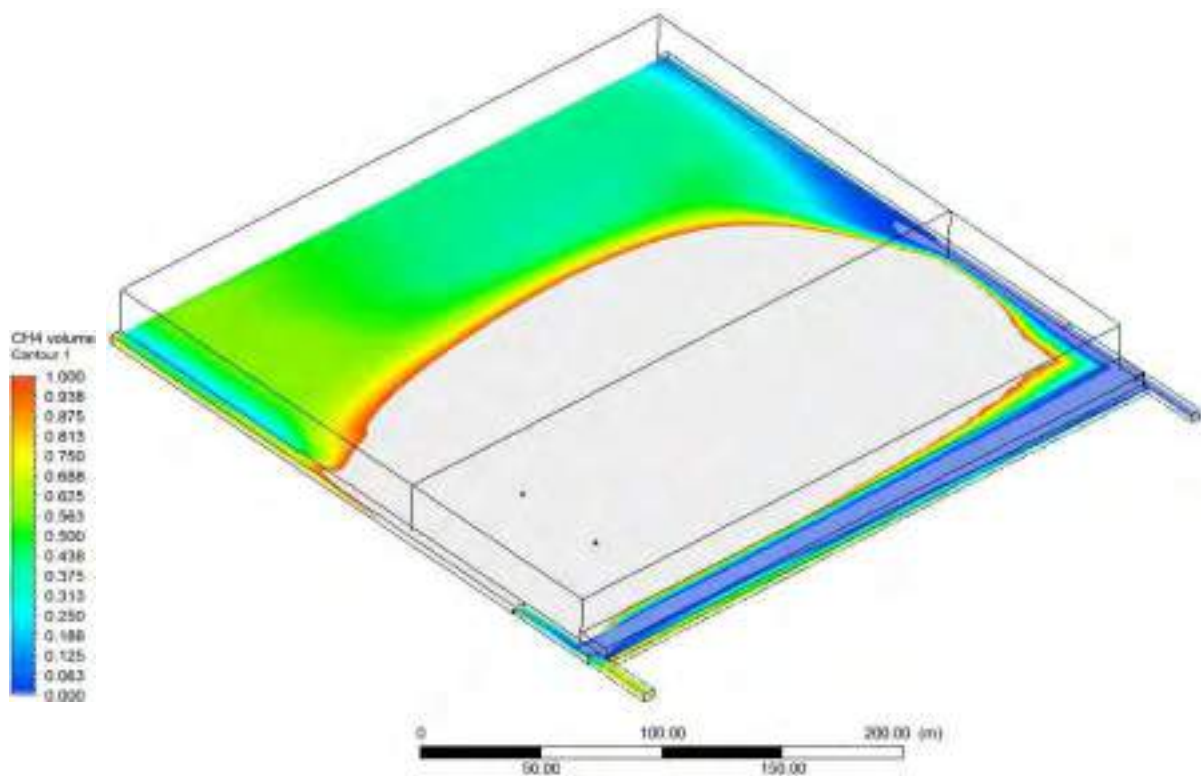
виробленого простору призводить до перевищення допустимої концентрації в підземному дегазаційному трубопроводі (ізолюваний відвід).

Розглянемо як приклад фрагменти результатів досліджень для наступних умов: обсяг повітря, що подається на ділянку виїмки $2300 \text{ м}^3/\text{хв}$; витрата метаноповітряної суміші на ізолюваний відвід $200 \text{ м}^3/\text{хв}$, витрата метаноповітряної суміші – $150 \text{ м}^3/\text{хв}$ на свердловину (дві свердловини у роботі). На рис 3.3, А як приклад представлено розподіл метану з концентрацією до 1% в межах перерізу паралельного напластування на висоті 2 м від ґрунту пласта. Як видно з малюнка 3.3, а в межах дільничних виробок концентрація метану менше 1%. Концентрація метану на вихідній лаві становить 0,65%, у газовідсмоктувальному трубопроводі – 2,75%, у кутку – 0,75%. Концентрація метану у вертикальних дегазаційних свердловинах 20 та 24% відповідно.

Витрата повітря близько $3000 \text{ м}^3/\text{хв}$ є гранично допустимим при аналізованих параметрах схеми провітрювання, потужності пласта, що виймається, і застосовуваного в лаві обладнання. Можливість подачі такого обсягу повітря підтверджується як результатами шахтних досліджень, так і результатами чисельних досліджень (рис. 3.5)

Враховуючи, що при управлінні покрівлею повним обваленням коефіцієнт, що враховує рух повітря в частині виробленого простору, що безпосередньо прилягає до привибійного простору, становить 1,25-1,3 вважаємо за доцільне прагнути величини сумарної витрати ізолюваної витрати та дегазації близько 30% від обсягу повітря, вступника на виїмкову ділянку.

Застосування ефективного ізолюваного відведення, на нашу думку, є обов'язковою умовою ефективного газоправління на виїмковій ділянці при відпрацюванні газоносних пластів, схильних до самозаймання, оскільки поворотно-схемою провітрювання є необхідність виключення повернення в очисний вибіт частини повітря, що рухається по виходу.



Б)

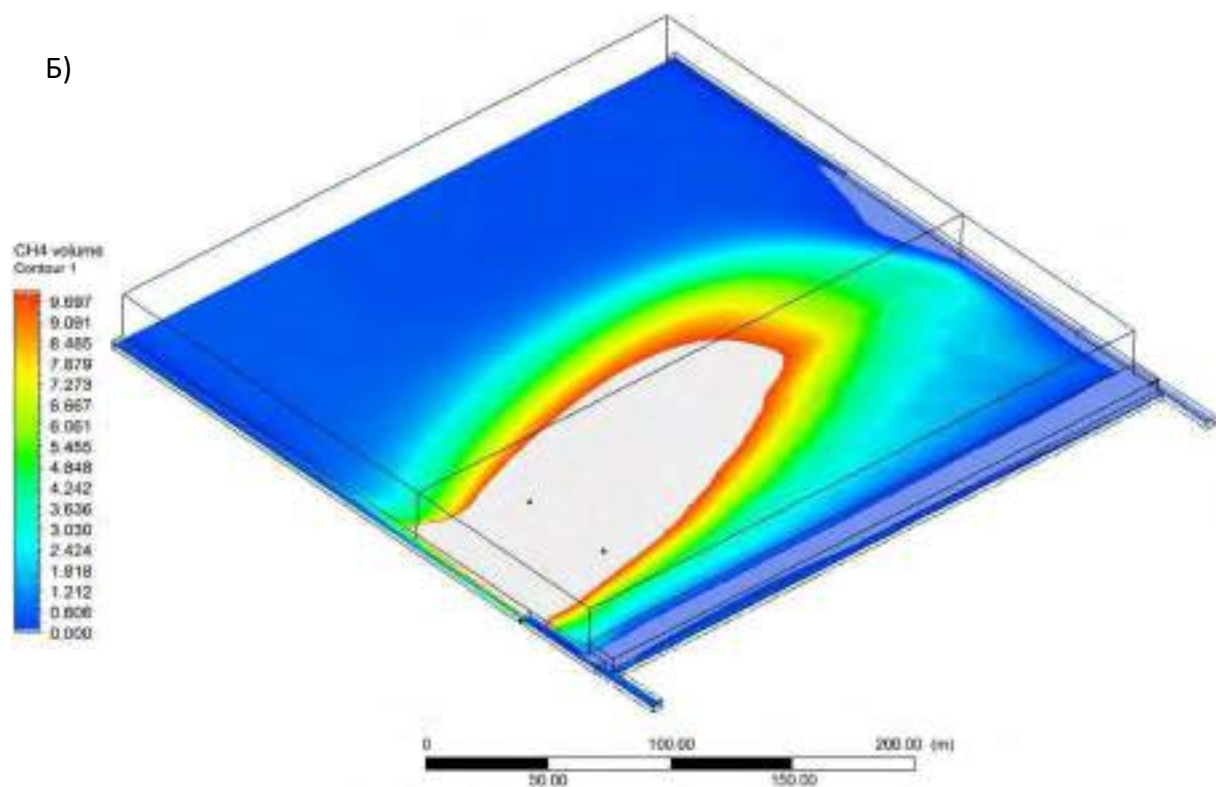


Рис. 3.3 – Поля концентрацій метану (у площині напластування на висоті 2 м від ґрунту пласта): А) у діапазоні 0-1%; Б) у діапазоні 0-10%

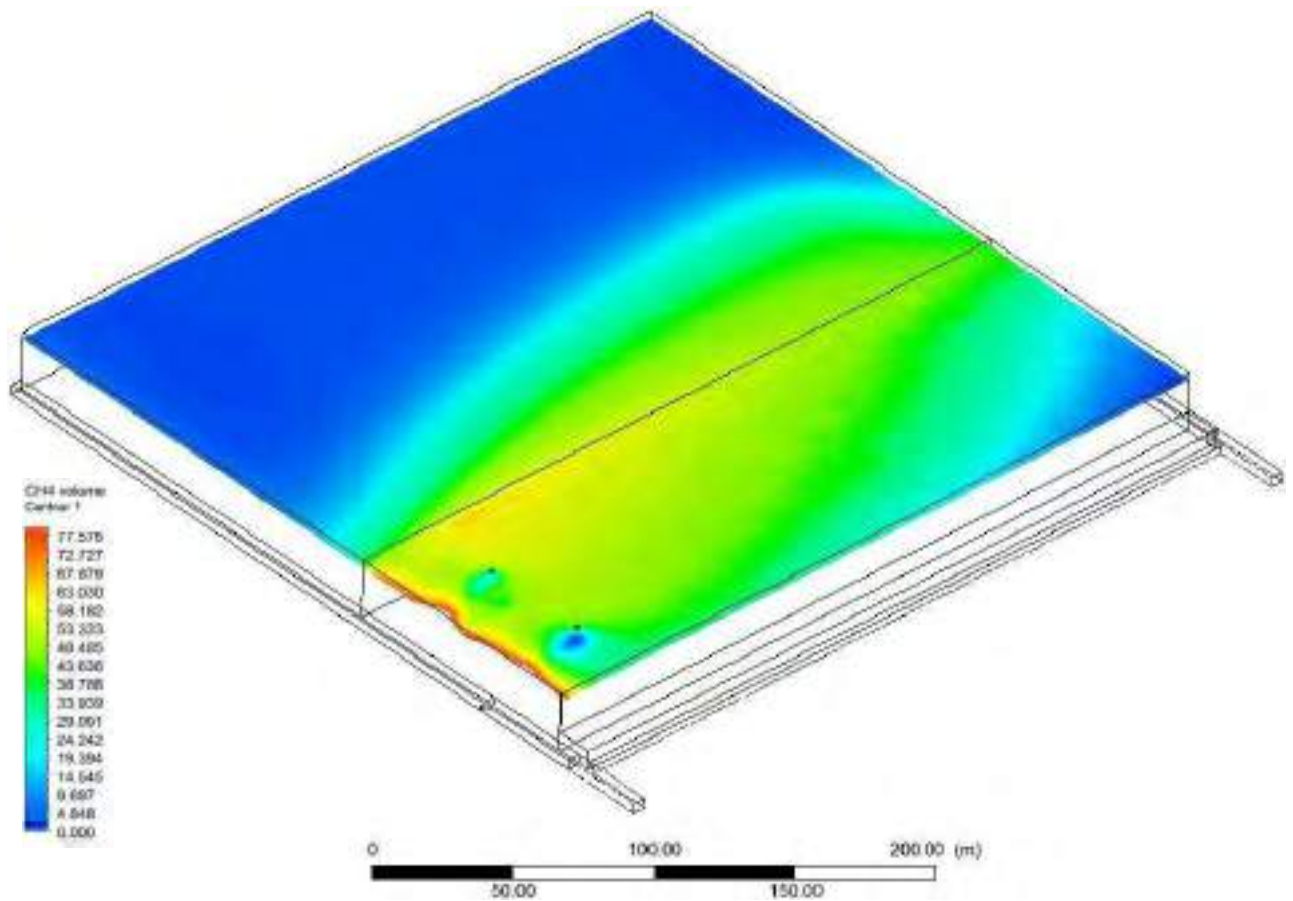


Рис. 3.4 – Поля концентрацій метану в діапазоні 0-80% (у площині на висоті 22 м від ґрунту пласта)

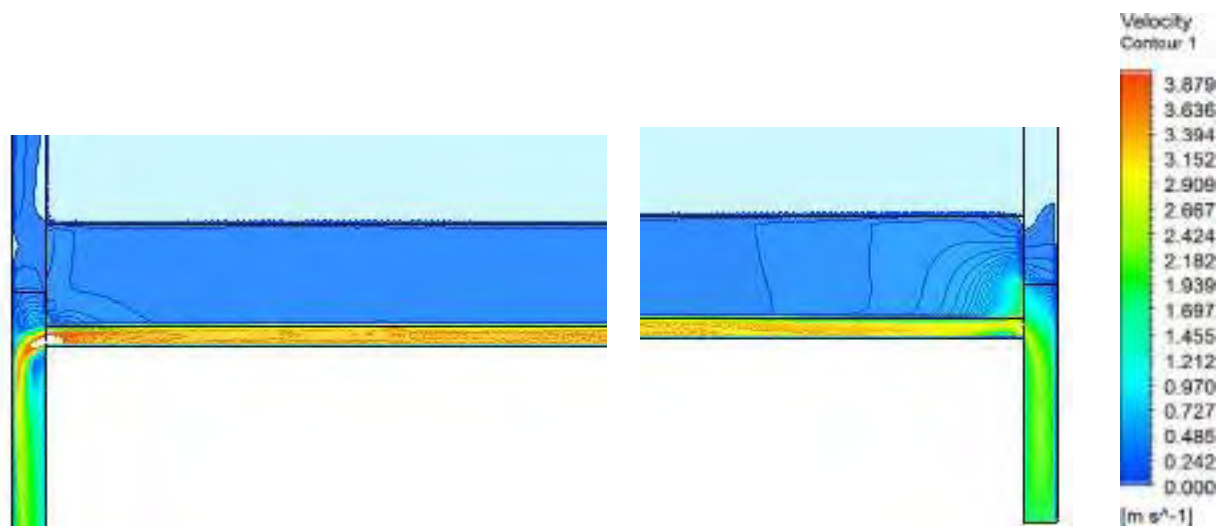


Рис. 3.5 – Поля швидкостей руху повітря в лаві: А) струмінь, що виходить з лави; Б) свіжий струмінь

Застосування двох вентиляторів УВЦГ-9 забезпечують видалення до 700 м³/хв метаноповітряної суміші з концентрацією до 3,5%, чотирьох вентиляторів.

– до 1400 м³/хв, що суттєво розширює можливості ізолюваного відведення та підвищує його ефективність. При застосуванні ізолюваного відведення з високими витратами метаноповітряної суміші витрата повітря на виїмковій ділянці може досягати 3600 м³/хв.

Слід зазначити, що успішний досвід застосування одного ряду дегазаційних свердловин є в Австралії та США, де дегазаційні свердловини також розташовувалися з боку вироблення повітря, що відводить.

На рис 3.6 представлені поля концентрацій метану в перерізі паралельному напластуванню пласта, проведеному на висоті 2 м від ґрунту при використанні ізолюваного відведення метаноповітряної суміші з використанням двох газовідсмоктувальних вентиляторів УВЦГ-9 (витрата 1000 м³/хв) у разі відставання заведення газовідсмоктувальні трубопроводи на відстань 220 м від лави. Об'єми вентиляції, дегазації та ізолюваного відводу, що видаляється засобами, досягли 98 м³/хв.

На рис 3.7 представлені лінії струму основних повітряних потоків, що надходять відповідно в газовідсмоктуючий трубопровід, заведений за перемичку (ізолюваний відвід) і в дегазаційні свердловини при відстані між скоїнами 220 м. Як видно з рис 3.7 основні потоки, що надходять на ізолюваний свердловини, що рухаються в частині приви́бійного простору, що примикає до лави. Таким чином здійснюється надійна ізоляція приви́бійного простору лави від метану, що виділяється у вироблений простір з масиву, що підробляється і надробляється.

Слід зазначити, що на малюнку 3.7, а видно, що метаноповітряна суміш, що надходить на ізолюваний відвід формується не тільки потоками, що рухаються від лави, а й потоками, що надходять з погашеної частини вентиляційної виробки, що знаходиться за найближчою вентиляційною збійкою, а також з виробленого простору, що пояснює необхідність скорочення відстані між збійками для виключення надходження метано сумішей з підвищеною концентрацією, а також визначає необхідність збереження залишкового перерізу вентиляційного вироблення зниження її аеродинамічного опору.

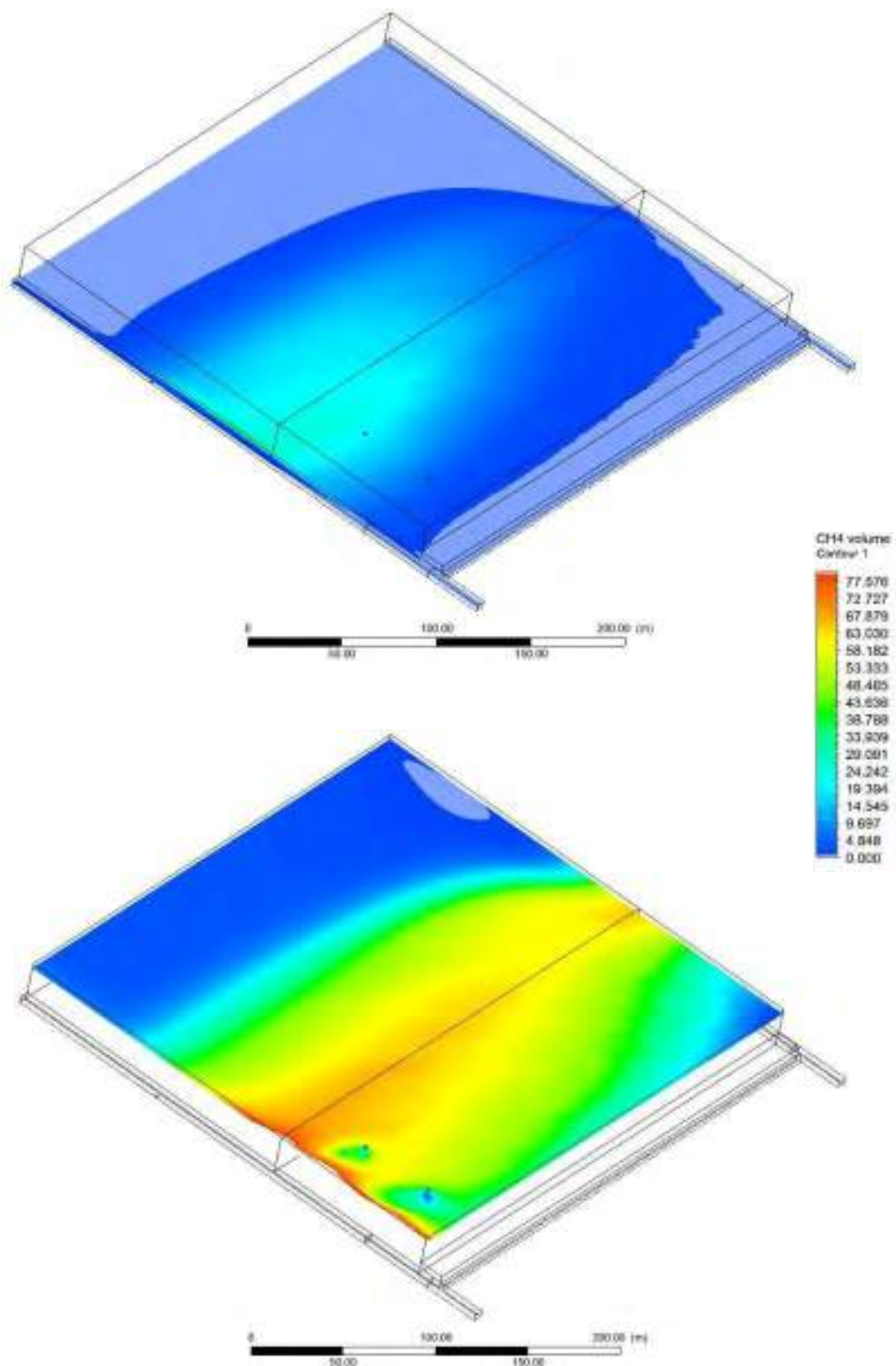


Рис. 3.6 – Поля концентрацій метану при відставанні вентиляційної збіжки від лави 220 м: А) 2 м від ґрунту пласта; Б) 22 м від ґрунту пласта

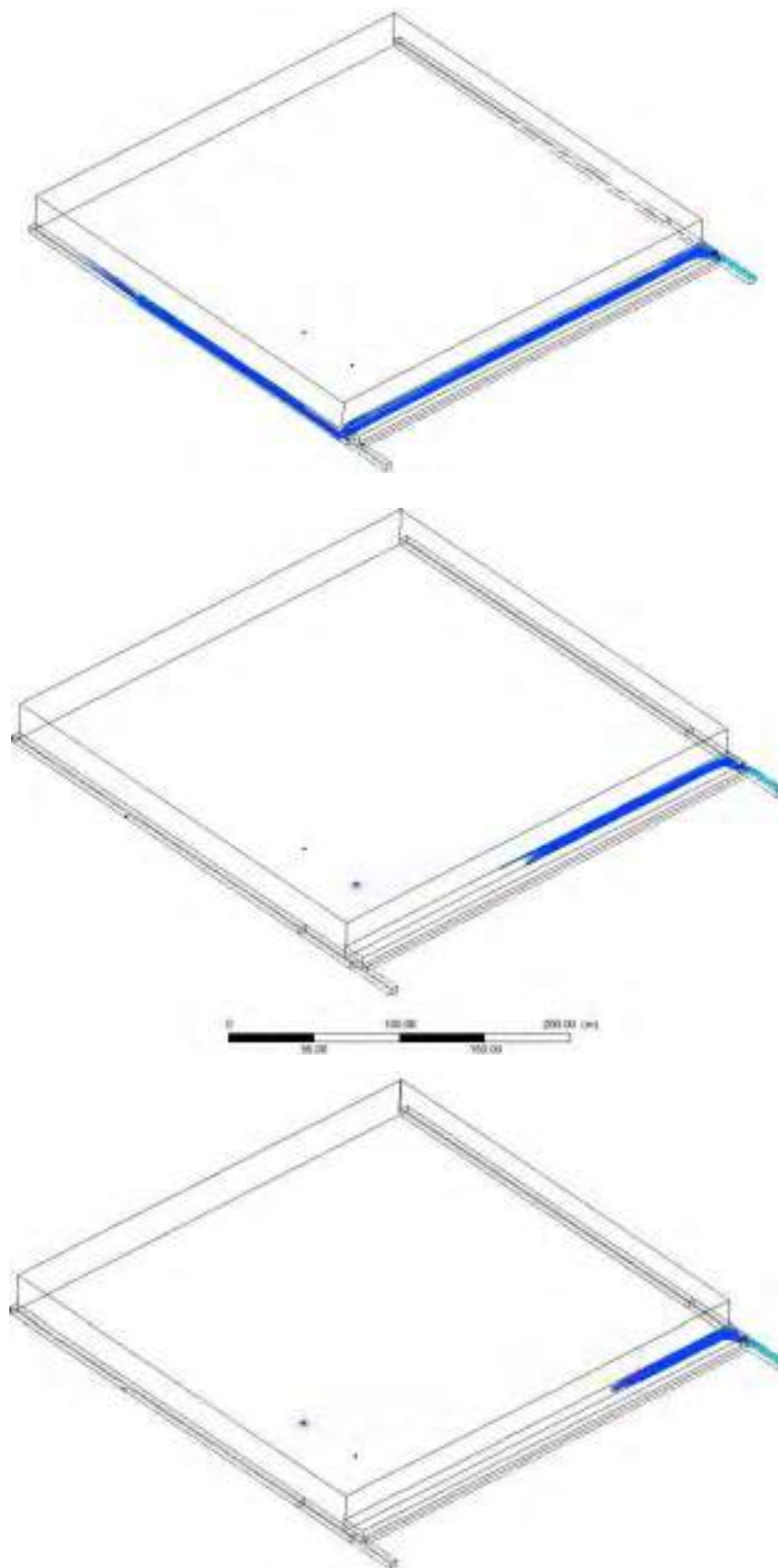


Рис. 3.7 – Лінії струму для основних повітряних потоків виїмкової ділянки: А) ізольоване відведення до задньої збоки; Б) та В) відповідно до 1-ї та 2-ї від лави дегазаційним

В результаті досліджень встановлено вплив параметрів схеми дегазації та різних схем ізолюваного відведення на ефективність управління газовиділенням. Оцінка ефективності управління визначалася за кількістю газу, що видаляється засобами дегазації та вентиляції та концентрації метану на відповідних відповідальних ділянках: вихідна з лави, куток, концентрація метану газівідвідному трубопроводі.

Результати виконаних досліджень, а також параметри схем провітрювання, дегазації та ізолюваного відведення, що приймаються як вихідні дані, зведені в таблицю 3.1. Як видно з таблиці 3.1 можливості видалення метану при використанні тільки одного ряду свердловин обмежені у зв'язку з чим ефективність газоправління визначається, насамперед, ефективністю ізолюваного відведення: витратами метаноповітряної суміші та, при використанні вентиляторів УВЦГ-9, відстанню між вентиляційними збійками, за перемички яких заведений газовідсмоктувальний трубопровід. З таблиці 3.1 також видно, що збільшення відстані між збійками призводить до збільшення концентрації метану в газовідсмоктувальному трубопроводі.

В результаті досліджень для забезпечення ефективного управління газовиділенням при відпрацюванні потужних газоносних пластів “50” та “52” в умовах шахти ім.В.Д.Ялевського рекомендовано на глибинах до 400 м поза зонами геологічних порушень застосування дегазації виробленого простору з одним рядом дегазаційних свердловин при умови забезпечення ефективного ізолюваного відведення з витратами метаноповітряної суміші не менше 600 м³/хв при відстані між вентиляційними збійками до 220 м. Необхідна витрата ізолюваного відводу визначається фактичною газообильністю виїмкової ділянки.

3.3 Висновки з третього розділу

1. Виконані чисельні дослідження впливу схеми розташування вертикальних дегазаційних свердловин на ефективність управління газовиділенням у вироблення виїмкових ділянок дозволили зробити такі основні висновки:

- Розташування ряду дегазаційних свердловин вздовж вентиляційного вироблення з одночасною роботою не менше двох свердловин з витратою на кожен свердловину не менше $80 \text{ м}^3/\text{хв}$ є необхідною умовою забезпечення ефективної дегазації виробленого простору (видалення максимальних обсягів метану) при відпрацюванні світ газоносних вугільних пластів.

- Ефективність роботи додаткового ряду дегазаційних свердловин знижується в міру їх зміщення у бік повітроподаючого вироблення, у зв'язку з чим у разі необхідності підвищення ефективності дегазації може бути рекомендовано розташування додаткового ряду дегазаційних свердловин по центру стовпа виїмки або зі зміщенням від центру в бік вентиляційних виробок. Параметри дегазаційних свердловин: діаметр свердловин, відстань між свердловинами та витрата повітря визначаються метанообильністю виробленого простору.

2. Виконані чисельні дослідження показали можливість забезпечення ефективного управління газовиділенням при відпрацюванні потужних газоносних пластів поза зонами геологічних порушень із застосуванням дегазації виробленого простору з одним рядом дегазаційних свердловин при газообильності вироблених просторів 3 хв за умови забезпечення ефективного ізольованого відведення метаноповітряної суміші понад $600 \text{ м}^3/\text{хв}$ [24].

3. Збільшення метанообильності вироблених просторів виїмкових ділянок понад 120 м^3 в хвилину в зонах впливу геологічних порушень, а також зниження стійкості свердловин у зазначених зонах зумовлюють необхідність

застосування додаткового ряду свердловин, що розташовується в центрі виїмкового стовпа (або зі зміщенням у бік вентиля) один від одного 80 м [24].

4. Досягнення гранично допустимої концентрації метану в дегазаційному трубопроводі при ізолюваному відведенні метаноповітряної суміші через свердловини є основним обмежуючим фактором для ефективного управління газовиділенням із застосуванням одного ряду дегазаційних свердловин [24].

5. Для забезпечення ефективного управління газовиділенням у виробленні виїмкової ділянки при використанні схеми дегазації виробленого простору, що рекомендується, з одним рядом дегазаційних свердловин у широкому діапазоні гірничо-геологічних умов родовища необхідно забезпечити підвищення витрати повітря на ізолюваний відвід метаноповітряної суміші. Підвищення витрати повітря до $600 \text{ м}^3/\text{хв}$ і більше за рахунок застосування двох дегазаційних трубопроводів, заведених за перемичку в задній вентиляційній збійці та підключених до окремих вентиляторів УВЦГ-9 забезпечує ефективне керування газовиділенням при реалізації схеми розташування дегазаційних свердловин в один ряд.

ВИСНОВОК

Дисертація є закінченою науково-кваліфікаційною роботою, в якій міститься вирішення актуального завдання обґрунтування параметрів технологічних схем інтенсивного відпрацювання потужних пологих газonosних схильних до самозаймання вугільних пластів, що забезпечують ефективність та безпеку ведення очисних робіт.

Основні наукові та практичні результати виконаних досліджень:

1. Інтенсивне відпрацювання потужних газonosних схильних до самозаймання вугільних пластів зі зняттям обмежень навантажень на очисний вибій по газовому фактору на глибинах до 600 м може бути забезпечене при застосуванні комбінованої схеми провітрювання виїмкових ділянок з ефективним ізолюванням відведенням метаноповітряної суміші по обмеженій простору вертикальними свердловинами, пробуреними із земної поверхні. Параметри схем підготовки та управління газовиділенням при цьому повинні визначатися з урахуванням газорясності вироблених просторів виїмкових ділянок у конкретних гірничо-геологічних та гірничотехнічних умовах.

2. Застосування способу дегазації виробленого простору дегазаційними свердловинами, що пробурені з земної поверхні, характеризується високою вартістю буріння. Вартість буріння дегазаційних свердловин на виїмкових ділянках шахт, що відпрацьовують потужні пласти родовища на великих глибинах порівнянна, та перевищує вартість проведення комплексу дільничних підготовчих виробок.

3. В заданих умовах ефективне управління газовиділенням при відпрацюванні потужних газonosних пластів поза зонами геологічних порушень із застосуванням комбінованої схеми провітрювання забезпечується при дегазації виробленого простору одним рядом дегазаційних свердловин, при одночасної роботі двох дегазаційних свердловин за умови забезпечення ефективного ізолюваного відведення метаноповітряної суміші [24].

4. Збільшення метанообильності вироблених просторів виїмкових ділянок понад 120 м^3 на хвилину в зонах впливу геологічних порушень, а також зниження стійкості свердловин у зазначених зонах зумовлюють необхідність застосування додаткового ряду свердловин, що розташовуються в центрі виїмкового стовпа (або зі зміщенням у бік вентиляції один від одного 80 м [24].

5. "Досягнення гранично допустимої концентрації метану в газовідсмоктувальному трубопроводі при ізольованому відведенні метаноповітряної суміші через сбосєчні свердловини є основним обмежуючим фактором для ефективного управління газовиділенням із застосуванням дегазації виробленого простору з одним рядом дегазаційних свердловин" [24].

6. При інтенсивному відпрацюванні потужних пологих газоносних схильних до самозаймання вугільних пластів необхідною умовою зняття обмежень навантажень на очисний вибій за газовим фактором є ефективно застосування ізольованого відведення метаноповітряної суміші, яке забезпечується при відведенні через задню збійку, що відстає. 220 м [24]. При цьому витрата метаноповітряної суміші визначається газообильністю виїмкової ділянки та ефективністю роботи дегазаційних свердловин.

7. Підвищення витрати метаноповітряної суміші при ізольованому відводі через задню збійку понад $600 \text{ м}^3/\text{хв}$ і більше забезпечує ефективне управління газовиділенням при реалізації схеми розташування дегазаційних свердловин, що рекомендується, може бути забезпечене за рахунок застосування вентиляторів УВЦГ-9 [24].

8. Якість базового варіанта технологічної схеми інтенсивного відпрацювання потужних пологих газоносних вугільних пластів рекомендується варіант, що передбачає роботу шахтного поля на виїмкові ділянки з довжиною лави 250-400 м, довжиною стовпа виїмки до 6,5 км, підготовку виїмкової ділянки спареними виробками з проведенням вентиляційних збіжок між ними на відстані не більше 220 м, застосування комбінованої схеми провітрювання з ізольованим відведенням метаноповітряної суміші через найближчу задню збійку з використанням двох газовідсмоктувальних трубопроводів прокладених від

дегазаційних свердловин, пробурених з використанням одного ряду свердловин дегазаційних при одночасній роботі двох дегазаційних свердловин. Параметри провітрювання та ізольованого відведення при застосуванні технологічної схеми, що рекомендується, визначаються газообильністю виїмкової ділянки.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Black D.J. Review of coal and gas outburst in Australian underground coal mines // International Journal of Mining Science and Technology. 2019.
2. Bondarenko V. [и др.]. Technological safety of sustainable development of coal enterprises // Mining of Mineral Deposits. 2017. № 2 (11). С. 1–11.
3. Frederiksen T. Corporate social responsibility, risk and development in the mining industry // Resources Policy. 2018. (59). С. 495–505.
4. Kelly J.E. Critical path planning and scheduling Michigan.; 1969. 121–123 с.
5. McQuillan A. [и др.]. New risk assessment methodology for coal mine excavated slopes // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. № 4 (28). С. 583–592.
6. Mei C. [и др.]. A Synthetic Material to Simulate Soft Rocks and Its Applications for Model Studies of Socketed Piles // Advances in Materials Science and Engineering. 2017. (2017). С. 1–8.
7. Motta Pascuas A.J. [и др.]. Identificación, análisis y evaluación de riesgos asociados a la actividad minera de oro en el Municipio de Marmato, Caldas // Boletín de Ciencias de la Tierra. 2018. № 44 (0). С. 21–30.
8. Orrell D. Role of the metric in forecast error growth: how chaotic is the weather? // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2002. № 4 (54). С. 350.
9. Parchański J.W. Wypadkowość w kopalniach węgla kamiennego w okresie restrukturyzacji 1993-2010 / J.W. Parchański, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2017.
10. Peng S.S. Surface subsidence engineering : theory and practice / S.S. Peng, Clayton South, VIC, Australia: CSIRO Publishing, 2020. 212 с.
11. Rodrigues É. [и др.]. A novel clustering algorithm based on morphological reconstruction // Pattern Recognition. 2017. (66). С. 392–403.

12. Smoliński A. Modelling the Relationship Between Self-Ignition Temperature and Physicochemical Parameters of Coal Mine Waste with the Application of the Partial Least Squares Method // Journal of Sustainable Mining. 2014. № 3 (13). С. 7–10.

13. Yu W. [и др.]. Field investigations of high stress soft surrounding rocks and deformation control // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2015. № 4 (7). С. 421–433.

14. Антипов И.В., Савенко А.В., Турбор И.А. Зависимость производительности очистного забоя от продолжительности нештатных операций // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. 2015. (15). С. 68–78.

15. Баутин Н.Н. Поведение динамических систем вблизи границ области устойчивости / Н.Н. Баутин, под ред. Наука, Изд. 2-е, -е изд., 1984. 176 с.

16. Бифов Р.Ж. Обоснование параметров издержек производства угольной компании в условиях не- достоверной экономической информации / Р.Ж. Бифов, М.: ГГУ, 2003. 198 с.

17. Бочковський А.П. Оптимізація керування професійними ризиками // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. 2018. (17). С. 32–40.

18. Бушуев С.Д., Бушуева Н.С., Казарезов А.Я. Управление проектами та програмами: Підручник / С.Д. Бушуев, Н.С. Бушуева, А.Я. Казарезов, Миколаїв: Туробариос, 2010. 352 с.

19. Ильяшов М.А. [и др.]. Особенности метановыделения в высоконагруженных очистных забоях // Уголь. 2010. (7). С. 24–26.

20. Кочура И.В. Анализ операционных рисков горных предприятий на основе оценки финансовой устойчивости // Економіка: проблеми теорії і практики. 2003. (186). С. 37–40.

21. Петросов А.А., Мангуш К.С. Экономические риски горного производства / А.А. Петросов, К.С. Мангуш, М., 2007. 142 с.

22. Півняк Г.Г. [и др.]. Керування ризиками в гірничодобувній діяльності / Г.Г. Півняк, М.М. Табаченко, Р.О. Дичковський, В.. Фальштинський, Дніпропетровськ: Державному вищому навчальному закладі «Національний гірничий університет», 2015. 288 с.

23. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский, Наука, 1969. 512 с.

24. Шашенко О.М., Сдвижкова О.О., Гапеев С.М. Деформованість та міцність масивів гірських порід / О.М. Шашенко, О.О. Сдвижкова, С.М. Гапеев, Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2008. 224 с.