

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЯКОВЕНКО ВАЛЕРІЙ ГЕННАДІЙОВИЧ

УДК 623.831.3

ДИСЕРТАЦІЯ

**НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
ПОПЕРЕДНЬОГО ІН'ЄКЦІЙНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ
ТРИЩИНУВАТИХ ПОРІД ПРИКОНТУРНОГО МАСИВУ
В УМОВАХ ПРАТ «ШУ «ПОКРОВСЬКЕ»**

184 – Гірництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ В.Г. Яковенко

Науковий керівник
доктор технічних наук, професор
Бондаренко Володимир Ілліч

Дніпро – 2025

АНОТАЦІЯ

Яковенко В.Г. Наукове обґрунтування параметрів попереднього ін'єкційного закріплення тріщинуватих порід приконтурного масиву в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 184 «Гірництво». – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2025.

Представлена дисертація є завершеною науково-дослідною роботою в галузі підземної розробки родовищ, зокрема, підвищення стійкості виїмкових виробок, у якій вирішена актуальна наукова задача обґрунтування раціональних параметрів ін'єкційного закріплення порід приконтурного масиву на основі дослідження його геомеханічного стану в зоні впливу геологічних порушень з урахуванням структури масиву та геологічного індексу міцності й трансформації фізико-механічних властивостей порід, зміцнених поліуретановими смолами, для забезпечення стійкості підготовчих та у подальшому очисних виробок.

Закордонний і вітчизняний аналіз показав, що сьогодні недостатньо вивченим залишається питання попереднього ін'єкційного зміцнення масиву ще на стадії проведення підготовчих виробок, які у подальшому зазнають додаткового навантаження від очисних робіт, особливо у зонах впливу геологічних порушень, де характерна наявність зон ослаблених та тріщинуватих порід. Існуючі рекомендації переважно базуються на досвіді зміцнення масиву, що вже перебуває під впливом фронту лави, і є недостатніми для оптимізації параметрів ін'єктування на етапі проходки з метою завчасного створення штучної укріпленої балки. Окрім того, не повною мірою вивчено еволюцію напружено-деформованого стану (НДС) закріпленого поліуретановими смолами приконтурного масиву на основних етапах функціонування виїмкової виробки.

Визначено ефективний напрям підвищення стійкості тріщинуватого приконтурного масиву, який полягає у попередньому ін'єкційному зміцненні гірських порід поліуретановими смолами ще на стадії проведення виїмкових виробок, до моменту впливу очисного вибою. Такий підхід дозволяє

заздалегідь локалізувати зони пониженої стійкості (геологічні порушення, розриви тощо), перетворивши їх у цілісну армопородну структуру з підвищеною опірністю до деформацій та руйнування. У подальшому це забезпечує безаварійну роботу сполучень «лава – штрек», знижує ризик вивалів покрівлі, підвищує безпеку і ритмічність роботи вибоїв шахти та зменшує потребу в перекріпленні виїмкових виробок.

Розроблено детальну комплексну методику лабораторних досліджень визначення властивостей композитного масиву з фракцій порід та смоли, чисельного моделювання геомеханічного стану масиву з урахуванням ін'єкційного зміцнення при проведенні виїмкових виробок та подальшому веденні очисних робіт і шахтних кернових випробувань для визначення індексу геологічної міцності та випробувань нагнітання поліуретанових смол у зоні геологічного порушення.

Встановлені залежності зміни фізико-механічних властивостей композитного матеріалу з різними співвідношеннями жорсткого породного скелету та полімерної матриці з поліуретанової смоли, зокрема поліноміальний зв'язок з міцністю на стиск і розтяг, експоненційний зв'язок з модулем пружності та лінійний зв'язок із зчепленням.

Досліджено геомеханічний стан масиву зі зниженням геологічного індексу міцності у діапазоні $GSI = 50 - 20$, що імітує входження прохідницького вибою у зону геологічного порушення, та встановлено порогове значення $GSI \leq 35$, за якого необхідно термінове застосування ін'єкційного зміцнення масиву поліуретановою смолою.

Виявлено стійкий експоненційний кореляційний зв'язок ступеня тріщинної та міжфракційної пустотності для різних літотипів (алевроліт, пісковик) з індексом його геологічної міцності (GSI) масиву у зонах впливу дрібноамплітудних геологічних порушень для умов розробки запасів шахтного поля ПрАТ «ШУ «Покровське».

Встановлено поліноміальні залежності зміни зміщень покрівлі та боків виїмкового штреку залежно від ширини зміцнення приконтурної зони

поліуретановою смолою, що дозволяє за технологічними особливостями піддатливості кріплення прогнозувати оптимальну ширину зміцнення.

Надано кількісно-якісну геомеханічну оцінку стану приконтурного масиву, зміцненого поліуретановою смолою: при проведенні виїмкового штреку зміцнення боків знижуються у 5 разів, покрівлі – у 2 рази, а у по дальшому на сполученні «лава – штрек» – у 2,6 і 3,75 разів відповідно. Обґрунтовано технологічні параметри ін'єкційного закріплення масиву поліуретановим смолами з урахуванням стадії підготовчих та очисних робіт.

Проведено шахтний експеримент у приконтурному масиві 2 північного конвеєрного штреку блоку № 11 в зоні впливу геологічного порушення, що характеризувалася критичними показниками. У ході експерименту було пробурено 20 нагнітальних шпурів загальною довжиною 60 м. Моніторинг процесу нагнітання показав, що збіжність між рекомендованим (розрахунковим) та фактичним об'ємом витраченої смоли склала 88%. Такий високий показник збіжності підтверджує значну точність та адекватність розробленої методики розрахунку параметрів, доводячи її практичну придатність. Результати підтвердили високу технологічну ефективність процесу ін'єкційного зміцнення: візуальні спостереження зафіксували повну стабілізацію контуру виробки та припинення вивалів, а аналіз після ін'єкційних кернів показав формування міцного монолітного композиту «порода – полімер».

Очікуваний економічний ефект від застосування ін'єкційного закріплення приконтурного масиву поліуретановою смолою за умов перетинання 3 небезпечних геологічних порушень з низьким індексом геологічної міцності при підготовці та подальшому веденні очисних робіт склав 64,25 млн грн на виїмковий стовп у порівнянні з традиційною схемою кріплення виїмкових виробок.

Розроблено, затверджено та передано вугільним шахтам ПрАТ «ШУ «Покровське» і ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» рекомендації з визначення параметрів ін'єкційного закріплення приконтурного масиву в зоні впливу геологічних порушень та методику проведення шахтного експерименту.

Ключові слова: вугільна шахта, вивали порід, тріщинуватість, деформації, геологічне порушення, фізико-механічні властивості, в'язко-пластичне деформування, виїмковий штрек, сполучення «лава – штрек», ін'єкційне закріплення, поліуретанова смола.

ABSTRACT

Yakovenko V.H. Scientific justification of the parameters of pre-injection reinforcement of fractured rocks in the near-contour zone under the conditions of PJSC “Pokrovske Coal Mine”. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 184 “Mining”. – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2025.

The presented dissertation is a completed scientific research work in the field of underground mining, in particular, the enhancement of roadway stability. It solves the relevant scientific problem of substantiating rational parameters for injection reinforcement of rocks in the near-contour zone based on the study of the geomechanical state of the rock mass within the influence zone of geological disturbances, taking into account its structure, geological strength index (GSI), and the transformation of the physico-mechanical properties of rocks reinforced with polyurethane resins to ensure the stability of development and, subsequently, longwall roadways.

Foreign and domestic analyses have shown that the issue of preliminary injection reinforcement of the rock mass at the stage of development drivage remains insufficiently studied. Such roadways are later subjected to additional loads from longwall operations, especially in the zones affected by geological faults characterized by weakened and fractured rocks. Existing recommendations are mostly based on the experience of reinforcing the rock mass already affected by the longwall front and are insufficient for optimizing injection parameters during drivage to pre-form an artificial strengthened beam. Moreover, the evolution of the stress-strain state (SSS) of the polyurethane-reinforced near-contour mass at various operational stages of the roadway has not been fully investigated.

An effective direction for improving the stability of the fractured near-contour mass has been identified – preliminary injection reinforcement of rocks with polyurethane resins at the stage of roadway drivage, before the influence of the longwall face. This approach allows for early localization of low-stability zones (geological faults, washouts, etc.), transforming them into a monolithic rock–polymer

structure with enhanced resistance to deformation and failure. Consequently, it ensures accident-free operation of longwall-to-roadway junctions, reduces roof fall risks, increases the safety and continuity of longwall operations, and minimizes the need for secondary support of roadways.

A comprehensive research methodology has been developed, including: laboratory testing of composite rock-polymer samples composed of rock fractions and resin; numerical modeling of the geomechanical state of the mass considering injection reinforcement during drivage and subsequent longwall operations; and in-mine core testing to determine the geological strength index and injection experiments with polyurethane resins in the zones of geological disturbance.

Dependence was established describing the variation of the physico-mechanical properties of the composite material with different ratios of rigid rock skeleton to polymer matrix, including a polynomial correlation with compressive and tensile strength, an exponential relationship with the elastic modulus, and a linear correlation with cohesion.

The geomechanical state of the mass was investigated under conditions of decreasing geological strength index within the range $GSI = 50 - 20$, simulating the approach of the development face to a fault zone. The threshold value $GSI \leq 35$ was determined, below which immediate polyurethane resin injection is required.

A stable exponential correlation was revealed between fracture and intergranular porosity of various lithotypes (siltstone, sandstone) and the GSI of the mass in zones influenced by small-amplitude geological faults under the mining conditions of the Pokrovske Coal Mine field.

Polynomial dependences were determined for roof and sidewall displacements of the development roadway as functions of the width of the polyurethane-reinforced near-contour zone, enabling prediction of the optimal reinforcement width considering the yielding characteristics of the support system.

A quantitative and qualitative geomechanical assessment of the reinforced near-contour mass showed that, during roadway drivage, sidewall displacements decreased

by a factor of 5, and roof displacements – by a factor of 2; subsequently, at the “longwall – roadway” junction, by 2.6 and 3.75 times respectively.

Technological parameters of injection reinforcement with polyurethane resins have been substantiated, accounting for both the development and longwall mining stages.

A mine-scale experiment was conducted in the near-contour mass of the 2nd northern conveyor roadway, block No. 11, within a fault-affected zone characterized by critical stability indicators. Twenty injection boreholes were drilled, totaling 60 m in length. Monitoring of the injection process showed an 88% convergence between the recommended (calculated) and actual resin consumption volumes. This high correspondence confirms the accuracy and adequacy of the developed calculation methodology, proving its practical applicability.

The results demonstrated high technological efficiency of the injection process: visual observations recorded full stabilization of the roadway contour and elimination of roof falls, while post-injection core analysis confirmed the formation of a strong monolithic “rock – polymer” composite.

The expected economic effect of applying polyurethane resin injection reinforcement in the near-contour zone under conditions of intersecting three hazardous geological faults with low geological strength indices, during both development and longwall operations, amounts to UAH 64.25 million per extraction panel, compared with the traditional roadway support scheme.

Keywords: coal mine, rock falls, fracturing, deformations, geological fault, physico-mechanical properties, visco-plastic deformation, development roadway, “longwall – roadway” junction, injection reinforcement, polyurethane resin.

**Наукові праці, у яких опубліковані основні
наукові результати дисертації:**

*Статті у журналах, що індексуються
наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science:*

1. Bondarenko, V.I., Symanovych, H.A., Kovalevska, I.A., Shyshov, M.V., & **Yakovenko, V.H.** (2023). Geomechanical substantiation of parameters for safe completion of mining the coal reserves adjacent to main workings. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 46-52. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-1/046>
2. Symanovych, H., Odnovol, M., **Yakovenko, V.**, Sachko, R., Shaikhislamova, I., Reshetilova, T., & Stadnichuk, M. (2023). Assessing the geomechanical state of the main working network state in the case of undermining in the conditions of weak rocks. *Mining of Mineral Deposits*, 17(2), 91-98. <https://doi.org/10.33271/mining17.02.091>

*Статті у наукових фахових виданнях, включених
до переліку наукових фахових видань України:*

3. **Яковенко, В.Г.**, Бондаренко, В.І., Петльований, М.В., Ковалевська, І.А., & Драгун, Д.В. (2024). Аналіз особливостей вивалоутворення приконтурних порід виїмкових виробок та шляхи досягнення їх стійкості. *Збірник наукових праць НГУ*, 76, 127-141. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/76.127>

Тези доповідей у матеріалах всеукраїнських та міжнародних конференцій

4. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Petlovanyi, M., **Yakovenko, V.**, & Sachko, R. (2023). The use of injection fixing to prevent the roof rock inrush at the junction of longwall faces with extraction drifts. In *Materials of the International Conference "XXXII Szkoła Eksploatacji Podziemnej"*. Krakow, Poland: Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, Akademia Górniczo-Hutnicza.
5. Бондаренко, В., **Яковенко, В.**, & Петльований, М. (2023). Аналіз особливостей вивалоутворення порід при проведенні виїмкових виробок в умовах

ПрАТ «ШУ «Покровське». В *Матеріалах XVI міжнародної науково-практичної конференції «Українська школа гірничої інженерії»* (с. 15-16). Східниця, Україна: ЛізуновПрес. <https://doi.org/10.33271/usme16.015>

6. Bondarenko, V.I., Kovalevska, I.A., Petlovanyi, M.V., & **Yakovenko, V.** (2024). Principles of chaos theory in solving applied geomechanics problems. In *Materials of the 17th International Conference “CHAOS”*. Crete, Greece: Cultural Centre of Chania.

7. **Яковенко, В.** (2024). Експериментальні дослідження зміцнення покрівлі вугільного пласта поліуретановою смолою в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське». В *Матеріалах XVII міжнародної науково-практичної конференції «Українська школа гірничої інженерії»* (с. 13-14). Східниця, Україна: ЛізуновПрес. <https://doi.org/10.33271/usme17.013>

8. **Яковенко, В.** (2025). Оцінка стану масиву у зонах геологічних порушень для його ін'єкційного закріплення в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське». В *Матеріалах XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Українська школа гірничої інженерії»* (с. 33-34). Східниця, Україна: ЛізуновПрес. <https://doi.org/10.33271/usme18.033>

ЗМІСТ

Вступ	13
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ СТІЙКОСТІ ВИЇМКОВИХ ВИРОБОК ВУГІЛЬНИХ ШАХТ В УМОВАХ ТРІЩИНУВАТИХ ПОРІД	20
1.1 Аналіз сучасного стану вугільної галузі та значущих факторів, що впливають на безпеку й ритмічність роботи шахт	20
1.2 Геотехнічні характеристики та планування розвитку ПрАТ «ШУ «Покровське»	26
1.3 Проблеми стійкості тріщинуватого масиву гірських порід при веденні гірничих робіт в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське»	31
1.4 Аналіз досліджень щодо способів підвищення стійкості приконтурного масиву виїмкових виробок	40
1.5 Напрямок підвищення стійкості тріщинуватого масиву при повторному використанні виїмкових виробок	48
1.6 Формування мети, завдань і структурно-логічної схеми досліджень	50
1.7 Висновки до розділу 1	51
1.8 Список використаних джерел до розділу 1	52
РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ІН'ЄКЦІЙНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ ТРІЩИНУВАТИХ ПОРІД. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ	61
2.1 Обґрунтування доцільності ін'єкційного закріплення приконтурного тріщинуватого масиву виїмкових виробок	61
2.2 Методика лабораторних та аналітичних досліджень фізико-механічних властивостей консолідованого поліуретановою смолою тріщинуватого масиву	67
2.3 Методика досліджень індексу геологічної міцності масиву (GSI) у зоні впливу геологічного порушення на основі шахтної інформації	80
2.4 Методика чисельного моделювання геомеханічних процесів у масиві, закріпленому поліуретановою смолою	85
2.5 Методика шахтного експерименту ефективності ін'єкційного закріплення тріщинуватих порід у зоні впливу геологічного порушення	97
2.6 Висновки до розділу 2	98

2.7 Список використаних джерел до розділу 2	100
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СТУПЕНЯ ПОРУШЕНОСТІ	
ПРИКОНТУРНОГО МАСИВУ ТА ГЕОМЕХАНІЧНОЇ	
ЕФЕКТИВНОСТІ ЙОГО ІН'ЄКЦІЙНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ	104
3.1 Виявлення характеру вивалоутворення порід приконтурного масиву виїмкових виробок у зонах високої порушеності масиву	104
3.2 Вивчення структури та тріщинуватості масиву за даними шахтного кернового буріння	110
3.3 Лабораторні дослідження міцнісних властивостей консолидованих поліуретановою смолою зразків шахтних порід	118
3.4 Еволюція геомеханічного стану тріщинуватого приконтурного масиву при змінному значенні індексу геологічної міцності GSI	129
3.5 Дослідження геомеханічної ефективності ін'єкційного зміцнення приконтурного масиву поліуретановою смолою	136
3.6 Висновки до розділу 3	144
3.7 Список використаних джерел до розділу 3	145
РОЗДІЛ 4. ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	
НАГНІТАННЯ ІН'ЄКЦІЙНИХ СМОЛ У ЗОНІ ВПЛИВУ ГЕОЛОГІЧНИХ	
ПОРУШЕНЬ. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ	148
4.1 Методика розрахунку параметрів завчасного ін'єкційного нагнітання тріщинуватих порід	148
4.2 Шахтні дослідження ін'єкційного нагнітання поліуретанових смол на ділянці нестійких порід виїмкового штреку	151
4.3 Економічна оцінка ефективності ін'єкційного закріплення приконтурного масиву при веденні підготовчих та очисних робіт	157
4.4 Висновки до розділу 4	162
4.5 Список використаних джерел до розділу 4	163
ВИСНОВКИ	165
ДОДАТОК	167

ВСТУП

Актуальність роботи. Вугільна галузь залишається стратегічною складовою паливно-енергетичного балансу України. Провідне місце за кількістю запасів посідають марки вугілля переважно енергетичного призначення, а саме Д, Г та ДГ. Особливо цінним для металургійної промисловості є вугілля марки К (коксівне), запаси якого становлять 4,68% (1,925 млрд тонн). Сьогодні його видобуток зосереджено лише на шахті ПрАТ «ШУ «Покровське», що є надзвичайно важливим для економіки України. Загальна тенденція зниження вуглевидобутку пов'язана з окупацією частини Донбасу російською федерацією й, відповідно, низки важливих вугледобувних підприємств та руйнування шахтного фонду під час бойових дій. Вагомою проблемою вугільної галузі є рівень виробничого травматизму. Крім цього, за даними статистики нещасних випадків за небезпечними виробничими факторами у вугільних шахтах обвалення гірських порід займає найвище місце та складає 31,4 % всіх випадків. Саме втрата стійкості приконтурного масиву гірничих виробок та обвалення їх покрівлі зумовлює найбільші ризики не лише загрози життю гірничих робітників, але і стабільного ритмічного функціонування шахт, забезпечення планових показників прохідницьких та очисних робіт.

Особливо в умовах значних глибин 800 – 1000 м на ПрАТ «ШУ «Покровське» підвищилась інтенсивність проявів гірського тиску та вивалотуворень порід, як при проведенні гірничих виробок, так і очисних робіт, а саме сполученнях «лава – штрек» та у лавах, навіть при застосуванні дворівневої системи рамно-анкерного кріплення (сталеполімерні анкери з канатними анкерами). Тривалий досвід гірничих робіт показує, що вивалоутворення здебільшого приурочені до зон впливу геологічних порушень, де породи є ослабленими, іноді роздробленими, та характеризуються підвищеною тріщинуватістю і низькою стійкістю, а також зон розмивів пласта та різкої зміни літології. Зазначені проблеми стали серйозним викликом для нашого підприємства ПрАТ «ШУ «Покровське», що впливає на ритмічність роботи шахти і виконання показників бізнес-плану.

У таких складних геотехнічних умовах видобутку коксівного вугілля одним з перспективних напрямів підвищення стійкості виробок є ін'єкційне закріплення приконтурних порід, якому приділена менша кількість досліджень із загального напрямку підвищення стійкості виробок. Виконаний аналіз наукових праць показав, що більшість проведених досліджень були спрямовані на вдосконалення технологій ін'єкційного зміцнення тріщинуватих порід за рахунок поліуретанових та мінеральних смол, однак вони мали переважно локальний характер застосування – у зонах сполучення лави зі штреками, на ділянках порушеної покрівлі або в обмежених проблемних зонах. Проте, досліджень завчасного ін'єкційного закріплення приконтурних порід та його геомеханічної ефективності у зоні впливу геологічних порушень при проведенні виїмкових виробок для подальшого створення сприятливих умов при зворотному посуванні вже фронту очисних робіт до цих нестійких зон на сьогодні є недостатньо та ці питання широко не висвітлені у наукових працях як світових, так і українських дослідників.

Таким чином, обґрунтування раціональних параметрів саме попереднього ін'єкційного закріплення порід приконтурного масиву в зоні впливу геологічних порушень ще на стадії прохідницьких робіт для створення сприятливих геомеханічних умов при підході очисного фронту є актуальною **науковою задачею** для гірничого виробництва.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі гірничої інженерії та освіти НТУ «Дніпровська політехніка» відповідно до Національного плану дій в галузі енергетики до 2030 року № 687, затвердженого Міністерством енергетики та вугільної промисловості України у 2018 році, і планом держбюджетних робіт Міністерства освіти і науки України в 2020 – 2024 роках: ГП-509 «Наукове та практичне обґрунтування оптимізаційних рішень при впровадженні інноваційних технологій мінімізації ризиків при закритті вугільних шахт» (№ держреєстрації 0122U001719); ГП-514 «Розробка геомеханічних моделей гірського масиву та інноваційних технологій комплексного видобутку

мінеральних ресурсів вугільних шахт» (№ держреєстарції 0123U101808); ДТ-521 «Створення інформаційних та геомеханічних систем інноваційного видобутку корисних копалин у повоєнний період відновлення України» (№ держреєстрації 0124U000547), де автор був виконавцем.

Мета роботи – обґрунтування раціональних параметрів ін'єкційного закріплення порід приконтурного масиву на основі дослідження його геомеханічного стану в зоні впливу геологічних порушень з урахуванням структури масиву та геологічного індексу міцності й трансформації фізико-механічних властивостей порід, зміцнених поліуретановими смолами, для забезпечення стійкості підготовчих та у подальшому очисних виробок.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні **наукові завдання**:

1. Вивчити стан проблем стійкості виїмкових виробок та існуючих способів її підвищення в умовах тріщинуватого приконтурного масиву.
2. Розробити комплексну методику лабораторних досліджень, чисельного моделювання геомеханічного стану масиву та шахтних випробувань нагнітання поліуретанових смол.
3. Дослідити фізико-механічні властивості масиву, консолідованого поліуретановою смолою, та оцінити взаємозв'язок індексу геологічної міцності масиву з тріщинною пустотністю.
4. Провести чисельне моделювання геомеханічного стану приконтурного масиву в зоні впливу геологічних порушень з урахуванням зміцненого полімерними складами приконтурного масиву.
5. Провести шахтні натурні дослідження зміцнення приконтурного масиву полімерними смолами у зоні впливу геологічного порушення.
6. Обґрунтувати раціональні технологічні параметри випереджального ін'єкційного закріплення приконтурного масиву виїмкових виробок та надати економічну оцінку розробленим рішенням.

Ідея роботи полягає у використанні виявлених залежностей зміни властивостей консолідованого поліуретановими смолами масиву залежно від

співвідношення жорсткої та полімерної фаз в умовах різного ступеня порушеності масиву для зміни режиму його деформування від крихкого до в'язко-пластичного, що забезпечує покращення геомеханічного стану приконтурного масиву та формує наукове підґрунтя для визначення параметрів ін'єкційних робіт.

Об'єкт дослідження – технологія ін'єкційного зміцнення приконтурного масиву виїмкових виробок у зонах його зниженої стійкості.

Предмет дослідження – закономірності трансформації властивостей тріщинуватого масиву, консолідованого поліуретановою смолою, та їх впливу на геомеханічний стан приконтурного масиву виїмкових виробок.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених завдань в роботі був використаний комплексний науково-методичний підхід: аналіз і узагальнення стану вугільної промисловості, проблем стійкості виїмкових виробок вугільних шахт в умовах тріщинуватих порід та напрямів підвищення стійкості виробок; шахтні натурні дослідження тріщинної пустотності на основі кернового буріння; лабораторні та аналітичні дослідження фізико-механічних властивостей масиву, закріпленого поліуретановою смолою; чисельне моделювання геомеханічних процесів на основі методу скінченних елементів та шахтні натурні дослідження нагнітання поліуретанових смол у приконтурний тріщинуватий масив.

Наукова новизна отриманих результатів:

Вперше:

– встановлені залежності зміни фізико-механічних властивостей композитного матеріалу з різними співвідношеннями жорсткого породного скелету та полімерної матриці з поліуретанової смоли;

– досліджено геомеханічний стан масиву зі зниженням геологічного індексу міцності у діапазоні $GSI = 50 - 20$, що імітує входження прохідницького вибою у зону геологічного порушення, та встановлено порогове значення $GSI \leq 35$, за якого необхідним є термінове застосування ін'єкційного зміцнення масиву поліуретановою смолою;

– надано кількісно-якісну геомеханічну оцінку стану приконтурного масиву, зміцненого поліуретановою смолою: при проведенні виїмкового штреку зміщення боків знижуються у 5 разів, покрівлі – у 2 рази, а у по дальшому на сполученні «лава – штрек» – у 2,6 і 3,75 рази відповідно.

– встановлено поліноміальні залежності зміни зміщень покрівлі та боків виїмкового штреку залежно від ширини зміцнення приконтурної зони поліуретановою смолою, що дозволяє за технологічними особливостями піддатливості кріплення прогнозувати оптимальну ширину зміцнення.

Уточнено:

– експоненційний кореляційний зв'язок ступеня тріщинної та міжфракційної пустотності для різних літотипів (алевроліт, пісковик) з індексом його геологічної міцності (GSI) масиву в зонах впливу дрібноамплітудних геологічних порушень для умов розробки запасів шахтного поля ПрАТ «ШУ «Покровське».

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується коректністю постановки й рішенням задач із використанням апробованих положень механіки гірських порід, будівельної механіки та методів математичної статистики; достатнім обсягом шахтних досліджень стану гірничих виробок у зоні геологічних порушень, лабораторних та чисельних досліджень; задовільним ступенем відповідності результатів аналітичних досліджень і шахтних натурних експериментів нагнітання поліуретанових смол із середнім відхиленням до 12%; позитивними результатами впровадження розроблених методик і рекомендацій.

Наукове значення роботи полягає у встановленні закономірностей зміни властивостей консолідованого поліуретановими смолами масиву залежно від співвідношення жорсткої та полімерної фаз, взаємозв'язку тріщинної пустотності з індексом геологічної міцності, що визначає вплив цих факторів на трансформацію геомеханічного стану приконтурного масиву, дозволяє обґрунтувати параметри його ін'єкційного закріплення та забезпечити стійкість виїмкових виробок як при їх проведенні, так і під подальшим впливом фронту очисних робіт.

Практичне значення роботи полягає у наступному:

- вдосконалено методику чисельного моделювання геомехнічного стану приконтурного масиву при його ін'єкційному зміцненні із застосуванням комбінованого підходу, що полягає у застосуванні критеріїв міцності Хоека-Брауна та Мора-Кулона;
- розроблено методику розрахунку параметрів ін'єкційного закріплення приконтурного масиву поліуретановими смолами у зонах підвищеної тріщинуватості.

Реалізація результатів досліджень. Результати дисертаційного дослідження впроваджені у формі рекомендацій розрахунку параметрів ін'єкційного закріплення приконтурного масиву поліуретановими смолами, прийнятих та затверджених на ПрАТ «ШУ «Покровське» та шахтах ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». Впровадження попереднього ін'єкційного зміцнення дозволяє отримати загальний економічний ефект у розмірі 64,2 млн грн на 1 виїмковий стовп. Ефект досягається переважно за рахунок попередження аварійних ситуацій, виключення витрат на ліквідацію наслідків вивалів (розбирання породи, повторне кріплення) та уникнення тривалих простоїв видобувного комплексу.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні, узагальненні та вирішенні теоретичних і експериментальних завдань дисертаційної роботи. Автором самостійно сформульовані наукова задача, мета та завдання дослідження, ідея роботи, її основні наукові результати, їх новизна, висновки і рекомендації, методика натурних, лабораторних та чисельних експериментів та проаналізовані результати досліджень. Автор брав безпосередню участь в організації й проведенні натурних і лабораторних експериментів.

Апробація результатів досліджень. Основні положення і наукові результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях, зокрема: «Українська школа гірничої інженерії» (Бердянськ, 2021 р.; Східниця, 2023, 2024 pp.); XXXII Szkola Eksploatacyj Podziemnej (Краків, 2023 р.); The International Conference CHAOS

(Крит, Греція, 2023, 2024 рр.), а також на науково-технічних нарадах шахт ТОВ «ДТЕК Енерго», ПрАТ «Донецьксталь-МЗ», ПрАТ «ШУ «Покровське».

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 8 наукових праць, у тому числі 3 статті у виданнях, що індексовані у наукометричних базах даних Scopus та Web of Sciences; 1 стаття у фаховому науковому виданні з переліку МОН України; 4 публікації у матеріалах міжнародних і вітчизняних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел зі 126 найменувань, додатка на 3 сторінках. Загальний обсяг дисертації – 169 сторінок, у тому числі 54 рисунки і 19 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ СТІЙКОСТІ ВИЇМКОВИХ ВИРОБОК ВУГІЛЬНИХ ШАХТ В УМОВАХ ТРИЩИНУВАТИХ ПОРІД

1.1 Аналіз сучасного стану вугільної галузі та значущих факторів, що впливають на безпеку й ритмічність роботи шахт

Незважаючи на світові тенденції розвитку декарбонізації та зеленої енергетики, останніми роками на світовому ринку кам'яного вугілля відбулося значне підвищення попиту та зростання цін на нього (у 2021 році майже у 2 рази), що викликано необхідністю забезпечення потрібного обсягу вироблення електричної енергії низки потужних промислових країн [1-3]. Суттєву роль у ситуацію, що склалася, також внесло і закриття масштабних вугледобувних підприємств у деяких країнах. Проте, швидкість впровадження «зелених» технологій у світі не встигає за світовою економікою, якій сьогодні потрібні енергоносії з викопного палива у значних обсягах [4-6]. Тому значення кам'яного вугілля, як вирішального джерела енергії, для багатьох держав, у тому числі й України, на сьогоднішній день є пріоритетним.

Попри останні переваги виробництва електроенергії з відновлюваних джерел, частка вугілля в глобальному енергетичному балансі залишається значною, на рівні 25 – 35% [7, 8], і на думку закордонних науковців [9, 10], займатиме цю значущу позицію ще протягом тривалого періоду часу. Кам'яне вугілля є стратегічним енергетичним ресурсом і для України на найближчі роки, з якого сьогодні генерується 27% всієї електричної енергії. У надрах України запаси кам'яного вугілля, які зосереджені у двох басейнах – Донецькому (97,3%) і Львівсько-Волинському (2,7%), становлять в сукупному обсязі 41,4 млрд тонн (за даними ДНВП «Геоінформ України») [11].

Значна частина запасів кам'яного вугілля припадає на вугілля марок Г (газове) – 18,70% та ДГ (довгополум'яно-газове) – 15,56% від загального об'єму балансових запасів кам'яного вугілля. Решта запасів належить до вугілля марок А (антрацити), П (пісне), Ж (жирне) та інших (рис. 1.1).

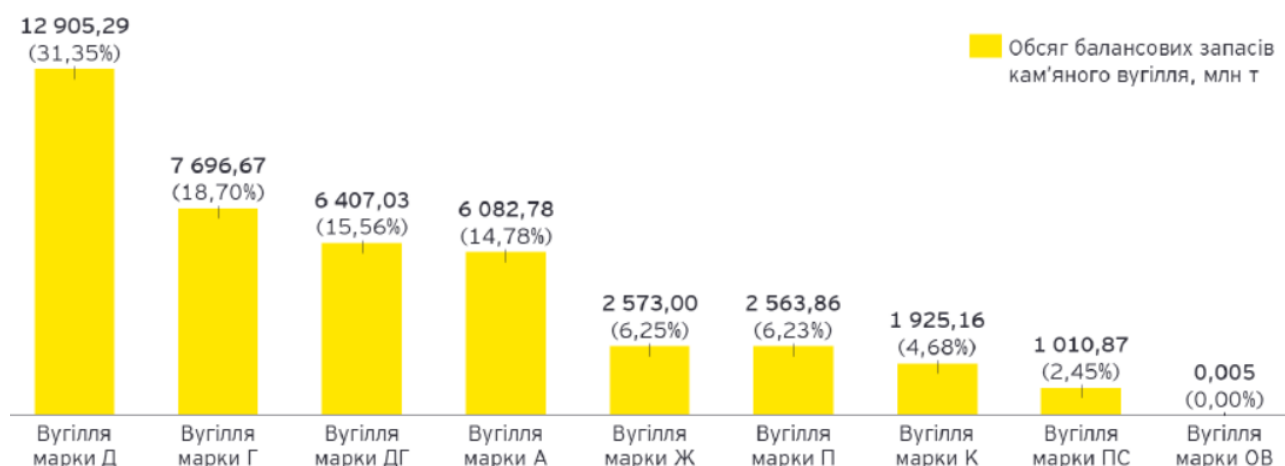


Рисунок 1.1 – Структура балансових запасів кам'яного вугілля за марками станом на 01.01.2022 р. [12]

Суттєво вугільна галузь, і безпосередньо шахтний фонд України, докорінно змінилися з 2014 року, до якого в Україні функціонувало близько 130 шахт, а річний видобуток коливався у межах 70 – 80 млн тонн [13]. Причиною є окупація частини Донецької та Луганської областей незаконними збройними формуваннями, підтримуваними російською федерацією. Бойові дії призвели до того, що вугільна галузь України виявилася серйозно дестабілізованою. Станом на вересень 2014 року в країні працювали всього 36 шахт: 12 – у Львівсько-Волинському басейні та лише 24 з 93 шахт Донбасу [14]. При цьому решта перебувала у стані консервації або була зруйнована бойовими діями. Зменшення кількості шахт призвело до відчутного падіння рівня видобутку кам'яного вугілля, динаміка якого наведена у табл. 1.1.

Після початку повномасштабної війни росії проти України у лютому 2022 року ситуацію занепаду вугільної галузі посилили окупація частини Донбасу та руйнування інфраструктури. На початок 2023 року на контрольованій Україні території продовжували функціонувати лише 21 шахта, з яких 15 – державні. Таким чином, кількість шахт, що діють, різко скоротилася: багато копалень Донбасу (особливо антрацитові) опинилися під контролем ОРДЛО або були вимушено закриті.

Таблиця 1.1 – Динаміка щорічних обсягів видобутку
кам'яного вугілля за його видами [12]

Рік	Обсяг видобутку, млн тонн	Енергетичне вугілля, млн тонн	Коксівне вугілля, млн тонн
2016	40,9	32,5	4,3
2017	33,0	26,2	4,34
2018	33,3	27,5	3,97
2019	31,2	24,9	5,0
2020	28,8	21,8	6,13
2021	29,4	22,2	6,22

Регіональна структура шахтного фонду також поступово змінювалась. Якщо до 2014 року основну частку видобування складали Донецька та Луганська області, то після 2014 року внаслідок втрати частини Донбасу найбільший обсяг видобутку досягається у Дніпропетровській області, де зосереджені потужності компанії ДТЕК. Так, у 2021 році 54,55% кам'яного вугілля було видобуто в Дніпропетровській області, 40,47% – у Донецькій області, а решта (4,98%) – у Львівській, Луганській та Волинській областях [12].

Протягом досить тривалого часу значна частина державних вугільних шахт є збитковими та нерентабельними. У 2015 – 2020 роках уряд виділяв значні кошти головним чином на ліквідацію неперспективних вугільних підприємств. Так, на контрольованій території України видобуток державними шахтами за 2015 – 2019 роки зменшився майже вдвічі, а собівартість вугілля зросла з 2068 грн/т у 2015 році до 4258 грн/т у 2019 році. В результаті сьогодні державні шахти видобувають менше 10% всього вугілля, а основний обсяг видобутку тримається лише за рахунок функціонування приватних шахт [15, 16].

Основним вугледобувним підприємством залишається холдингова компанія ДТЕК, частка у загальному обсязі видобутку якої досягала 21,3 млн тонн за 2020 рік [17, 18]. Важливо, що за останній час частка видобутку вугілля, що коксується, стабілізувалася на рівні 6,0 млн тонн на рік, при цьому найбільшим та єдиним підприємством, що видобуває коксівне вугілля, є ПрАТ «ШУ «Покровське».

Енергетичне вугілля є основою енергетичної безпеки країни, а коксівне – критично важливе для стабільної роботи металургії – основної галузі економіки, що приносить валютні надходження до державного бюджету. Металургія забезпечує близько 25 – 30% загального експорту товарів України та формує 5 – 7% податкових надходжень до бюджетів усіх рівнів, забезпечуючи зайнятість десяткам тисяч громадян та стабільно високі податкові надходження до бюджетів усіх рівнів [19, 20]. Запаси підприємства на початок 2020 року оцінюються більш, ніж у 200 млн тонн, що дозволяє планувати стратегію сталого видобутку на найближчі кілька десятиліть.

Важливим завданням ефективного функціонування сучасних високопродуктивних шахт є забезпечення високої концентрації гірничих робіт з ритмічним функціонуванням очисних вибоїв та безпечних умов праці підземних гірничих робітників [21-23]. Виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних із різними причинами (технічні, організаційні, психологічні), призводить до зупинки виробництва та зниження економічних показників.

Згідно статистичних даних середнього розподілу кількості травмованих працівників за галузями економіки за 2019 – 2021 роки, на частку вугільної галузі приходить 17,6%. За кількістю загиблих вугільна галузь посідає 4 місце, а в перерахунку на 100000 працівників – 1 місце [24] (рис. 1.2). Так, серед причин, пов'язаних із нещасними випадками у вугільній галузі України, розподіл наступний: обвалення порід – 31,4%; транспорт і підйом – 29,1%; машини та механізми – 8,1%; вибухи газу та пилу – 7,1%; електричний струм – 3,3%; раптові викиди – 2,7%; падіння людей – 2,6%; вибухові роботи – 2,3%; інші – 13,4% [25-27] (рис. 1.3). Очевидно, що обвалення порід гірничих виробок є найважливішою проблемою. Причому не менше 40% випадків обвалення покрівлі відбувається саме при експлуатації протяжних гірничих виробок.

Якщо проаналізувати ситуацію із випадками обвалення порід за кордоном, то, наприклад, в Австралії 18% травм, що призвели до втрати працездатності на термін більше 10 діб, пов'язані з падінням предметів, в тому числі обваленням гірських порід [28].



Рисунок 1.2 – Співвідношення нещасних випадків щодо небезпечних виробничих факторів за галузями економіки України (%)

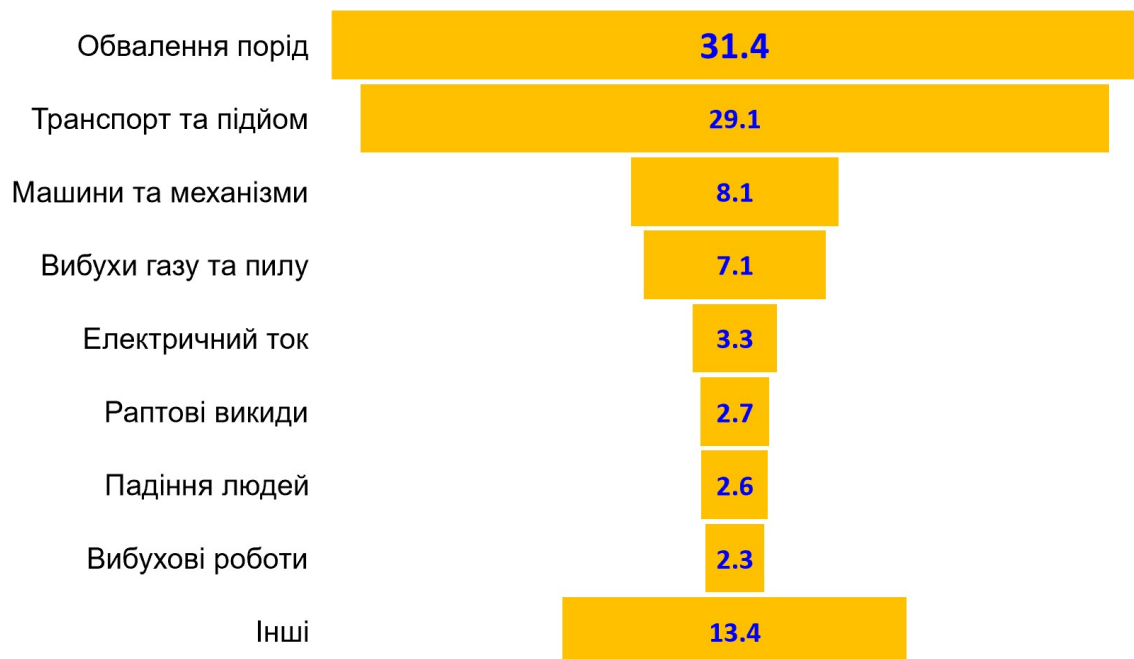


Рисунок 1.3 – Співвідношення нещасних випадків щодо небезпечних виробничих факторів вугільної промисловості України (%)

У Південно-Африканській Республіці вірогідність нещасного випадку, пов'язаного з роботою машин і механізмів, становить 1,22%, а з причини обвалення порід покрівлі – 21,7% [29]. Згідно з дослідженнями [30], 22% смертельного травматизму в Ірані відбувається внаслідок вивалів з покрівлі. У Китаї частка обвалів гірських порід на вугільних шахтах сягає 33%, у США даний показник коливається на рівні 10,8% [31, 32].

Обвалення порід покрівлі гірничих виробок є основною формою прояву гірського тиску, що призводить до двох основних негативних наслідків: небезпеки травмування підземних гірників та зупинки видобутку вугілля в очисному вибої (на ліквідацію вивалу витрачається 50 – 60% нетехнологічних простоїв лав). Зупинки очисних вибоїв, з геомеханічної точки зору, є небажаними, адже внаслідок збільшення швидкості посування очисного вибою зміщення порід на сполученні «лава – штрек» зменшуються, і як результат – зниження проявів реологічних властивостей порід та відсування максимуму напружень у покрівлі виробки в бік завалу [33, 34].

Отже очевидно, що в умовах сучасних діючих шахт України необхідно невідкладно приймати ефективні заходи щодо попередження вивалів порід та зміцнення масиву порід протягом функціонування виїмкових виробок, які знаходяться під впливом очисних робіт, і є найбільш схильними до проявів гірського тиску. Також поступове збільшення глибини розробки призводить до підвищення інтенсивності проявів гірського тиску в масиві гірських порід, послабленого водонасиченими породами, газоносністю, тріщинуватістю та наявністю геологічних порушень. Особливо важливим є забезпечення стійкості приконтурного масиву виїмкових виробок у процесі їх проведення та при веденні очисних робіт на їх сполученнях з лавою.

Таким чином, для недопущення руйнування гірського масиву і створення небезпечних ситуацій, пов'язаних з обваленням порід, повинні застосовуватись ефективні заходи безаварійного підтримання виїмкових виробок протягом всього терміну їх існування. Зазначені проблеми характерні для гірничо-геологічних і гірничотехнічних умов вугільного підприємства ПрАТ «ШУ «Покровське».

1.2 Геотехнічні характеристики та планування розвитку ПрАТ «ШУ «Покровське»

Сьогодні ПрАТ «ШУ «Покровське» є передовим гірничим підприємством України (рис. 1.4), що видобуває цінну марку кам'яного вугілля – коксівне, яке використовується у коксохімічній промисловості. Річна потужність шахти останніми роками сягає 6 млн тонн/рік.

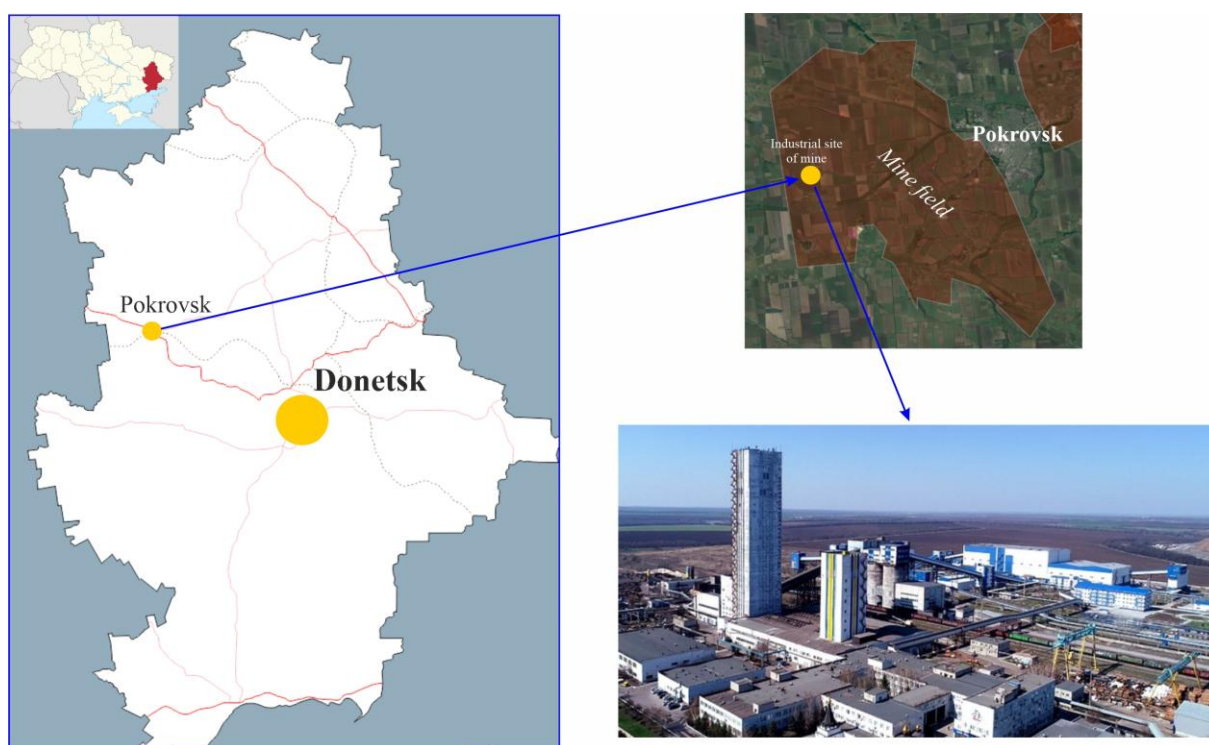


Рисунок 1.4 – Місцезорозташування ПрАТ «ШУ «Покровське»

Шахтне поле ПрАТ «ШУ «Покровське» розташоване у Покровському західному вугленосному районі Донецького кам'яновугільного басейну (Донецька область, Україна). В адміністративному відношенні шахта розташована у Покровському районі Донецької області за 16 км від міста Покровськ та за 50 км від обласного центру – міста Донецьк. Найближчими населеними пунктами є міста: Мирноград, Селидове, Родинське, Новогродівка.

Промислове значення у родовищі має вугільний пласт d_4 . Пласт d_4 на переважній площі шахтного поля має балансові запаси. Будова в основному проста, рідше складна. Загальна потужність пласта змінюється від 0,60 до 2,70 м.

Кут падіння пласта – $2 - 5^\circ$, природна газоносність – $20 - 30 \text{ м}^3/\text{т}$, природна зольність пласта – $9 - 34\%$. На глибинах розробки понад 600 м вугільний пласт є небезпечним за раптовими викидами вугілля та газу.

Підготовка шахтного поля – блокова. Розміри блоків становлять: за простяганням $3,5 - 5,0 \text{ км}$; за падінням – $1,25 - 2,0 \text{ км}$. Підготовка у блоках – погоризонтна або панельна. Розміри панелей за простяганням – $1100 - 4000 \text{ м}$; за падінням – $900 - 2000 \text{ м}$. Довжина виїмкових стовпів при погоризонтній підготовці – $1600 - 2500 \text{ м}$. Система розробки – стовпова. Довжина лав сягає $200 - 300 \text{ м}$. Спосіб управління покрівлею – повне обвалення. Видобуток вугілля у лавах – комплексно-механізований. У межах виїмкових полів технологія робіт є безціликовою. Частина лав відпрацьовується з підтриманням конвеєрних виробок за лавою для їх подальшого повторного використання при відпрацюванні наступного стовпа. Також при відпрацюванні частини лав конвеєрні виробки, як правило, погашаються слідом за проходом лави та для нових виїмкових стовпів проводяться у присікання до виробленого простору відпрацьованих лав.

У межах шахти ПрАТ «ШУ «Покровське» переважає середньостійка (рідше стійка або нестійка), важкообвалювальна покрівля. Її площа складає близько 95% від загальної площі ділянки, а площа стійкої і легкообвалювальної покрівлі – близько 3% . За фактором стійкості гірничо-геологічні умови відпрацювання пласта характеризуються як відносно складні. Складні гідрогеологічні умови в комплексі з іншими факторами (тріщинуватість порід, розмиви, нестійкі породи) суттєво впливають на технологію видобутку вугілля.

Серед найбільш значущих ускладнюючих факторів шахтного поля слід виділити наступні: перехід зон геологічних порушень, розмивів і зон підвищеної тріщинуватості порід; складна гіпсометрія пласта; підвищене виділення метану в зонах геологічних порушень; виділення води з масиву; перехід зон зміни літології покрівлі; схильність порід підшви до здимання.

У більшості випадків гірничі виробки шахти ПрАТ «ШУ «Покровське» є сухими. В очисних і підготовчих виробках капіж води з'являється, зазвичай,

при повільному посуванні, коли порушується суцільність безпосередньої покрівлі до самої лінії вибою і при завалах у зонах тріщинуватих порід і дрібних тектонічних порушень.

Однією з характерних особливостей площі шахтного поля є наявність зон розмивів окремих ділянок вугільного пласта d_4 . Найбільш широка зона розмиву спостерігається на півдні шахтного поля. Гірничими роботами простежені, як правило, часткові розмиви пласта, виконані пісковиком або алевролітом. Вони розташовані на локальних ділянках і мають характер тимчасових потоків.

Безпосередньо над вугільним пластом на більшій частині площі залягає алевроліт потужністю 0,15 – 18,7 м, в основному 1 – 4 м у північній та 1 – 8 м у південній частині блоку. Алевроліт на контакт з вугіллям потужністю 0,4 – 0,6 м частіше за все масивний, рідше невиразношаруватий, з відбитками і обвугленими залишками рослинності за нашаруванням. Розшаровується на плити 5 – 15 см. За окремими свердловинами у 0,1 – 0,3 м від вугільного пласта в алевроліті відзначені поверхні ковзання під кутом до нашарування.

Алевроліт залягає у безпосередній та основній покрівлі. Частіше за все, алевроліт горизонтальношаруватий за рахунок чергування шарів потужністю 1 – 3 мм тонкозернистого пісковика і шарів 3 – 30 мм алевроліту. Зчеплення між деякими шарами слабе, через що виникає розшарування порід; товщина плиток розшарування складає 5 – 30 см. У верхній частині шару горизонтальна шаруватість змінюється пологохвилястою, що обумовлено чергуванням шарів потужністю 1 – 3 мм алевроліту та 1 – 2 мм тонкозернистого пісковика, місцями пологохвиляста шаруватість переходить у лінзоподібну. Алевроліт розшаровується на плити товщиною 10 – 20 см. На окремих невеликих ділянках алевроліт по всій потужності шару хвилястошаруватий, часто навіть горизонтальношаруватий.

У частині шахтного поля у безпосередній покрівлі залягає пісковик. Контакт алевроліта з вищезалягаючим середньо- або дрібнозернистим пісковиком є контактом розмиву, по якому зчеплення між цими породами незначне. Пісковик сірий, дрібнозернистий, польовошпатово-кварцевий, на

глинистому, рідше на кремнисто-глинистому та вапняковому цементі, горизонтальношаруватий за рахунок перешарування з алевролітом, з рослинним детритом і слюдою по нашаруванню, з прошарками вугілля, тріщинуватий, середньої міцності, контакт з вугіллям чіткий. Пісковик дрібнозернистий, на окремих ділянках переходить у крупнозернистий алевроліт. Основна підошва пласта d_4 представлена переважно пісковиком, інколи алевролітом і аргілітом.

Середні значення межі міцності алевроліту на стиск змінюються від 50 до 65 МПа, на стиск у водонасиченому стані – від 33 до 45 МПа; пісковика – від 68 до 125 МПа та у водонасиченому стані – від 55 до 107 МПа відповідно, збільшуючись з глибиною.

ПрАТ «ШУ «Покровське» продовжує нарощувати прохідницькі роботи й у 2022 році проведено близько 33 км нових гірничих виробок, що свідчить про орієнтацію на збільшення продуктивності.

Станом на сьогодні найбільша концентрація очисних робіт буде знаходитись у блоках № 10 і 11, при цьому глибина ведення гірничих робіт сягнула вже позначки 1000 м (рис. 1.5).

У відпрацюванні знаходиться ухильне поле блоку № 10 південної та північної частини, де у 2020 – 2022 роках відпрацьовані 7-а північна «біс» лава, 9-а південна лава, 11-а південна лава, корінна лава горизонту 593 м та виконані з підготовки низки виїмкових стовпів нових лав. За умовами вентиляції в одночасній роботі в блоці № 10 можлива робота 4-х очисних вибоїв. Забезпечення високих навантажень на очисні вибої південного крила блоку № 10 здійснюється за рахунок комплексної дегазації виробленого простору як підземної, так і свердловинами, пробуреними з поверхні. У блоці № 11 в роботі знаходилась 1 північна лава центральної панелі блоку № 11.

При експлуатації виїмкових виробок блоків № 10 і 11, а також попереднього № 7, спостерігалась проблема зниження їх стійкості з частими вивалами порід як з покрівлі виробок, так і з її боків як у процесі проведення, так і на сполученнях з лавами. Крім цього, вивали порід покрівлі спостерігаються безпосередньо і в очисних вибоях.

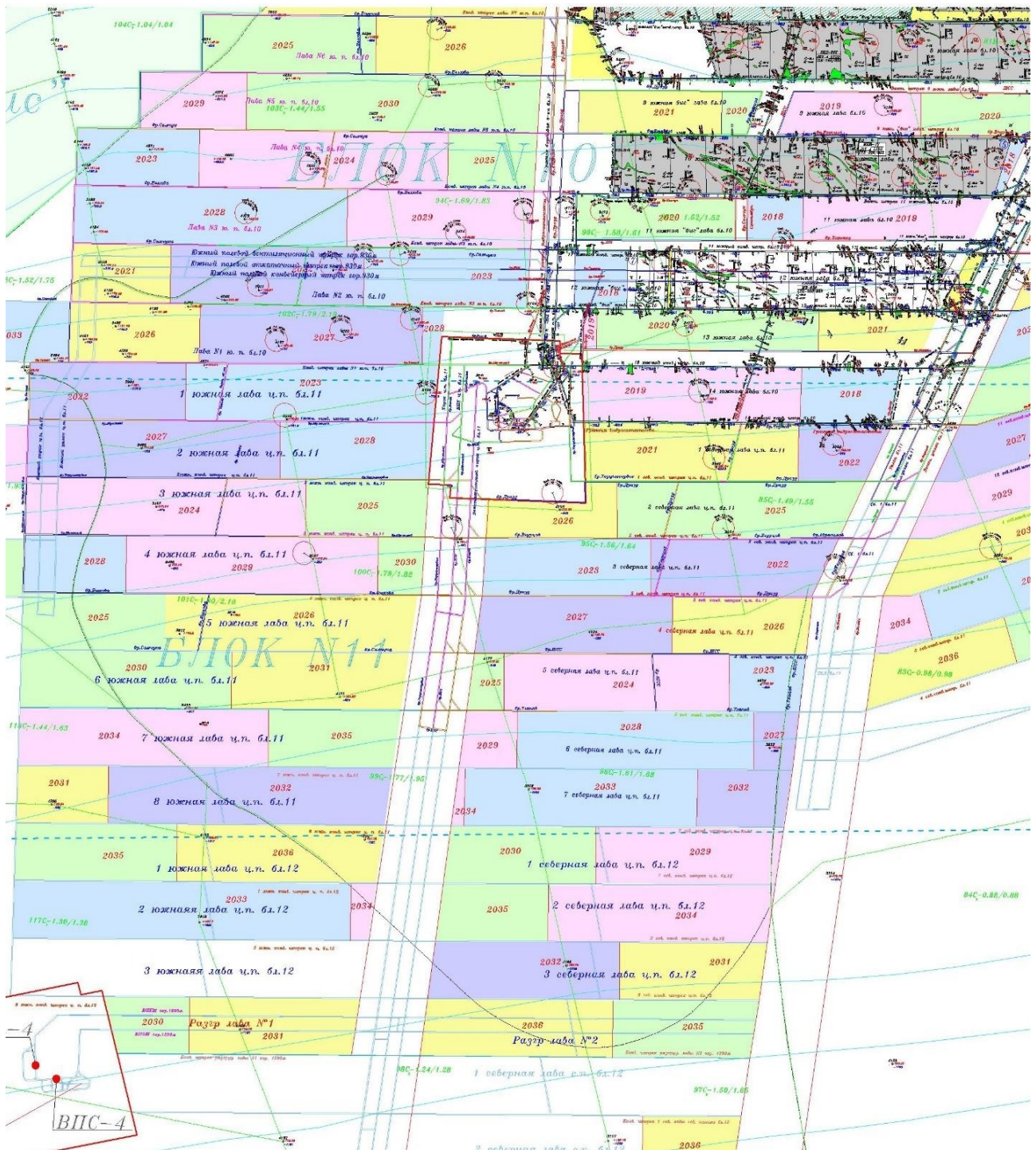


Рисунок 1.5 – Викопіювання з плану гірничих робіт
по пласту d_4 у блоках № 10 і 11

Зазначені негативні геомеханічні явища стали серйозною проблемою безпечного та безаварійного ведення як підготовчих, так і прохідницьких робіт, що потребує нагального вирішення.

1.3 Проблеми стійкості тріщинуватого масиву гірських порід при веденні гірничих робіт в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське»

Аналіз гірничо-геологічних умов шахтного поля, яке відпрацьовується ПрАТ «ШУ «Покровське», показує, що має місце значне поширення геологічних порушень, представлених двома типами – диз’юнктивні та плікативні. В межах шахтного поля пласт d_4 має просту та складну будови. У першому тектонічному блоці пласт переважно простої будови, у висячому крилі Котлінського насуву – складної будови. Протягом тривалого терміну відпрацювання запасів у процесі ведення гірничих робіт виявлено значну кількість дрібноамплітудних порушень загалом скидного характеру, з амплітудами не більше 1,0 м. У виїмковому стовпі кількість геологічних порушень може сягати 30% його площі [35]. Особливості та будова геологічних порушень вугільного пласта частково визначаються попередньою геологічною розвідкою ділянки виїмкового стовпа майбутньої лави, але детально уточнюються в процесі проведення виїмкових виробок. На рисунку 1.6 наведено викопіювання з плану гірничих робіт по пласту d_4 , де відпрацьовувалась 5 південна лава блока № 10.

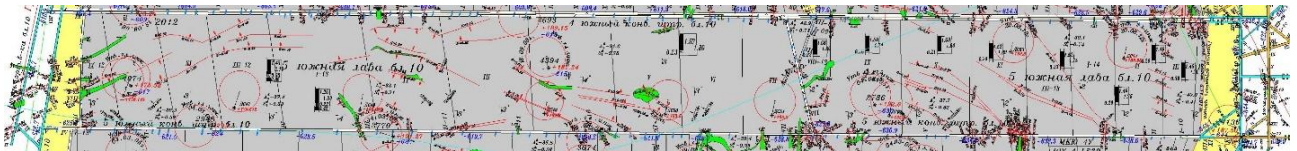


Рисунок 1.6 – Викопіювання з плану гірничих робіт по пласту d_4 (5 південна лава блока № 10)

З рисунка. 1.6 за довжиною виїмкового стовпа можна спостерігати наявність густої мережі дрібноамплітудних геологічних порушень ($H = 0,15 - 0,7$ м), які пересікались при веденні очисних і підготовчих робіт та значно ускладнили інтенсивність і якість ведення гірничих робіт. Це обумовлено наступними особливостями:

– підвищенням рівня зольності видобутого вугілля при переході геологічних порушень, яке у 5-й південній лаві блока № 10 сягнуло понад 48%;

– аномально високим напружено-деформованим станом масиву гірських порід навколо геологічного порушення, наслідком яких є обвалення порід при веденні як прохідницьких, так і очисних робіт у майбутньому.

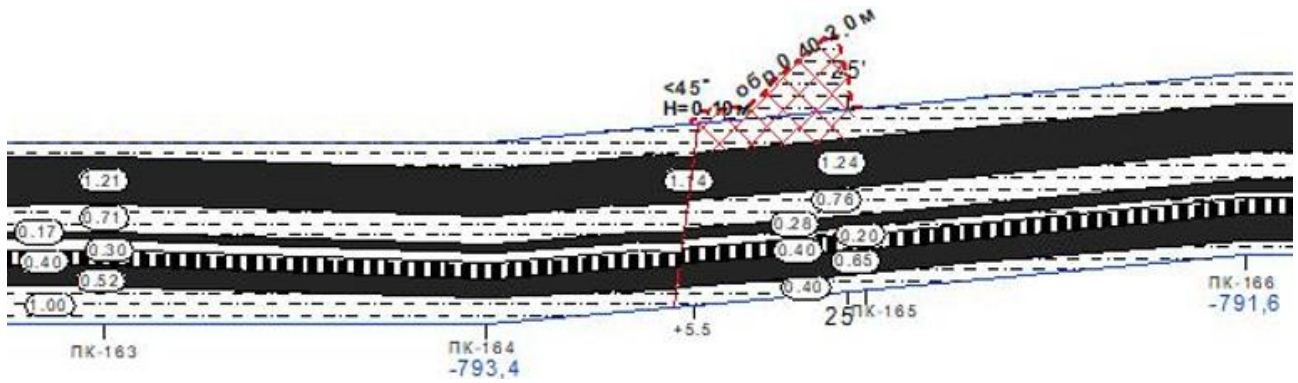
Як показує досвід ведення гірничих робіт на ПрАТ «ШУ «Покровське», при відпрацюванні запасів вугілля в очисних, підготовчих і капітальних виробках мають місце вивали порід покрівлі висотою від 0,2 – 0,3 до 4 – 6 м, причому в зонах вивалів породи дуже ослаблені й представлені слабкими алевролітами, іноді пісковиками [36, 37]. Вивали у прохідницьких та очисних вибоях, в основному, приурочені до зон впливу дрібноамплітудних геологічних порушень, під дією яких формується високий ступінь тріщинуватості масиву з ослабленими міцнісними властивостями, що, в цілому, обумовлює його низьку стійкість. Проте, як відмічається геологічною службою шахти, вивали також траплялись через наявність у породах покрівлі численних площин притирання і слюдисто-вуглистого матеріалу по нашаруванню.

Також зони розмивів порід у більшості випадків вміщують вуглистий матеріал, по якому трапляється відшарування покрівлі на висоту до 0,5 – 1,0 м. Вивалоутворення порід приконтурного масиву деяких виїмкових виробок у процесі їх проведення ілюструється на рисунку 1.7.

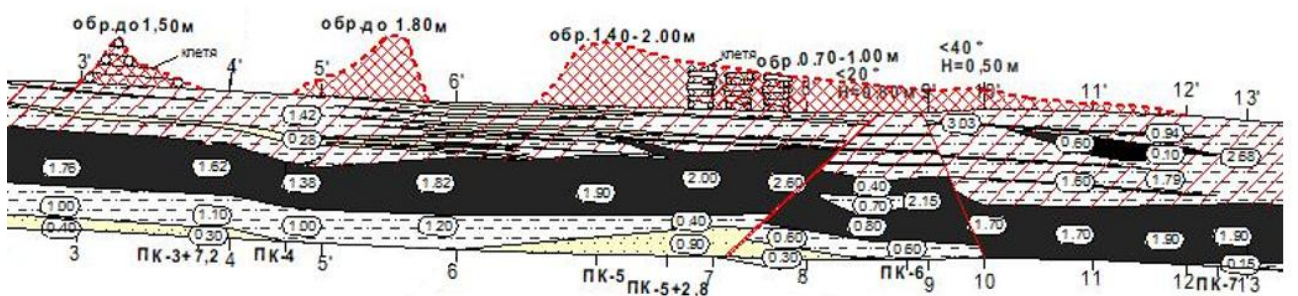
При проведенні виробок, особливо при перетинанні зміщувача геологічного порушення та у зонах його впливу, було зафіксовано численні випадки вивалів порід покрівлі. Довжина вивалів у гірничих виробках коливається від 3 – 5 до 30 – 60 м, при середньому значенні 10 – 15 м. Об'єм вивалів знаходився у діапазоні від 9 до 320 м³, при середньому значенні 70 – 100 м³.

Природа утворення вивалів порід пов'язана, перш за все, з їх ослабленими зонами, що виникають внаслідок розущільнення, перем'ятості та інтенсифікації тріщинуватості у зоні впливу геологічного порушення й підвищення напружень при розкритті послаблених порід прохідницьким вибоєм.

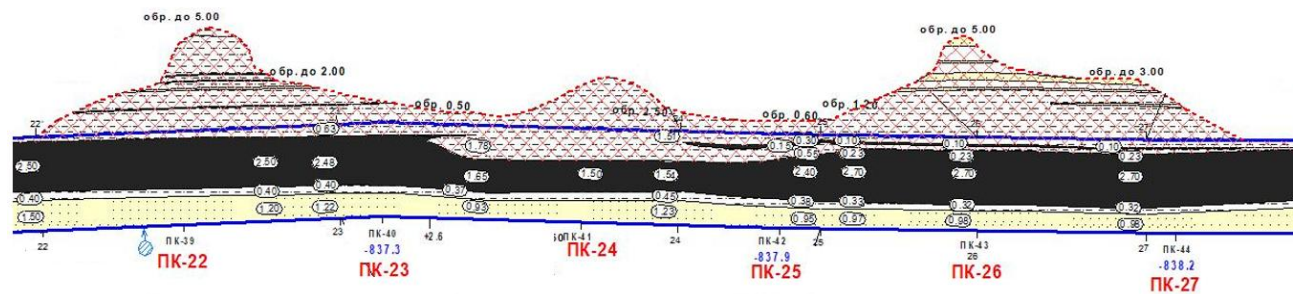
(a)



(б)



(в)



(г)

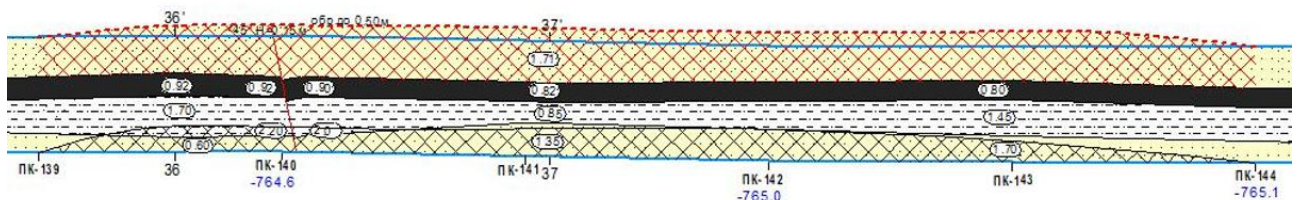


Рисунок 1.7 – Формування зон вивалоутворення приконтурних порід при проведенні виїмкових виробок: (а) 9-й північний конв. штрек бл. № 10; (б) 1-й південний конв. штрек бл. № 11; (в) 1-й північний. конв. штрек бл. № 11; (г) 9-й північний «біс» конв. штрек бл. № 10

Фіксація та спостереження за цими ослабленими зонами дозволяє встановити контури розвитку тріщинуватих і механічно слабких порід у покрівлі вугільного пласта, що має важливе значення для прогнозування стійкості гірничих виробок і розробки заходів щодо її підвищення протягом всього терміну існування.

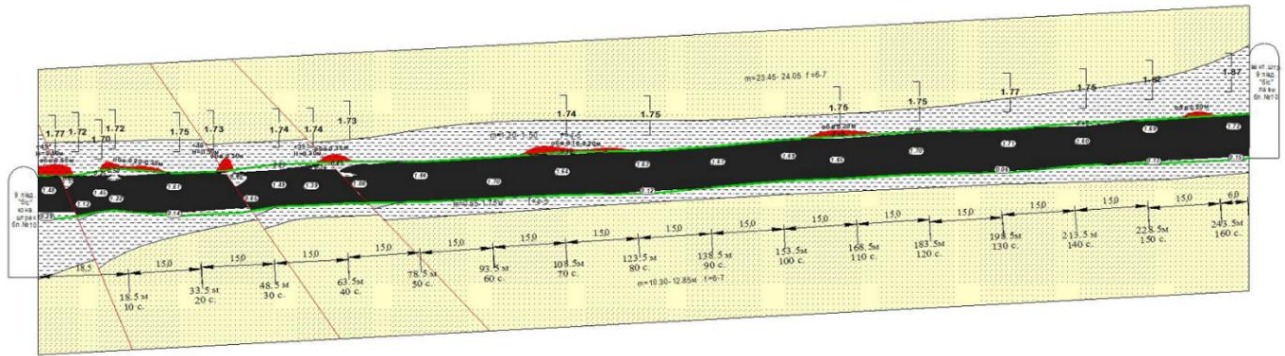
При проведенні виїмкових виробок для підготовки запасів виїмкового стовпа здійснюється геологічна дорозвідка вуглепородного масиву пласта d_4 , внаслідок чого виявляються дрібноамплітудні геологічні порушення і фіксуються випадки вивалів порід покрівлі по контуру виїмкових виробок.

Для попередження вивалоутворення та травмування робітників прохідницької бригади на шахті здійснюються наступні заходи. При виявленні непрогнозованого гірничо-геологічного порушення проведення виробки зупиняється. При підвищеній тріщинуватості порід покрівлі, для недопущення обвалення порід, здійснюється установка випереджального штангового кріплення по периметру виїмкової виробки. Крок основного кріплення в зоні підвищеної тріщинуватості порід непрогнозованого гірничо-геологічного порушення і після нього становить 5 м і повинен бути не більше 0,67 м.

У приви́бійних зонах лав також відбуваються явища вивалоутворення порід покрівлі (рис. 1.8). Так, ширина вивалів у середньому складає 0,3 – 1,0 м; проявляються періодично впродовж вибою через 2 – 20 м, при цьому найбільш уражені ділянки підвищених концентрацій гірничого тиску близько відпрацьованих раніше лав. Висота вивалів залежить від щільності порід, їх міцності та глибини розробки. Крім вивалів, пов'язаних з гірничим тиском, фіксується також їх частий прояв на ділянках підвищеної тріщинуватості та водонасиченості порід. Вивалоутворення, яке пов'язане з гірничим тиском, суттєво зменшується при збільшенні швидкості просування очисних вибоїв, а вивалоутворення, пов'язане з тріщинуватістю, є важкокерованим.

У пустотах вивалів при веденні прохідницьких та очисних робіт здійснюється викладка клітей з негорючих матеріалів із забутуванням боків виїмкової виробки.

(a)



(б)

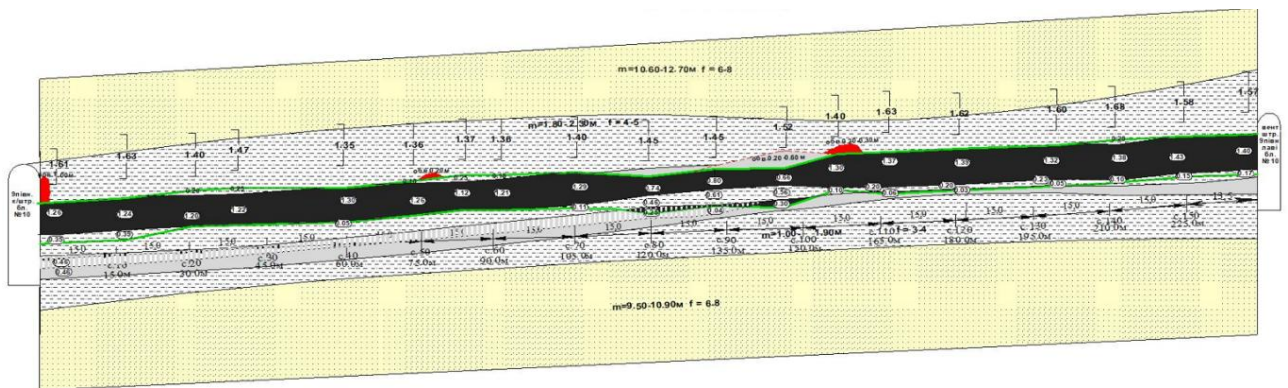


Рисунок 1.8 – Формування зон вивалоутворення в очисних вибоях:

(а) 9-та північна лава блока № 10; (б) 4-та лава південної панелі блока № 10

Слід зауважити, що, незважаючи на виникнення сприятливих факторів до вивалоутворення, таких як наявність дрібноамплітудних геологічних порушень і зон розмивів порід покрівлі вугільними прошарками, при підготовці запасів в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське» факти вивалів порід не завжди відбуваються, що прослідковується на фактичних продольних геологічних розрізах по виїмкових виробках. Зазвичай, вивали трапляються, коли розбиті тріщинами породи обвалюються у виїмкову виробку під дією власної ваги і ця сила є більшою, ніж сила зчеплення зі стійким шаром порід [38]. Проте, якщо зазначена сила менше, порушення приконтурного масиву може не відбутись на стадії проведення виїмкової виробки, але інтенсифікація вивалів можлива у випадку стрімкого зростання напружень в масиві, що може бути пов'язано, наприклад, із зоною опорного тиску при веденні вже в подальшому очисних робіт. Як відомо,

у зоні опорного тиску попереду лави величина напружень зростає у 2 – 5 разів залежно від потужності пласта, міцності порід та глибини розробки.

Для підтвердження цих припущень було порівняно факти вивалів в умовах певних визначених ділянок виїмкових виробок при їх проведенні та при подальшому веденні гірничих робіт (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Фіксація випадків вивалоутворення
приконтурних порід суто під впливом очисних робіт

Досліджувана виїмкова виробка	Ділянка, що вивчалась	Особливі умови масиву	Фіксація вивалу на етапі експлуатації виробки	
			Проведення	Очисні роботи
Конв. штрек 4 лави півд. панелі бл. № 10	ПК № 75	Геологічне порушення $H = 0,4$ м, $> 35^\circ$	—	Сполучення «лава – штрек» $h_{обв} = 0,4$ м
9 північний конв. штрек бл. № 10	ПК № 161	Незначний розмив пласта	—	Сполучення «лава – штрек» $h_{обв} = 1,0$ м
9 півд. «біс» конв. штрек бл. № 10	ПК № 161	Геологічне порушення $H = 0,4$ м, $> 35^\circ$	—	Сполучення «лава – штрек» $h_{обв} = 0,5$ м

Аналіз даних таблиці 1.2 показує, що при проведенні виїмкових виробок вивали можуть не спостерігатись, незважаючи на вплив негативних факторів – геологічних порушень й розмивів. Якщо при формуванні відслонення масиву прохідницьким вибоєм ступінь порушеності масиву не набула критичних значень до утворення вивалів, то їх інтенсифікація ймовірно відбувається далі у часі, вже під впливом очисних робіт при підвищених напруженнях у масиві, що спостерігається на сполученнях «лава – штрек».

Таким чином, розкриті прохідницькими вибоями зони геологічних порушень з високим ступенем ймовірності вплинуть на можливість вивалів порід при функціонуванні майбутньої лави, особливо на сполученні «лава – штрек», що загрожує безпеці робітників очисного вибою та ритмічності його роботи.

Звертаючи увагу на факти вивалів порід як при проведенні виробки, так і при веденні очисних робіт, очевидно, що її приконтурний масив потребує зміцнення протягом всього терміну експлуатації.

Можна констатувати, що ймовірний геомеханічний потенціал вивалів на етапі проведення виїмкової виробки не розкривається, або у зоні геологічного порушення вивал відбувся тільки з одного борту виробки. У такому випадку з'являється небезпека вивалів порід у подальшому призначенні виїмкової виробки – обслуговувати очисні роботи.

У майбутньому зберігається виникнення небезпеки вивалів у масиві гірських порід на сполученні «лава – виїмковий штрек». Як відомо, у зоні опорного тиску попереду лави величина вертикальних напружень зростає у 2 – 5 разів залежно від потужності пласта, міцності порід та глибини розробки [39, 40]. Підвищені напруження можуть спровокувати нерозкритий потенціал порід до схильності вивалів.

В умовах ПрАТ «ШУ «Покровське» для кріплення сполучення «лава – штрек» та управління покрівлею при відпрацюванні виїмкових ділянок застосовується випереджальне зміцнення покрівлі пласта зі сторони лави й викликано тим, що при виконанні кінцевих операції та зніманні стійок рамного кріплення при відслоненні тріщинуватих порід покрівлі існує небезпека їх вивалювання і травмування гірничих робітників.

Для попередження цих негативних геомеханічних явищ сьогодні на шахті застосовується випереджальне встановлення штангового кріплення. Для запобігання висипу та обвалення нестійких порід покрівлі здійснюється установка випереджального штангового кріплення. Випередження від вікна лави складає не менше 20 м, довжина штангового кріплення – 4,0 м. Шпури довжиною 3,8 м та діаметром 30 мм на відстані 100 мм бурять від вугільного пласта у бік масиву, з невеликим підйомом 10° та розворотом від осі виробки 60° . Відстань між шпурами 0,65 м (1 шт/раму). Очевидно, що в існуючих умовах, випереджальне штангове кріплення не завжди проявляє ефективність, про що свідчить наявність явищ вивалів порід на сполученнях «лава – штрек».

Якщо породи є тріщинуватими або знеміцненими, створюються небезпечні умови їх вивалоутворення. Природна тріщинуватість порід, що підсилена впливом геологічного порушення, призводить до розбиття масиву на блоки й утворення кусків певних розмірів. Так, наприклад, при інтенсивності тріщинуватості 5 – 10 шт/м масив порід може бути розділений на куски розміром 0,1 – 0,2 м, а крок встановлення штангового кріплення складає 0,65 м, що для таких умов ймовірно є недостатнім й не протидіє вивалам.

Аналіз низки паспортів кріплення та управління покрівлею при відпрацюванні виїмкових діляниць, а також місць повторюваних вивалів порід в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське», показав, що застосовується випереджальне зміцнення покрівлі пласта зі сторони лави. Це викликано тим, що при виконанні кінцевих операції і зніманні стійок рамного кріплення при відслоненні тріщинуватих порід покрівлі існує небезпека їх вивалювання і травмування гірничих робітників (рис. 1.9).

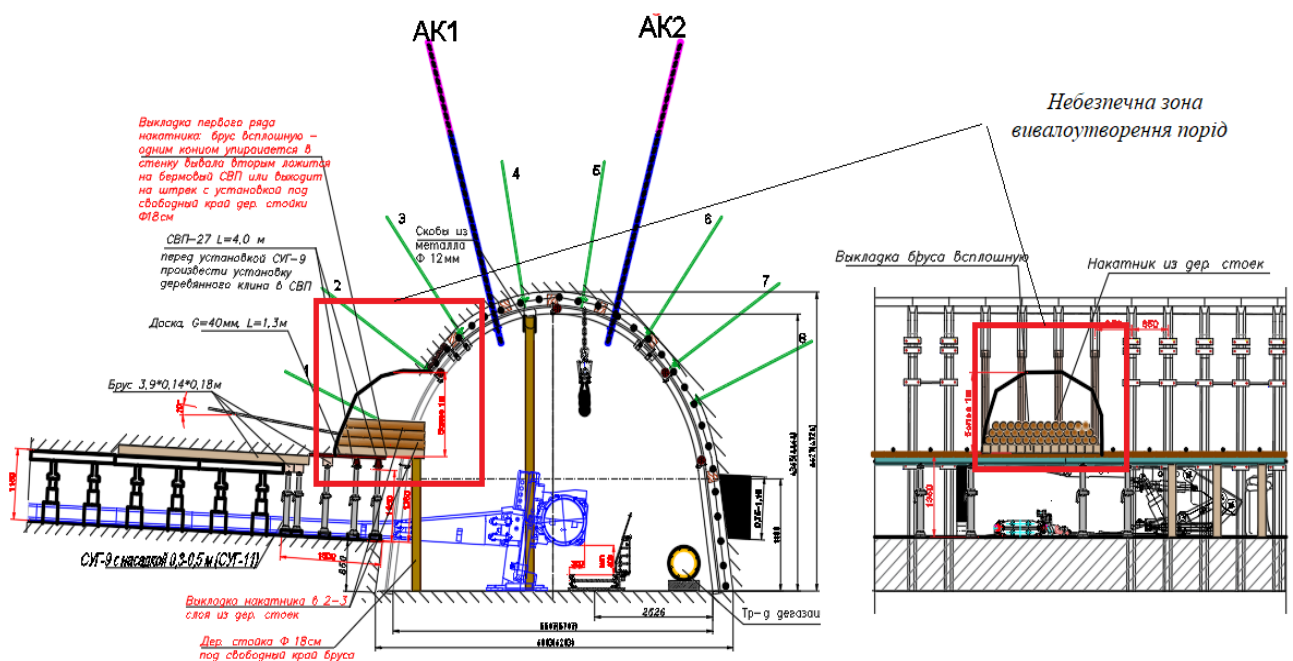


Рисунок 1.9 – Схематичне представлення ймовірної зони вивалоутворення порід на сполученні лави з конвеєрним штреком

Для попередження цих негативних геомеханічних явищ сьогодні на шахті застосовується випереджальне встановлення штангового кріплення, а особливості цього процесу є наступними. Для запобігання висипу та обвалення нестійких порід покрівлі здійснюється установка випереджального штангового кріплення. Випередження від вікна лави складає не менше 20 м, довжина штангового кріплення – 4,0 м.

Перед встановленням випереджального штангового кріплення необхідно обібрати вибій за допомогою оборника довжиною не менше 3,5 м від відшарованих шматків породи та встановити робочі полиці для розміщення перфоратора й забезпечення буріння шпурів на потрібній відстані від пласта. Після цього розпочинається буріння шпурів. Шпури довжиною 3,8 м та діаметром 30 мм бурять на відстані 100 мм від вугільного пласта у бік масиву, з невеликим підйомом 10° та розворотом від осі виробки 60° . Відстань між шпурами 0,65 м (1 шт/раму).

Буріння шпурів та встановлення штангового кріплення здійснюють за допомогою перфоратора з робочого полку.

Для виконання кінцевих операцій на сполученні лави зі штреками знімаються стійки рамного кріплення з урахуванням наступних особливостей:

- при кроці кріплення 0,65 м – на сполученні може бути демонтовано 4 стійки рамного кріплення на постійній основі, п'ята стійка демонтується перед вирубкою комбайна;

- при кроці кріплення 0,5 м – на сполученні може бути демонтовано 5 стійок рамного кріплення на постійній основі, шоста стійка демонтується перед вирубкою комбайна.

Враховуючи відстань від верхньої межі вікна лави, чим є породи покрівлі, до замків рамного кріплення зі знятими стійками (приблизно 1,5 м), а також кількість 4-х знятих стійок при, наприклад, кроці встановлення 0,65 м, утворюється площа відслонення порід близько $4,9 \text{ м}^2$. Якщо породи є тріщинуватими або знеміцненими, створюються небезпечні умови їх вивалоутворення.

Основним завданням є ін'єкційне зміцнення порід, щоб площа відслонення на сполучення лави зі штреком при виконанні кінцевих операцій була надійно закріплена поліуретановими смолами.

Очевидно, що в існуючих умовах, при фіксації фактів вивалів порід на сполученнях випереджальне штангове кріплення не завжди проявляє ефективність. Природна тріщинуватість порід, що підсилена впливом геологічного порушення, призводить до розбиття масиву на блоки й утворення кусків певних розмірів. Так, при інтенсивності тріщинуватості 5 – 10 шт/м масив порід може бути розділений на куски розміром 0,1 – 0,2 м. Для утвореної кускуватості порід при вивалах у зоні встановлення штангового кріплення з кроком 0,65 м, вірогідно, є недостатньо ефективним, адже куски порід у вивалах можуть бути меншими за цю відстань і сягати 0,3 м, а іноді і більше.

Таким чином, на підставі проведених досліджень визначено, що в умовах значних глибин понад 1000 м використання дворівневого комбінованого рамно-анкерного кріплення на сполученнях «лава – штрек» у виробках повною мірою не усуває проблему вивалоутворення порід, що дозволяє науково розглядати можливість зміцнення приконтурного масиву заздалегідь, ще на стадії проведення виїмкової виробки. Проте, такі науково-технічні рішення потребують більш ефективних заходів.

1.4 Аналіз досліджень щодо способів підвищення стійкості приконтурного масиву виїмкових виробок

Питаннями підвищення стійкості виїмкових виробок вугільних шахт займались багато як закордонних, так і українських вчених. Серед відомих українських вчених слід відзначити таких – Бондаренко В.І. [41, 42], Булат А.Ф. [38, 43], Халимендик Ю.М. [44, 45], Круковський О.П. [46, 47], Кириченко В.Я. [48], Шашенко О.М. [49, 50], Сахно І.Г. [51, 52], Негрій С.І. [53], Курносов С.А. [54], Снігур В.Г. [55] та інші. У результаті їх багаторічної науково-дослідницької діяльності опубліковано чимало наукових праць, монографій, нормативних документів, патентів, методик. Здебільшого праці стосувались розвитку

наукових основ ресурсозберігаючих систем кріплення гірничих виробок, а саме рамно-анкерного та дворівневого комбінованого кріплення.

Особливу увагу в дослідженнях зазначених відомих науковців приділено саме розробці науково-технічних заходів щодо вдосконалення систем кріплення виїмкових виробок у зоні впливу очисних робіт, оскільки проектування систем кріплення раціонально здійснювати у найгірших і складніших умовах, яким є вплив фронту очисних робіт при відпрацюванні запасів виїмкових стовпів.

Безаварійність функціонування ланки сполучення «лава – штрек» безпосередньо пов'язана зі стійкістю масиву гірських порід і досягається, коли усуваються випадки вивалів порід та зупинки очисних вибоїв і забезпечується завдяки застосуванню ефективних, з геомеханічної точки зору, заходів підтримання виробки. У зоні сполучення лави з виїмковою виробкою (зона 2) спостерігаються найбільші навантаження (рис. 1.10) [56].

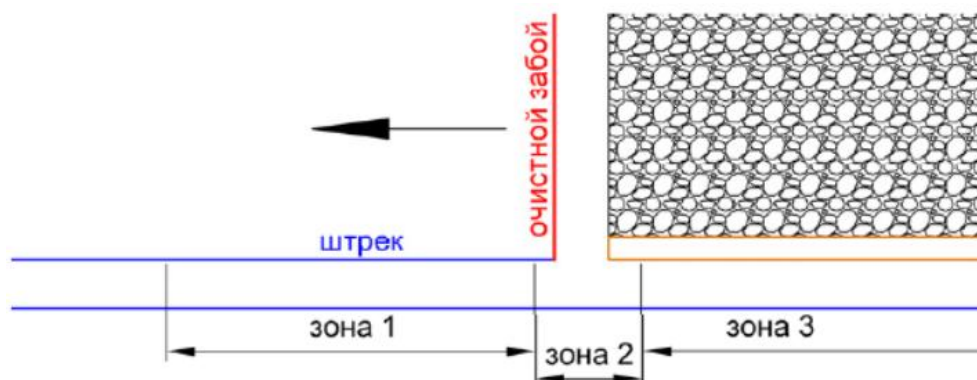


Рисунок 1.10 – Зони впливу лави на підготовчу виробку:
зона 1 – вплив динамічного опорного тиску попереду вибою;
зона 2 – сполучення «лава – штрек»; зона 3 – зона впливу
залишкового опорного тиску

На підставі багаторічних досліджень і досвіду підтримання сполучень лав з виїмковими виробками забезпечується наступними засобами [57-60]:

– використанням прогресивних комбінованих систем підтримання, що складаються з рамно-анкерного кріплення та підсилення канатними анкерами глибокого закладення;

– використанням ін'єкційного закріплення різними полімерними сполуками наряду з прийнятими системами кріплення (у тому числі й комбінованих систем).

Для підтримання сполучення лав з виїмковими штреками сьогодні вугільні шахти відмовляються від застосування традиційних дворядних кріплень сполучення, адже збільшуються витрати часу на їхнє пересування, які, за існуючими даними, можуть становити до 30% від загального часу виконання кінцевих операцій на штреку. Крім того, встановлення стійок і застосування кріплень сполучення загромаджує переріз виробки, перешкоджає розміщенню обладнання та збільшує аеродинамічний опір виробки.

Також у нормативному документі [61] зазначається, що при застосуванні рамно-анкерного кріплення виробки або з канатними анкерами, кріплення сполучення може не встановлюватись. Надалі анкерне кріплення служить як кріплення сполучення.

Успішний досвід застосування комбінованого кріплення на сполученні лав зі штреками досягнуто в умовах шахт Західного Донбасу [62]. Проводились дослідно-промислові роботи зі способу посилення 165-го збірного штреку ПСП «Шахта «Степова» попереду очисного вибою 163-ї лави на глибині 370 м, який передбачав заміну штрекових механізованих кріплень сполучення і стійок посилення попереду лави на канатні та сталеполімерні анкери. Це дозволило зберегти перетин попереду очисного вибою і на поєднанні з лавою, а також забезпечити ефективну експлуатацію стругового комплексу з продуктивністю 5400 т/добу та швидкістю просування очисного вибою 200 м/міс. Відмічається безремонтне підтримання штреку за лавою.

В умовах вугільної шахти Ningtiaota (Західний Китай) була спроба вирішити проблему підтримання виїмкових виробок, що використовуються при видобутку вугілля довгими вибоями [63]. Шахта є типовою 10-мільйонно тонною сучасною шахтою. Довжина простягання вибою С 1202 шахти становить 4000 м, а довжина лави – 339 м. Основний видобуток пласта вугілля 2 – 2, середня потужність вугільного пласта – 4,2 м, середня глибина залягання – 162 м.

Основна покрівля виробки представлена переважно дрібним пісковиком середньої потужності 16,65 м; безпосередня покрівля в основному алевролітова, середньою товщиною 3,5 м. У результаті застосування канатних анкерів на сполученні лави зі штреком максимальне значення характерних деформацій двох штреків становило лише 7,1 і 10,1 см, що забезпечувало достатнє підтримання без механізованого кріплення сполучення. Спостерігалась стійка робота досліджуваного очисного вибою С 1202.

Досліджено можливість застосування канатних анкерів для підтримання транспортних штреків на сполученні із лавою у вугільній шахті в провінції Шаньсі (Китай) [64]. Шахта видобуває вугілля на глибині 350 м методом довгих виїмкових стовпів. Потужність пласта – 2,2 м і з кутом падіння 10° . В покрівлі залягає пісковик потужністю 2,2 м низької стійкості. При традиційному кріпленні спостерігались значні деформації у транспортному штреку. На основі результатів моделювання було запропоновано нову конструкцію кріплення штреку, яка включала оптимальне розташування тросового анкера, цементування на всю довжину та високий рівень попереднього його натягу. Польовий експеримент із застосуванням нової конструкції кріплення проводився на ділянці штреку 100 м. Експериментальна ділянка показала меншу конвергенцію бічних порід, ніж у попередніх штреках. Дані моніторингу засвідчили, що деформація на дослідній ділянці була щонайменше на 40 – 50% меншою, ніж на попередніх ділянках, і досягнуто безаварійну роботу очисного вибою.

Застосування рамного анкерного кріплення та анкерів глибокого закладання показує ефективність при плавних прогибах і відшаруваннях порід приконтурного масиву значних розмірів. Проте, все ж таки доцільно розробляти такі науково-технічні заходи кріплення виїмкових виробок, які забезпечать стійкість ще на технологічній стадії її проведення, що забезпечить її надійну геомеханічну стійкість як поза зоною впливу очисних робіт (проведення, зона 1), так і під впливом вже очисних робіт (зона 2).

У такому разі, коли традиційні види кріплення (рамне, рамно-анкерне, канатні анкери) є неефективними з причини значних деформацій покрівлі

виробок, а також більшого ступеня кускуватості порід вивалів, застосовують ефективне ін'єкційне закріплення нестійких тріщинуватих порід шляхом нагнітання у масив полімерних речовин, що швидко твердіють, для його консолідації та скріплення [65]. Багатьма дослідженнями доведено, що на ступінь зміцнення тріщинуватого масиву ефективніше впливають полімерні смоли, ніж нагнітання цементного розчину [66, 67], тому далі приймається до уваги ін'єкційне закріплення приконтурного масиву виїмкової виробки безпосередньо полімерними смолами.

Застосування ін'єкційного зміцнення у вугільних шахтах сприяє підвищенню стійкості гірничих виробок на ділянках ослабленого, тріщинуватого або водонасиченого масиву. Різні види хімічних смол (поліуретанові, епоксидні, фенол- та сечовино-формальдегідні, органо-мінеральні) використовують для вирішення завдань зміцнення масиву під час ведення або відпрацювання очисних вибоїв, у тому числі в самих вибоях, а саме при вивалах порід над секціями механізованого кріплення. На практиці застосовують випереджальне зміцнення (до початку очисних або прохідницьких робіт), одночасне (у складі прохідницького циклу) та наступне зміцнення масиву. Полімерна смола ін'єкується під тиском у масив вибою через нагнітальні шпури або трубчасті анкери, утворюючи міцний штучний зв'язок між розбитими блоками породного масиву.

У закордонній практиці технологія ін'єкційного зміцнення виникла у 1960-х роках у Німеччині й з того часу активно розвивалася [68]. В Європі та США накопичено значний досвід застосування поліуретанових та епоксидних смол для склеювання гірських порід. Саме поліуретанові смоли (двокомпонентні) мають значний технічний потенціал, швидко твердіють, розширюються та проникають у найдрібніші тріщини до 0,01 – 0,05 мм. Використання таких складів дозволяє усунути конв'єргенцію порід, зв'язати блоки масиву та підвищити його міцність. Після твердіння поліуретанові смоли можуть досягати високих міцнісних характеристик на стиск, вигин і зсув (понад 50 – 70 МПа) [69].

Проведені натурні дослідження зміцнення занадто тріщинуватої покрівлі в очисному вибої вугільної шахти Вірджинії із застосуванням поліуретанової смоли. Результати показали, що щорічні обвалення (до 2 – 3 разів на рік) повністю припинилися. Автори зазначають, що для ефективності достатньо створити штучну балку зі смоли у глибині масиву 0,6 – 1,8 м [70].

Китайські фахівці при проведенні виробки застосували гнучку поліуретанову смолу, заповнивши тріщини та поглинувши воду у глинистому масиві. Після затвердіння міцність масиву значно зросла (середня міцність склала 65,8 МПа). Ін'єктування здійснювалось на глибину 8 м при тисках 1 – 3 МПа, внаслідок чого створено опорне кільце у масиві, що на 98% попередило ймовірність обвалів покрівлі [71].

На шахтах Донбасу відоме застосування двокомпонентних поліуретанових смол для зміцнення масивів покрівлі в очисних вибоях. Так, довжина ін'єкційних шпурів на шахтах Донбасу не перевищує 3,0 – 3,5 м, а кут нахилу шпурів вибирається за станом покрівлі. Об'єм смоли, що вводиться на шпур, близько 15 – 40 л, середній час нагнітання – 10 – 20 хв. Використовували переважно поліуретанові композиції серії «Беведол-Беведан» з тривалістю повзучості 60 – 240 с, а також епоксидні та фенольні смоли. Основна мета полягала у запобіганні обваленням покрівлі та формуванні «куполів» у виробках й зміцнення порід покрівлі пласта. Відзначається, що міцність масиву після ін'єктування, за різними даними, зростає у 1,5 – 2 рази [72].

Незважаючи на всі переваги, застосування поліуретанових смол є порівняно дорогим і пов'язане з необхідністю дотримання підвищених заходів безпеки, оскільки компоненти можуть бути певною мірою токсичними у рідкому стані, що потребує безпекових способів їх зберігання в ємностях на виїмкових штреках. Тому, закріплення приконтурного масиву виїмкової виробки вздовж всієї її довжини є недоцільним, і при цьому, на наш погляд, ефективним слід вважати саме диференційний підхід до зміцнення певних ділянок виїмкових виробок.

Виконано аналіз наукового доробку закордонних і українських вчених щодо розвитку та застосування полімерних смол для закріплення гірничих виробок, який систематизовано у хронологічному порядку (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Зведений аналіз основних наукових праць
з ін'єкційного зміцнення тріщинуватих масивів гірських порід

Автор	Науковий внесок
Канівець О.Н., 1968, УРСР [73]	Вперше в СРСР запропоновано спосіб зміцнення виробок за допомогою синтетичних смол (зокрема, карбамідних), обґрунтовано можливість їх застосування в шахтах.
Янковські А., 1972, Німеччина [74]	Розробка першої у світі методики застосування поліуретану для закріплення порід. Впроваджено технологію закріплення тріщинуватого масиву за рахунок закачування смоли, яка швидко стала стандартом в Німеччині.
Шаллер С., 1986, Австралія [75]	Проведено одне із перших випробувань двокомпонентної смоли для зміцнення покрівлі у лаві. Встановлено зниження переміщення порід на ділянці, результати сприяли впровадженню даного методу в австралійських шахтах.
Клішин Н.К., Склепович К.З., 1975 – 2007, Україна [76, 77]	Розроблено геомеханічні основи технологій зміцнення покрівлі у очисних і підготовчих вибоях шахт із використанням хімічних і комбінованих способів (карбамідні смоли, полімерні склади, анкерування, безшпурові методи) та забезпечення стійкості гірничих виробок і контролю стану масиву порід у складних умовах Донбасу.
Касьян М.М., 1995, Україна [78]	Перевірено методику оцінки проникності тріщинуватого масиву для розрахунку ін'єкційного кріплення. У польових умовах встановлено параметри фільтрації смоли через тріщини, що лягло в основу розрахунку радіусу поширення ін'єкційного складу навколо свердловини для планування відстані між шпурами та об'єму смоли.
Буддері П., 2003, Австралія [79]	Розроблено рекомендації для австралійських шахт з метою ефективного застосування поліуретану у великих об'ємах (при кріпленні довгих ділянок лави), знизивши витрати та уникаючи надмірної витрати смоли.
Канін, В.О., 2004, Україна [80]	Розроблено нову карбамідну полімерну смолу СКАТ і проведено результати випробувань закріплюючого складу СКАТ у різних гірничо-геологічних та гірничотехнічних умовах, переважно для закріплення локальних зон підготовчих виробок та у очисних вибоях.
Молінда Г., 2008, США [81]	Комплексне дослідження поведінки поліуретанової смоли у вугільних шахтах США, в результаті якого встановлено, що при сильній тріщинуватості покрівлі смола створила сполучну сітку і зупинила обвалення, а в умовах шаруватих слабких порід – проникала тонкими прошарками з обмеженим ефектом.
Венг М., 2025, Китай [82]	Досліджено випереджаючий тампонаж зони тектонічного порушення на глибокій шахті. Проведено підбір оптимального матеріалу (ультра-тонкий цемент) та схеми закачування перед підходом лави до розлому. Встановлено різке зниження обвалів вугілля та покрівлі при проходженні порушення та зростання швидкості виймання у 2 – 3 рази. Підтверджена ефективність попереднього закріплення зон дроблення масиву для безпеки ведення очисних робіт.
Недостатньо вивчено	Випереджальне ін'єктування поліуретанових смол у зоні впливу геологічних порушень для забезпечення ефективності ведення як підготовчих, так і очисних робіт у майбутньому.

Аналіз наукового доробку свідчить, що більшість проведених досліджень, починаючи з 1970-х років, були спрямовані на вдосконалення технологій та локальне застосування полімерних смол для ремонту або посилення виробок у вже існуючих проблемних зонах.

Проте, на сьогодні недостатньо вивченим залишається питання попереднього ін'єкційного зміцнення масиву ще на стадії проведення підготовчих виробок, які у подальшому зазнають додаткового навантаження від очисних робіт, особливо у зонах впливу геологічних порушень, де характерна наявність зон ослаблених і тріщинуватих порід. Існуючі рекомендації переважно базуються на досвіді зміцнення масиву, що вже перебуває під впливом фронту лави, і є недостатніми для оптимізації параметрів ін'єктування на етапі проходки з метою завчасного створення штучної укріпленої балки. Окрім того, не повною мірою вивчено еволюцію напружено-деформованого стану закріпленого поліуретановими смолами приконтурного масиву на основних етапах функціонування виїмкової виробки.

Таким чином, актуальним та перспективним науковим напрямом є обґрунтування параметрів попереднього ін'єкційного зміцнення приконтурного масиву виїмкової виробки з урахуванням зон його знеміцнення під впливом дрібноамплітудних геологічних порушень.

Аналіз передових досліджень показує, що при нагнітанні поліуретанових смол у тріщинуватий приконтурний масив збільшується його структурна цілісність та несуча здатність за рахунок заповнення тріщин, склеювання окремих блоків та створення єдиного композитного матеріалу «порода – полімер». Дослідження українських і світових науковців кількісно підтверджують значне покращення основних фізико-механічних властивостей, що є особливо актуальним для умов вугільних шахт. Так, міцність на стиск, залежно від типу смоли та початкового стану масиву, може зростати від 2 до 5 разів відносно початкового стану різного ступеню тріщинуватого масиву гірських порід. Критично важливий показник міцності на зсув для тріщинуватих порід, що визначає опір зміцненню по розривах, після заповнення тріщин поліуретановими

композитами, підвищується до 270% порівняно з незаповненими тріщинами [83]. При цьому, суттєво зменшуються деформації виробки під навантаженням [84]. Крім силових характеристик, відбувається зниження водопроникності: коефіцієнт фільтрації масиву може зменшуватися на кілька порядків, досягаючи значень до 10^{-7} см/с, що фактично формує властивість водонепроникності порід і запобігає їх ослабленню та руйнуванню під дією води [81].

1.5 Напрямок підвищення стійкості тріщинуватого масиву при повторному використанні виїмкових виробок

Основною ідеєю ін'єкційного закріплення полімерними смолами повинно стати скріплення та зміцнення тріщинуватого масиву порід покрівлі у єдину стійку армопородну піддатливу конструкцію, яка витримує достатні відслонення в часі без втрати суцільності, при цьому в'язко-пластично деформуючись. Виходячи з цього, для попередження вивалів порід, підвищення стійкості та цілісності виїмкової виробки протягом всього терміну експлуатації саме при її проведенні, доцільно застосувати попереднє ін'єкційне закріплення порід поліуретановими смолами, що дозволить у майбутньому досягти безаварійної експлуатації сполучень «лава – штрек» при виконанні очисних робіт (рис. 1.11).

Необхідність застосування спеціальних заходів зі зміцнення масиву гірських порід викликана випадками порушення його цілісності у процесі ведення очисних та підготовчих робіт при використанні прийнятих сучасних і прогресивних видів кріплення – комбінації застосування рамного кріплення зі встановленням сталеполімерних та канатних анкерів. Такі заходи можуть бути реалізовані шляхом нагнітання у сильно тріщинуватий масив вискоефективних поліуретанових смол для консолідації порушених порід, зміни фізичного стану приконтурного масиву та переведення його з режиму крихкого до в'язко-пластичного руйнування. Порушення цілісності масиву гірських порід призводить до небезпеки виникнення ситуацій травматизму підземних гірничих робітників та створення аварійних ситуацій, що веде до зупинки ведення очисних і прохідницьких робіт, й, відповідно, затримки у виконанні запланованих планом показників.

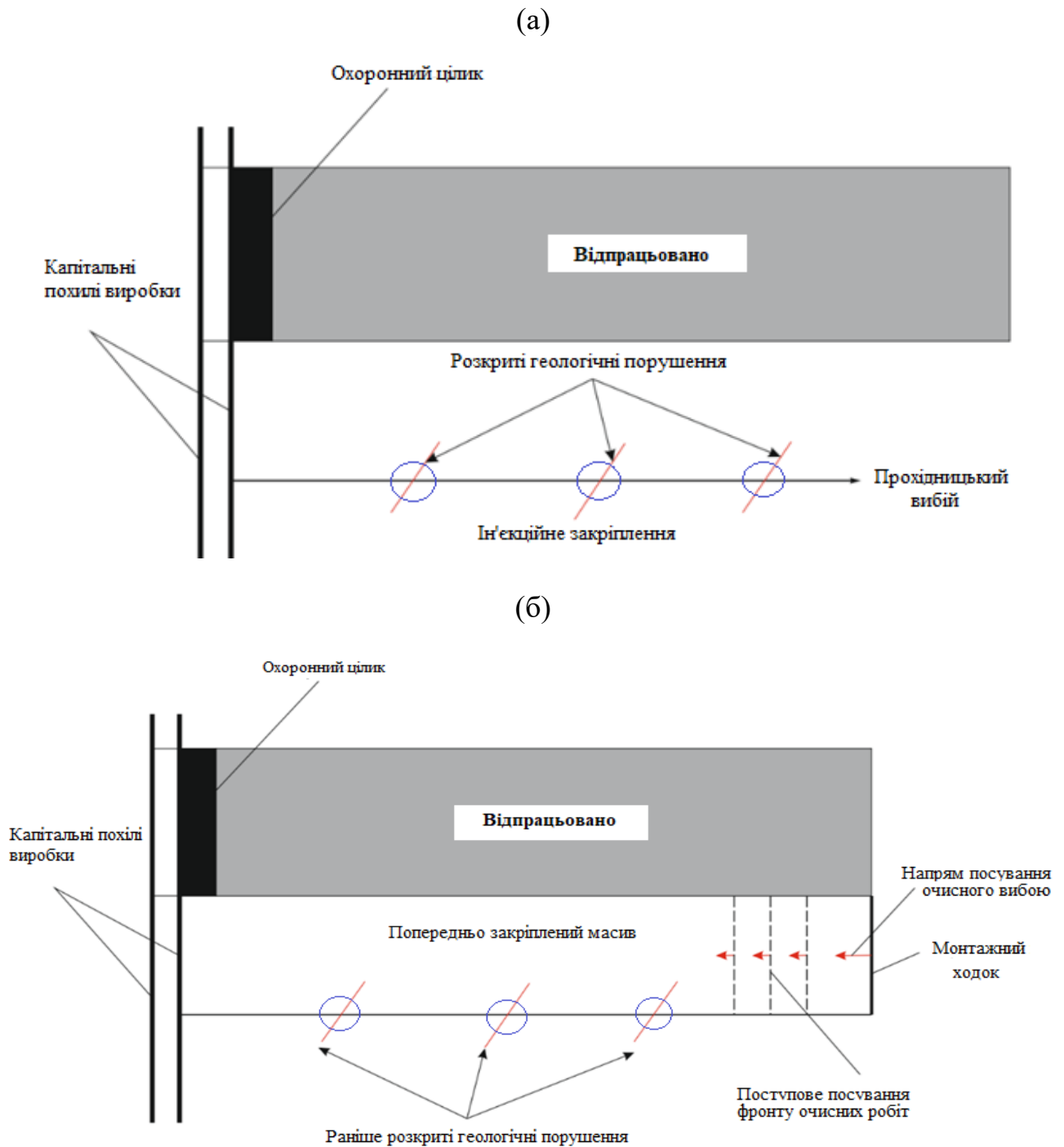


Рисунок 1.11 – Концепція попереднього ін'єкційного закріплення тріщинуватих порід приконтурного масиву в зоні впливу геологічних порушень: (а) стадія проведення виїмкової виробки для підготовки стовпа; (б) стадія виконання очисних робіт у підготовленому виїмковому стовпі

Подальші дослідження будуть спрямовані на наукове обґрунтування технологічних параметрів нагнітання поліуретанових смол у тріщинуваті породи приконтурного масиву, а саме зон пониженої стійкості порід, ґрунтуючись на

результати лабораторних, чисельних і натурних шахтних досліджень. Важливо, що ін'єкційне зміцнення приконтурного масиву виїмкової виробки передбачається здійснювати не суцільно по всій її довжині, а диференційовано, лише на ділянках, де у процесі проходки або прогнозу виявлено геологічні порушення, розмиви чи зміну літології порід, що призводить до формування зон підвищеної тріщинуватості.

У подальшому, при відпрацюванні лави та впливі очисного вибою на виїмкову виробку, заздалегідь зміцнений приконтурний масив зберігає цілісність і забезпечує безаварійну експлуатацію сполучень «лава – штрек», знижуючи ймовірність утворення вивалів покрівлі, підвищуючи безпеку та ритмічність роботи прохідницьких і очисних вибоїв, зменшуючи при цьому потребу в дороговартісному перекріпленні виїмкових штреків.

1.6 Формування мети, завдань і структурно-логічної схеми досліджень

Метою дослідження є обґрунтування раціональних параметрів ін'єкційного закріплення порід приконтурного масиву на основі дослідження його геомеханічного стану в зоні впливу геологічних порушень з урахуванням структури масиву та геологічного індексу міцності й трансформації фізико-механічних властивостей порід, зміцнених поліуретановими смолами, для забезпечення стійкості підготовчих та у подальшому очисних виробок.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні наукові завдання:

1. Вивчити стан проблем стійкості виїмкових виробок та існуючих способів її підвищення в умовах тріщинуватого приконтурного масиву.

2. Розробити комплексну методику лабораторних досліджень, чисельного моделювання геомеханічного стану масиву та шахтних випробувань нагнітання поліуретанових смол.

3. Дослідити фізико-механічні властивості масиву, консолідованого поліуретановою смолою, та оцінити взаємозв'язок індексу геологічної міцності масиву з тріщинною пустотністю.

4. Провести чисельне моделювання геомеханічного стану приконтурного масиву в зоні впливу геологічних порушень з урахуванням зміцненого полімерними складами приконтурного масиву.

5. Провести шахтні натурні дослідження зміцнення приконтурного масиву полімерними смолами у зоні впливу геологічного порушення.

6. Обґрунтувати раціональні технологічні параметри випереджального ін'єкційного закріплення приконтурного масиву виїмкових виробок та надати економічну оцінку розробленим рішенням.

1.7 Висновки до розділу 1

1. Аналізом визначено, що на тлі зниження загального обсягу видобутку кам'яного вугілля, особливо марок К та Г, основні навантаження на вітчизняний ресурс економічно важливої марки К лягають на шахти центрального району Донбасу, зокрема ПрАТ «ШУ «Покровське». Понад 30% аварій припадає на обвалення порід покрівлі в умовах тріщинуватих масивів, особливо в зонах впливу очисного фронту. Зазначено, що для недопущення руйнування гірського масиву та створення небезпечних ситуацій, пов'язаних з обваленням порід, повинні застосовуватись ефективні заходи безаварійного підтримання виїмкових виробок протягом всього терміну їх існування.

2. Встановлено, що при експлуатації виїмкових виробок блоків № 10 і 11 та попереднього № 7 спостерігалась проблема зниження їх стійкості з частими вивалами порід як з покрівлі виробок, так і з її боків у процесі проведення, а також на сполученнях з лавами. Крім цього, вивали порід покрівлі спостерігаються і у безпосередньо очисних вибоях. Зазначені негативні геомеханічні явища стали серйозною проблемою безпечного та безаварійного ведення як підготовчих, так і прохідницьких робіт.

3. Детальний аналіз гірничо-геологічних умов ПрАТ «ШУ «Покровське» показує, що вивали порід приконтурного масиву висотою від 0,5 до 4,0 м та довжиною у середньому 15 – 20 м переважно приурочені до зон впливу дрібноамплітудних порушень, що формують підвищену тріщинуватість і

сприяють ослабленню несучої здатності порід. Особливо небезпечними є зони сполучення «лава – штрек», де зафіксовані повторні вивали після проведення виїмкових виробок на висоту 0,5 – 1,0 м та зменшення цілісності масиву на 30 - 60%. Встановлено, що традиційне рамно-анкерне кріплення з кроком 0,65 м у таких умовах недостатньо ефективне, а стабілізація приконтурного масиву потребує впровадження його попереднього зміцнення.

4. Закордонний та вітчизняний аналіз показав, що сьогодні недостатньо вивченим залишається питання попереднього ін'єкційного зміцнення масиву ще на стадії проведення підготовчих виробок, які у подальшому зазнають додаткового навантаження від очисних робіт, особливо у зонах впливу геологічних порушень, де характерна наявність зон ослаблених і тріщинуватих порід. Існуючі рекомендації переважно базуються на досвіді зміцнення масиву, що вже перебуває під впливом фронту лави, і є недостатніми для оптимізації параметрів ін'єктування на етапі проходки з метою завчасного створення штучної укріпленої балки. Окрім того, не повною мірою вивчено еволюцію НДС, закріпленого поліуретановими смолами приконтурного масиву на основних етапах функціонування виїмкової виробки.

5. Визначено ефективний напрям підвищення стійкості тріщинуватого приконтурного масиву, який полягає у попередньому ін'єкційному зміцненні гірських порід поліуретановими смолами ще на стадії проведення виїмкових виробок до моменту впливу очисного вибою. Такий підхід дозволяє заздалегідь локалізувати зони пониженої стійкості (геологічні порушення, розмиви тощо), перетворивши їх у цілісну армопородну структуру з підвищеною опірністю до деформацій та руйнування. У подальшому це забезпечує безаварійну роботу сполучень «лава – штрек», знижує ризик вивалів покрівлі, підвищує безпеку та ритмічність роботи вибоїв, зменшує потребу в перекріпленні виїмкових виробок.

1.8 Список використаних джерел до розділу 1

1. International Energy Agency. (2021). *Coal 2021: Analysis and forecast to 2024*. IEA, 127 p. <https://www.iea.org/reports/coal-2021>

2. International Energy Agency. (2023). *Coal 2023: Analysis and forecast to 2026*. IEA, 130 p. <https://www.iea.org/reports/coal-2023>
3. Lægreid, O. M., Cherp, A., & Jewell, J. (2023). Coal phase-out pledges follow peak coal: evidence from 60 years of growth and decline in coal power capacity worldwide. *Oxford Open Energy*, 2, 009. <https://doi.org/10.1093/ooenergy/oiad009>
4. Klinlampu, C., Chimprang, N., & Sirisrisakulchai, J. (2023). The sufficient level of growth in renewable energy generation for coal demand reduction. *Energy Reports*, 9, 843-849. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.203>
5. Karlilar Pata, S., & Balcilar, M. (2024). Decarbonizing energy: Evaluating fossil fuel displacement by renewables in OECD countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(21), 31304-31313. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33324-8>
6. Liu, C., & Wang, X. (2025). Challenges in energy transition from fossil fuel to clean energy. *Atmospheric and Climate Sciences*, 15(03), 578-590. <https://doi.org/10.4236/acs.2025.153029>
7. Song, F., Mehedi, H., Liang, C., Meng, J., Chen, Z., & Shi, F. (2021). Review of transition paths for coal-fired power plants. *Global Energy Interconnection*, 4(4), 354-370. <https://doi.org/10.1016/j.gloe.2021.09.007>
8. Ordonez, J.A., Vandyck, T., Keramidas, K., Garaffa, R., & Weitzel, M. (2024). Just energy transition partnerships and the future of coal. *Nature Climate Change*, 14(10), 1026-1029. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02086-z>
9. Modis, T. (2022). Forecasting the mix of world energy needs by mid-twenty-first century. *Global Challenges of Climate Change*, 1, 125-137. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16470-5_9
10. Saletnik, A., Saletnik, B., & Puchalski, C. (2025). Coal as the world's dominant energy source and its role in the energy transformation and regulations of European Green Deal. *Journal of Environmental Management*, 392, 126815. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126815>
11. *Мінеральні ресурси України*. (2021). Київ: ДНВП «Державний інформаційний геологічний фонд України», 270 с.
12. *Ініціатива щодо забезпечення прозорості у видобувних галузях України за 2021 рік*. (2023). Київ: ТОВ «Ернст енд Янг Аудиторські послуги», 581 с.

13. Амоша, О.І., Стариченко, Л.Л., & Череватський, Д.Ю. (2013). Стан, основні проблеми і перспективи вугільної промисловості України. Донецьк: Інститут економіки промисловості НАН України, 44 с.

14. Ічанська, Н.В., & Шурпик, О.В. (2023). Аналіз динаміки видобутку вугілля в Україні за допомогою методів математичного моделювання. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2, 49-60. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.049>

15. Вугільна галузь в Україні: кількість шахт і рівень видобутку. (2020). *Слово і діло. Аналітичний портал*.

16. Череватський, Д.Ю. (2020). *Вугільні гетерархії: теорія та практика трансформації галузі*. Київ: Інститут економіки промисловості НАН України, 288 с.

17. Bondarenko, V., Salieiev, I., Kovalevska, I., Chervatiuk, V., Malashkevych, D., Shyshov, M., & Chernyak, V. (2023). A new concept for complex mining of mineral raw material resources from DTEK coal mines based on sustainable development and ESG strategy. *Mining of Mineral Deposits*, 17(1), 1-16. <https://doi.org/10.33271/mining17.01.001>

18. Petlovanyi, M., Malashkevych, D., Sai, K., & Zubko, S. (2020). Research into balance of rocks and underground cavities formation in the coal mine flowsheet when mining thin seams. *Mining of Mineral Deposits*, 14(4), 66-81. <https://doi.org/10.33271/mining14.04.066>

19. Державна служба статистики України. (2022). *Зовнішня торгівля України у 2021 році: статистичний збірник*. Київ: Держстат України.

20. GMK Center. (2021). *Податкові надходження від ГМК: аналіз та оцінка внеску у бюджет*. Київ: GMK Center.

21. Mishra, D.P. (2013). Productivity improvement in underground coal mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23(2), 191-198. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.01.012>

22. Wu, X., Liu, J., & Gao, J. (2022). Review on improvements to the safety level of coal mines in China: Deep mining challenges and countermeasures. *Sustainability*, 14(24), 16400. <https://doi.org/10.3390/su142416400>

23. Bauerle, T.J., Jenkins, J., & Smith, A.L. (2021). The human factors of mineworker fatigue: An overview on fatigue mechanisms in the mining environment.

International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(19), 10296.

<https://doi.org/10.3390/ijerph181910296>

24. Державна служба з питань праці. (2023). <https://dsp.gov.ua/>
25. Статистичний аналіз рівня виробничого травматизму в Україні у територіальному та галузевому аспектах. (2020). Харків, 44 с.
26. Негрій, Т.О. (2016). Про безпеку праці гірника при виконанні основних виробничих операцій. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 1(38), 84-94.
27. Подкопаєв, С.В., & Сахно, І.Г. (2018). Шляхи зниження виробничого травматизму на вугільних шахтах України в світлі світових тенденцій. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 1(42), 61-68.
28. *Safe Work Australia: Mining Fact Sheet*. (2012). Available at: <https://www.safeworkaustralia.gov.au/system/files/documents/1702/mining-fact-sheet-2011-12.pdf>
29. Riba, S.J., Lesaoana, M., Sigauke, C., & Makwela, M.R. (2011). A logistic regression analysis of the occurrence of mine accidents in the Burgersfort area in South Africa. *Journal of Geology and Mining Research*, 3(1), 188-192.
30. Bakhtiyari, M., Delpishe, A., Riahi, S.M., Latifi, A., Zayeri, F., & Soori, M.S.H. (2012). Epidemiology of occupational accidents among Iranian insured workers. *Safety Science*, 50(7), 1480-1484. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.01.015>
31. Coleman, P.J., Brune, J., & Martini, L. (2010) *Characteristics of the top five most frequent injuries in United States mining operations, 2003-2007*. Spokane: National Institute for Occupational Safety and Health, Spokane Research Laboratory.
32. Аварії на вугільних шахтах Китаю за 2017 рік. (2018). Режим доступу: <http://news.sina.com.cn/c/nd/2018-01-29/doc-ifyqyqni4974564.shtml>
33. Song, G., Wang, Z., & Ding, K. (2020). Evaluation of the face advance rate on ground control in the open face area associated with mining operations in Western China. *Journal of Geophysics and Engineering*, 17(2), 390-402. <https://doi.org/10.1093/jge/gxz124>
34. Sakhno, I., Sakhno, S., & Vovna, O. (2020). Assessing a risk of roof fall in the development mine workings in the process of longwall coal mining in terms

of Ukrainian mines. *Mining of Mineral Deposits*, 14(1), 72-80.
<https://doi.org/10.33271/mining14.01.072>

35. Баранов, В.А., & Янжула, А.С. (2016). Гірничо-геологічні умови поля ШУ «Покровское». *Геотехнічна механіка*, 129, 75-81.

36. Яковенко, В.Г., Бондаренко, В.І., Петльований, М.В., Ковалевська, І.А., & Драгун, Д.В. (2024). Аналіз особливостей вивалоутворення приконтурних порід виїмкових виробок та шляхи досягнення їх стійкості. *Збірник наукових праць НГУ*, 76, 127-141. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/76.127>

37. Bondarenko, V.I., Kovalevska, I.A., Petlovanyi, M.V., & Yakovenko, V. (2024). Principles of chaos theory in solving applied geomechanics problems. In *Materials of the International Conference "CHAOS"*. Crete: Cultural Centre of Chania.

38. Булат, А.Ф., Бунько, Т.В., Шейко, А.В., & Кокоулін, І.Є. (2018). Зниження ризику обвалень під час проведення гірничих виробок. *Геотехнічна механіка*, 141, 134-142.

39. Назаренко, В.О. (2024). Маркшейдерський моніторинг стану гірничих виробок в умовах впливу гірського тиску (на прикладі шахти). *Тернопільський політехнічний журнал. Серія «Гірництво»*, 2, 45-53.

40. Damghani, M., Rahmannedjad, R., & Najafi, M. (2019). Evaluation of the effect of coal seam dip on stress distribution and displacement around the mechanized longwall panel. *Geomechanics*, 55, 733-742. <https://doi.org/10.1134/S1062739119056100>

41. Бондаренко, В.І., Ковалевська, І.А., Симанович, Г.А., & Черватюк, В.Г. (2012). *Геомеханіка навантаження кріплення очисних і підготовчих виробок у шаруватому масиві слабких порід*. Дніпропетровськ: ТОВ «Лізунов Прес», 233 с.

42. Бондаренко, В.І., Ковалевська, І.А., Вівчаренко, О.В., & Малихін, О.В. (2014). Підвищення стійкості виїмкових виробок у шаруватому масиві слабких порід.. *Вугілля України*, 2, 8-11.

43. Булат, А.Ф., & Виноградов, В.В. (2002). *Опорно-анкерне кріплення гірничих виробок вугільних шахт*. Дніпропетровськ: Вільпо, 371 с.

44. Халимендик, Ю.М. (2014). Кріплення гірничих виробок у слабких шаруватих породах вугільних шахт. *Форум гірників*, 2, 161-170.

45. Халимендик, Ю.М. (2011). Забезпечення повторного використання дільничних виробок. *Вугілля України*, 4, 18-21.
46. Круковський, О.П., & Круковська, В.В. (2012). Дослідження напруженого стану масиву навколо вироблення з анкерним кріпленням при проходженні буропідричним способом. *Науковий вісник НГУ*, 1, 34-39.
47. Круковський, О.П. (2005). *Обґрунтування параметрів та умов застосування анкерного кріплення на вугільних шахтах*: дис. канд. техн. наук. Дніпропетровськ: Інститут геотехнічної механіки, 175 с.
48. Кириченко, В.Я. (2013). Ресурсозберігаюче кріплення гірничих виробок для великих глибин розробки. *Розробка родовищ*, 7, 49-57.
49. Шашенко, О.М., Хозяйкіна, Н.В., & Дубовик, О.І. (2020). Чисельне моделювання стійкості підготовчої виробки, що використовується повторно. *Вісник КрНУ ім. Михайла Драгоманова*, 4(2020-4), 62-69.
50. Шашенко, О.М., Сдвижкова, О.О., & Гапєєв, С.М. (2008). *Деформованість та міцність масивів гірських порід*. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 224 с.
51. Sakhno, I., Sakhno, S., & Isaienkov, O. (2022). *Method for controlling the floor heave in mine roadways of underground coal mines*. *Mining of Mineral Deposits*, 16(4), 1-10. <https://doi.org/10.33271/mining16.04.001>
52. Isaienkov, O.A., Sakhno, I.G., & Sakhno, S.V. (2019). Development of a modified self-extending mixture for increasing stability of rocks. *Journal of Donetsk Mining Institute*, 2(47), 40-48. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2020-2-40-48>
53. Негрій, С.Г., Живогляд, С.К., & Негрій, Т.О. (2019). Спостереження за станом виробок при суцільній системі розробки. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 2(45), 16-27. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2019-2-16-27>
54. Stadnichuk, M.M., Krukovskyi, O.P., Kurnosov, S.A., Makeiev, S.Yu., & Semenyuk, M.I. (2022). Calculation of parameters of the protection means for roadway districts in which cement-mineral mixtures are used. *Geo-Technical Mechanics*, 163, 108-118. <https://doi.org/10.15407/geotm2022.163.108>

55. Bondarenko, V.I., Kovalevs'ka, I.A., Simanovich, H.A., & Snihur, V.G. (2018). Experimental studies of the extraction mine workings in very weak rocks. *Geo-Technical Mechanics*, 144, 119-127.
56. Халимендик, Ю.М., & Баришніков, А.С. (2015). Вплив відсіку кріплення на деформування підготовчих виробок у зоні впливу очисних робіт. *Розробка родовищ*, 9, 85-91.
57. Бондаренко, В.І., Ковалевська, І.А., Симанович, Г.А., Барабаш, М.В., Снігур, В.Г., & Гусєв, О.С. (2017). *Комбіновані анкерні системи для повторного використання гірничих виробок*. Дніпро: ТОВ «ЛізуновПрес», 188 с.
58. Халимендик, Ю.М., & Баришніков, А.С. (2014). Використання канатних анкерів при кріпленні виробок у шаруватих породах. *Розробка родовищ*, 8, 105-114.
59. Kang, H., Wu, L., Gao, F., Lv, H., & Li, J. (2019). Field study on the load transfer mechanics associated with longwall coal retreat mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 124, 104141. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104141>
60. Peng, S. (2022). Roof bolting and underground roof falls. *Geohazard Mechanics*. In Press. <https://doi.org/10.1016/j.ghm.2022.11.005>
61. СОУ-П 10.1-00185790-020:2012. (2012). *Управління покрівлею і кріплення в очисних вибоях на вугільних пластах з кутом падіння до 35°*. Київ: Верховна Рада України.
62. Халимендик, Ю.М., Бруй, А.С., & Баришніков, А.С. (2013). Підтримання штреку канатними анкерами за умов слабких бічних порід. *Геотехнічна механіка*, 110, 50-64.
63. Liu, H., Jiang, Z., Chen, W., Chen, F., Ma, F., Li, D., Liu, Z., & Gao, H. (2022). A simulation experimental study on the advance support mechanism of a roadway used with the longwall coal mining method. *Energies*, 15(4), 1366. <https://doi.org/10.3390/en15041366>
64. Shen, B. (2013). Coal mine roadway stability in soft rock: A case study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(6), 2225-2238. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0528-y>

65. Molinda, G.M. (2004). Evaluation of polyurethane injection for beltway roof stabilization in a West Virginia coal mine. *Proceedings of the 23rd International Conference on Ground Control in Mining*, 190-196.
66. Kao, S., Zhao, G., Meng, X., Li, Y., Liu, Z., Zhang, R., Zhou, J., & Huang, S. (2021). Dynamic mechanical characteristics of fractured rock reinforced by different grouts. *Advances in Civil Engineering*, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2021/8897537>
67. Zhou, Y., Zhang, J., Zhang, R., Liu, E., Wang, L., & Zhang, G. (2023). Strength recovery effect of bisphenol a epoxy resin e44 on rock masses with various crack widths. *Advances in Civil Engineering*, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2023/8005622>
68. Feuerborn, H.J. (1974). *Grouting technologies in German coal mining: experience with polyurethane and epoxy resins. Glückauf – Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 110(3), 89-97.
69. Deere, D.U., & Miller, R.P. (2005). Evaluation of polyurethane injection resins for ground control in underground mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(7-8), 1087-1098. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.05.007>
70. Kaufman, J.S., & Su, D.W. (1998). Field application of polyurethane injection for roof stabilization in underground coal mines of Virginia. *Mining Engineering*, 50(9), 41-46.
71. Qian, D., Zhang, N., Pan, D., Xie, Z., Shimada, H., Wang, Y., Zhang, C., & Zhang, N. (2017). *Stability of Deep Underground Openings through Large Fault Zones in Argillaceous Rock. Sustainability*, 9(11), 2153. <https://doi.org/10.3390/su9112153>
72. Петров, С.А. (2014). Застосування смол для зміцнення порід покрівлі в очисних вибоях. *Розробка родовищ*, 8, 149-155.
73. Канівець, О.П. (1968). Застосування синтетичних смол для зміцнення порід навколо гірничих виробок. *Питання вдосконалення систем розробки зі зниженням рівня гірничих робіт*. Кривий Ріг: НІГРІ.
74. Jankowski, A. (1972). Polyurethane for consolidation of rock. *Glückauf*, 108(14), 582-584.

75. Schaller, S., & Russell, P. (1986). Trial application of polyurethane resin in Australian coal mines. *Symposium on Ground Movement and Control Related to Coal Mining*, 134-142.
76. Чельцов, В.В., Кочев, Г.М., & Клішин, Н.К. (1981). Зміцнення порід у підготовчих виробках. *Вугілля*, 5, 24-27.
77. Клішин, Н.К., Склепович, К.З., & Герасько, О.А. (2004). Зміцнення покрівлі у лавах. *Вугілля України*, 2, 15-19.
78. Касьян, М.М. (1995). Визначення критеріїв подібності при моделюванні поширення скріплювальних розчинів у гірському масиві. *Фізика і техніка високих тисків*, 5(1), 71-73.
79. Buddery, P. (2003). *Cost effective use of pur and optimising large-scale injected strata reinforcement*. Report No. 00-180-ACR, ACARP Project C10019. Canberra: Strata Engineering.
80. Канін, В.А., Пашенко, А.В., & Тиркель, М.Г. (2004). Фізико-хімічне закріплення гірських порід при підтриманні та ремонті гірничих виробок. *Геотехнічна механіка*, 51, 154-162.
81. Molinda, G. (2008). Reinforcing Coal mine roof with polyurethane injection: 4 case studies. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(5), 553-566. <https://doi.org/10.1007/s10706-008-9189-0>
82. Weng, M., Du, B., Zhang, Y., Zhu, L., Wan, Z., Fan, B., & Guo, H. (2025). Study on the mechanism of advanced grouting reinforcement in fault fractured zones of deep large-mining-height fully mechanized mining faces. *Frontiers in Earth Science*, 13, 1635731. <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1635731>
83. Qian, D., Zhang, N., Pan, D., Xie, Z., Shimada, H., Wang, Y., Zhang, C., & Zhang, N. (2017). Stability of deep underground openings through large fault zones in argillaceous rock. *Sustainability*, 9(11), 2153. <https://doi.org/10.3390/su9112153>
84. Kaufman, J.S., & Su, D.W. (1998). Field application of polyurethane injection for roof stabilization in underground coal mines of Virginia. *Mining Engineering*, 50(9), 41-46.

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ІН'ЄКЦІЙНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ ТРІЩИНУВАТИХ ПОРІД. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Обґрунтування доцільності ін'єкційного закріплення приконтурного тріщинуватого масиву виїмкових виробок

Досвід ведення гірничих робіт на передових закордонних та українських вугільних шахтах показує, що на сьогодні існує два основних способи зміцнення масиву гірських порід – хімічне анкерування та ін'єкційне закріплення різними полімерними речовинами. Сутність хімічного анкерування полягає у використанні анкерних стрижнів і хімічних складів, які закріплюються у шпурах в породному масиві та забезпечують механічну фіксацію породи. Анкерні стрижні закріплюються у породі, а потім заповнюються хімічним складом, який твердіє і забезпечує міцне сполучення між стрижнями та породним масивом.

Ін'єкційний спосіб зміцнення полягає у нагнітанні в тріщини масиву гірських порід спеціальних ін'єкційних складів, які твердіють і створюють пружний зв'язок між стінками тріщин, що зменшує напруження у породному масиві та підвищує його міцність і стійкість. Ін'єкційне зміцнення тріщинуватих гірських порід є ефективним способом, який може застосовуватися у різноманітних умовах і для різних типів гірських порід та широко застосовується для гірничих виробок.

Як показує досвід кріплення сполучень лав із виїмковими виробками в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське», то, незважаючи на застосування ефективних комбінованих систем кріплення, хімічне анкерування та випереджальне штангове кріплення не дозволяє у повному обсязі попередити й уникнути вивалів порід при виконанні кінцевих операцій. Так, у паспортах кріплення та управління покрівлею у виїмкових дільницях передбачаються заходи щодо закріплення пустот вивалів над вікном лави на сполученні лави зі штреком. Відмічаються негативні випадки вивалів порід на сполученнях лав з виїмковими штреками, що призводить до порушення ритмічності роботи очисного вибою та

травмування робітників. Нажаль, іноді травмування призводить до смертельних випадків. Так, 20.04.2021 року під час кріплення нижнього сполучення однієї з лав, відбулось обвалення породи, в результаті чого смертельно травмувався гірник. Тобто, можна зробити висновок, що використання анкерного та штангового кріплення недостатньо вплинуло на зміцнення порід покрівлі зі сторони лави на її сполученні з виїмковим штреком.

Безпека ведення гірничих робіт на сполученнях лав з виїмковими штреками є важливою і потребує застосування додаткових заходів, таких як ін'єкційне зміцнення порід покрівлі. Ін'єкційний метод зміцнення тріщинуватих гірських порід у гірничих виробках – один з найбільш ефективних способів підвищення міцності та стійкості породного масиву, особливо при відпрацюванні запасів вугілля у складних гірничо-геологічних умовах, якими і є умови шахтного поля, запаси якого розробляє ПрАТ «ШУ «Покровське».

Основною метою ін'єкційного способу зміцнення масиву в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське» є збільшення міцності та стійкості породного масиву ще на стадії проведення виїмкових штреків для запобігання утворенню нових тріщин, зниження ризику виробничих аварій та забезпечення безпеки роботи як у підготовчих виробках, так і надалі при посуванні очисного фронту.

Однак, для вибору способу зміцнення порід покрівлі при хімічному та ін'єкційному закріпленні важливим критерієм, відповідно до якого вибираються спосіб і параметри технологічної схеми зміцнення порід покрівлі, є їх середня кускуватість при вивалах [1]. З цією метою для дослідження гранулометричних характеристик породних фракцій використовуються породи вивалів покрівлі, що відбулись при проведенні виїмкових виробок:

- алевроліт – вивал з покрівлі при проведенні 1-го південного конвеєрного штреку центральної панелі блока № 11 район ПК 5 – 8;
- пісковик – вивал з покрівлі при проведенні 9-го північного конвеєрного штреку блока № 10 – район ПК 7 + 5 – 10 + 5.

Фотофіксація вивалутворень приконтурних порід при проведенні виїмкового штреку в зоні впливу порушення ілюструється на рисунку 2.1.

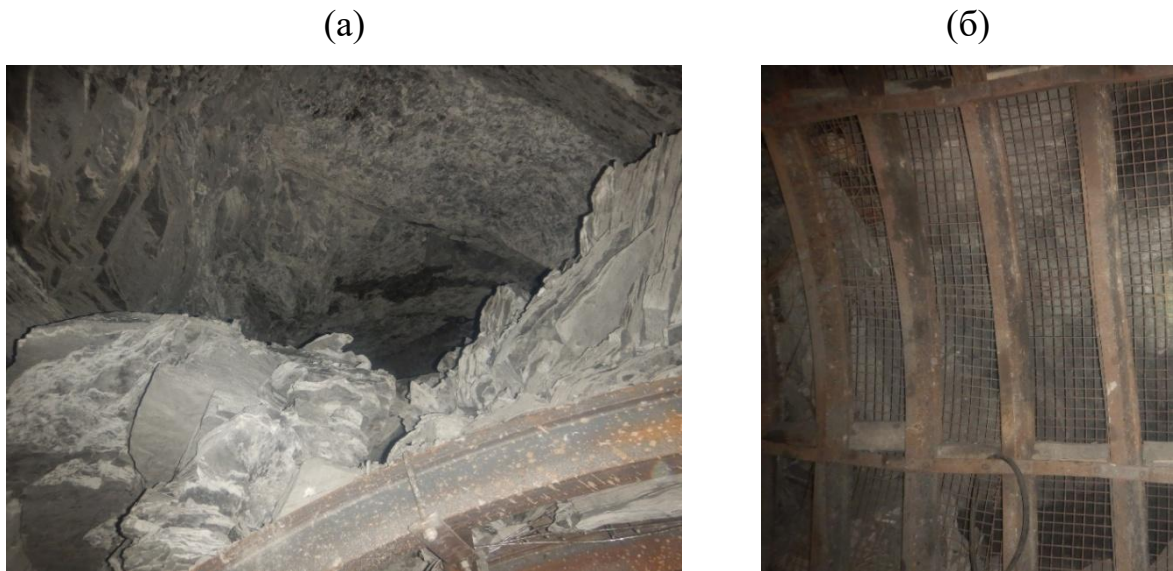


Рисунок 2.1 – Фотофіксація вивалів тріщинуватих алевролітів при проведенні 1-го південного конвеєрного штреку центральної панелі блока № 11: (а) відшарування покрівлі; (б) відшарування борту

Для визначення гранулометричного складу порід вивалів за результатами зйомки, викладених у лабораторних умовах фракцій порід, використано спеціалізоване програмне забезпечення обробки різних зображень WipFrag 3.3. Для масштабування фракцій породи та прив'язки до натурних розмірів використовувалася рулетка з фіксацією 70 см, яка прикладалася до поверхні фракцій порід. У програмі підбиралася величина розбиття сітки за фракціями для максимально правильного оконтурювання фракцій порід, після чого вручну виконувалося додаткове їх оконтурювання. Далі програма виконує побудову кривої гранулометричної характеристики зруйнованих порід та отримуються дані відсоткового вмісту певної фракції порід (рис. 2.2 – 2.5).

Результатами досліджень встановлено (рис. 2.3, 2.5), що фракційний склад вивалу покрівлі 1-го конвеєрного штреку південної лави блоку № 11, що представлений алевролітом, знаходиться в межах 0...200 мм, а фракційний склад вивалу покрівлі 9-го штреку північної лави блоку № 10, представлений пісковиком, – в межах 0...300 мм. Різниця між фракційним складом вивалу пояснюється структурою та морфологією порід, міцнісними характеристиками і наявною природною тріщинуватістю [2, 3].

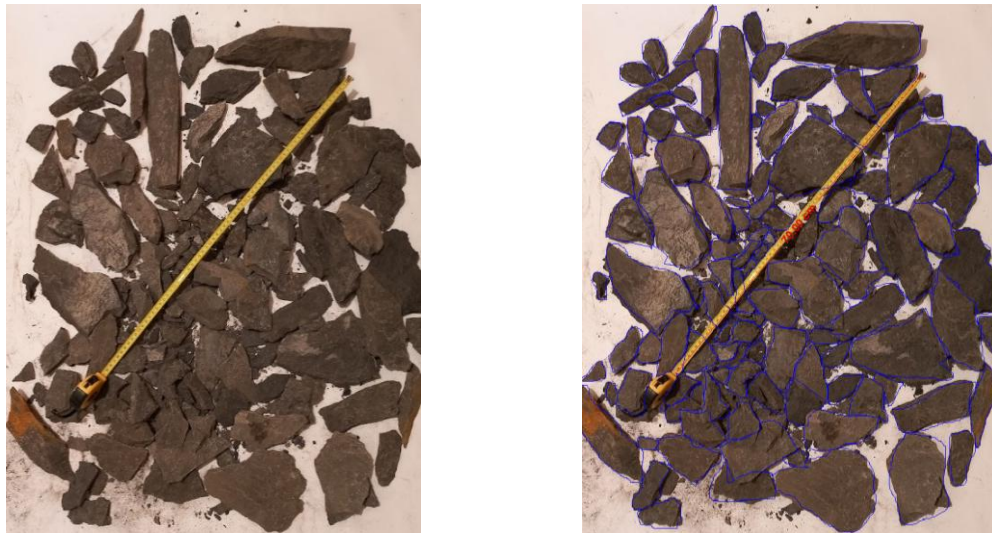


Рисунок 2.2 – Вимірювання фракційного складу алевроліту з вивалу 1-го південного конвеєрного штреку центральної панелі блока № 11

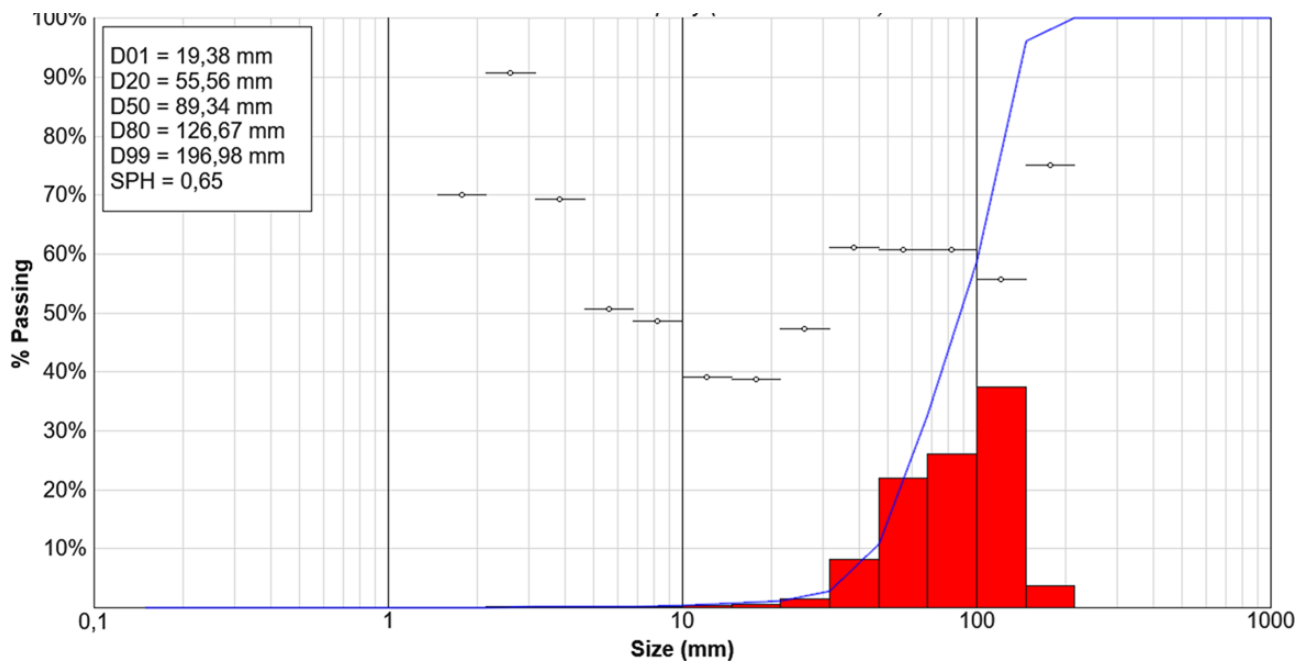


Рисунок 2.3 – Гранулометрична характеристика алевроліту, відібраного з вивалу 1-го південного конвеєрного штреку центральної панелі блока № 11

Для ефективності застосування способів зміцнення порід пропонується класифікація за кускуватістю порід при їх вивалах: до першої (I) групи відносяться породи, у яких при обваленні переважають шматки з розмірами менше 0,1 м; до другої (II) – 0,1 – 0,3 м; до третьої (III) – 0,3 – 0,5 м; до четвертої (IV) – більше 0,5 м.

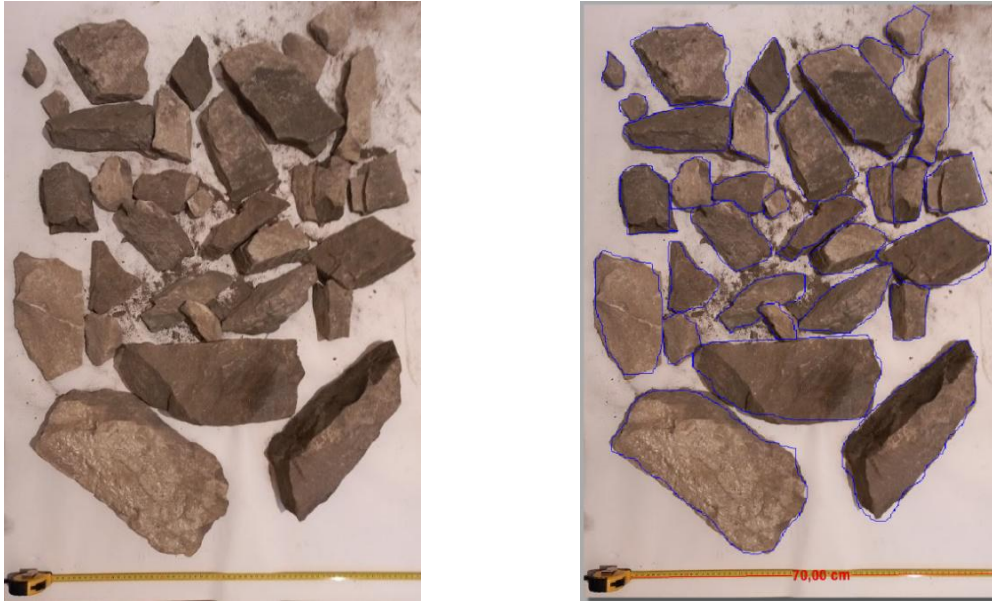


Рисунок 2.4 – Вимірювання фракційного складу алевроліту з вивалу
9-го північного конвеєрного штреку блока № 10

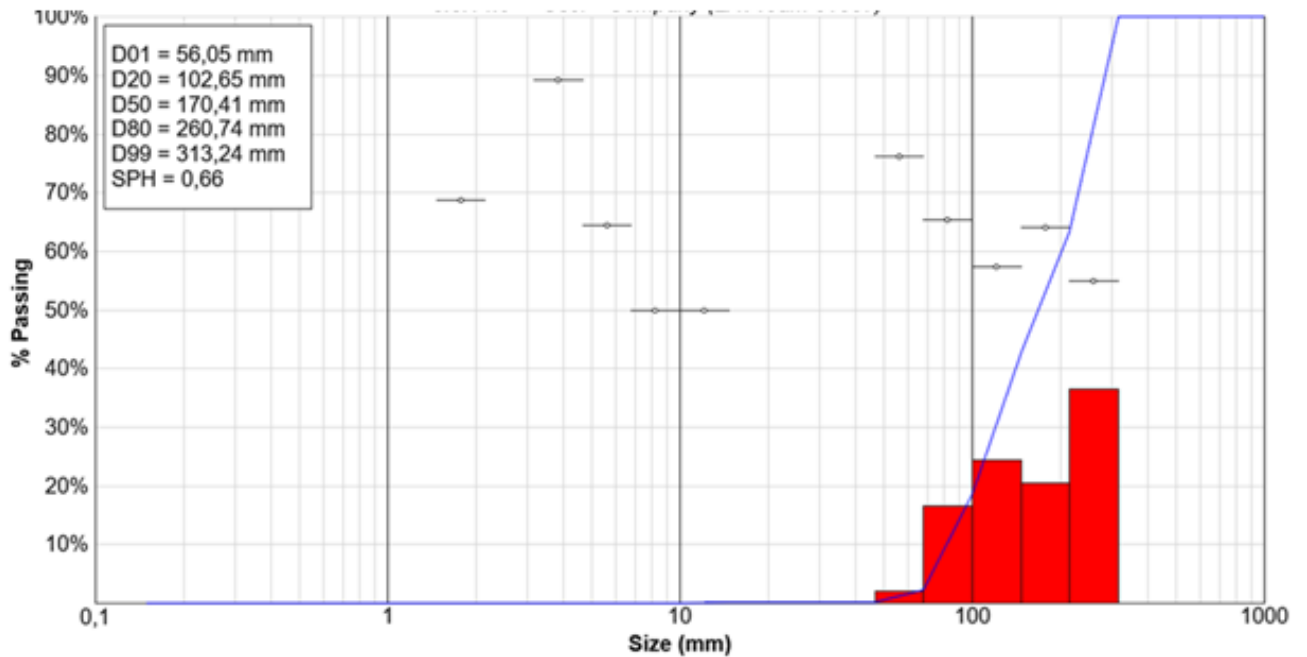


Рисунок 2.5 – Гранулометрична характеристика пісковика, відібраного
з вивалу 9-го північного конвеєрного штреку блока № 10

Умови, в яких застосування кожного зі способів зміцнення буде найбільш доцільним, наведені у таблиці 2.1 [1]. Аналіз зіставлення результатів визначення гранулометричних характеристик порід вивалів та умови застосування способів

зміцнення порід покрівлі вказують на те, що, згідно класифікації за кускуватістю, вони відносяться до I та II категорії, а ефективним способом зміцнення порід покрівлі є нагнітання поліуретанових смол ін'єкційним способом.

Таблиця 2.1 – Умови застосування способів зміцнення порід покрівлі

Властивості порід, що зміцнюються	Доцільні способи зміцнення	
	Нагнітання поліуретанових сумішей	Хімічне анкерування
Потужність порід обвалення, $h_{обв}$, м	$> 0,8$	$> 0,4$
Група порід за кускуватістю	I і II	II, III і IV

На теперішній час у практиці ведення гірничих робіт залежно від властивостей зміцнюваного та заповнюваного масиву для отримання необхідного ефекту застосовують наступні типи складів (смол): сечовинні, карбомідні, магнезіальні, фенолоформальдегідні, органомінеральні, цементовмісні, фенольні, поліуретанові [4, 5].

Основною перевагою поліуретанів є висока міцність, низькомолекулярна дисперсність, що дозволяє композиції проникати у тріщини шириною менше 0,01 мм, висока міцність адгезійного зв'язку системи «полімер – порода», високий коефіцієнт спінювання, низька токсичність, швидкий час твердіння. Маючи високу проникаючу здатність, твердіючий склад при впорскуванні під високим тиском заповнює 90 – 95% всіх тріщин у масиві. Затверділий поліуретан має залишкову пластичність, що дозволяє затверділому масиву деформуватися без руйнування і витримувати високі навантаження. При спінюванні поліуретан створює додатковий розпірний ефект, який збільшує зв'язок між блоками масиву та покращує його міцнісні властивості [6].

Аналізуючи складні гірничо-геологічні умови шахтного поля, що розробляє ПрАТ «ШУ «Покровське», а також враховуючи необхідність швидкого створення міцного масиву в умовах високого ступеню тріщинуватості порід, переваги і властивості скріплюючих матеріалів, доцільним є застосування

ін'єкційного нагнітання поліуретанових смол у масив гірських порід попереду очисних вибоїв для збереження в надійному експлуатаційному стані сполучень лав з виїмковими штреками.

Безпосередньо параметри ін'єкційного способу залежать від властивостей порід (міцність, тріщинуватість) та необхідного технологічного часу набуття масивом потрібної міцності після нагнітання. Об'єм складу, що нагнітається у масив, буде залежати, перш за все, від ступеня його тріщинуватості.

2.2 Методика лабораторних та аналітичних досліджень фізико-механічних властивостей консолідованого поліуретановою смолою тріщинуватого масиву

Для дослідження склеювання та консолідації породних фракцій використовуються породи вивалів покрівлі, передані ПрАТ «ШУ «Покровське» для проведення досліджень в НТУ «Дніпровська політехніка», а саме:

- алевроліт – вивал з покрівлі при проведенні 1-го південного конвеєрного штреку центральної панелі блока № 11 район ПК 5 – 8;
- пісковик – вивал з покрівлі при проведенні 9-го північного конвеєрного штреку блока № 10 – район ПК 7 + 5 – 10 + 5.

Для виконання досліджень фізико-механічних властивостей консолідованих фракцій порід обрано поліуретанову смолу Marithan® компанії Weber Mining (Польща). Marithan® – це поліуретанові двокомпонентні системи для зміцнення гірського масиву та гідроізоляції. При нагнітанні у породи суміш із низькою в'язкістю заповнює собою тріщини та щілини з мінімальним діаметром до 0,1 мм. Вона розширюється і за рахунок високої міцності зчеплення та міцності на розтяг здатна зв'язувати навіть насичені водою шари з утворенням твердої маси з високими механічними властивостями [7].

Скріплюючі склади на основі поліуретанів характеризуються високою адгезією до більшості матеріалів, стрімкою швидкістю схоплювання, значною механічною міцністю, твердіють при кімнатній температурі, проте вимагають дотримання правил безпеки та характеризуються дещо високою вартістю.

Доступні кілька варіантів пропорцій інгредієнтів смоли Marithan®, що відрізняються за швидкістю реакції, механічними властивостями, вогнетривкістю, температурою реакції тощо. Згідно необхідних вимог клієнта, фахівці компанії Weber виконують підбір оптимальних технічних параметрів смоли Marithan®. Однак слід зазначити, що вже існують розроблені усереднені оптимальні характеристики смоли Marithan®, що можуть бути успішно застосовані для різних гірничо-геологічних умов. У таблицях 2.2 – 2.4 наведені основні технічні дані інгредієнтів полімерної смоли Marithan®, їх властивостей, а також основних механічних властивостей чистого полімеризованого продукту. Зазвичай, у зоні впливу геологічного порушення породи характеризуються зниженою стійкістю, підвищеною тріщинуватістю та, місцями, перебувають у роздрібненому, практично знеміцненому стані. Спостерігається закономірність, за якої від периферії зони впливу до площини зміщувача тріщинна пористість масиву зростає, досягаючи максимальних значень безпосередньо у межах зміщувача.

Таблиця 2.2 – Основні властивості компонентів смоли Marithan®

Параметр	Інгредієнти	
	Смола	Каталізатор
Щільність при 25°C, г/см ³	1,1	1,23
В'язкість при 25°C, мПа·с	< 300	< 250
Співвідношення	1:1	
Умови зберігання	5 – 30°C	5 – 30°C

Таблиця 2.3 – Основні параметри полімеризованого продукту

Параметр	Значення
Міцність на стиск (середня), МПа	> 80
Міцність на вигин (середня), МПа	> 65
Час початку реакції, с	50 – 80
Час закінчення реакції, с	60 – 130
Час затвердіння	до 30 хвилин
Середній коефіцієнт піноутворення	2

Таблиця 2.4 – Основні властивості полімеризованого продукту

Параметр	Значення
Щільність	1,2
Міцність на стиск (середня), МПа	80
Міцність на вигин (середня), МПа	65
Міцність на розтяг, МПа	8 – 12
Модуль пружності, МПа	2500 – 3000
Зчеплення, МПа	8 – 12
Коефіцієнт Пуассона	0,3

Зазначене свідчить про те, що під час ін'єкційного закріплення порід відбуватиметься диференціація фізико-механічних властивостей консолидованого смолою масиву, яку необхідно враховувати у подальшому чисельному моделюванні. Визначальним фактором такої диференціації є величина тріщинної пористості, що безпосередньо впливає на співвідношення у масиві жорсткої (мінеральної) та пластичної (смоляної) матриць.

Оскільки безпосереднє кількісне дослідження тріщинної пустотності в природних умовах пов'язане зі значними труднощами через неоднорідність масиву, складність точного вимірювання, вплив багатьох неконтрольованих чинників (вологість, тиск, стан заповнювача тріщин тощо), для його імітації застосовується лабораторний підхід. Сутність методу полягає у використанні фракцій гірських порід із заданою міжфракційною пористістю, що дозволяє відтворити різні її рівні (варіанти), характерні для масиву в різних зонах впливу геологічного порушення. Такий підхід слід вважати методично виправданим, адже він дозволяє науково дослідити важливий фактор впливу на фізико-механічні властивості скріпленого масиву саме співвідношення жорсткої (мінеральної) та пластичної (смоляної) матриць.

Загальна методика проведення лабораторних досліджень з консолидації фракцій порід полімерною смолою складається з 4-х етапів: підготовка зразків алевроліту та пісковика; приготування консолидованого штучного масиву з фракцій порід та полімерної смоли; отримання зразків консолидованих смолою

порід; випробування фізико-механічних властивостей зразків консолюдованих смолою фракцій порід.

Далі детально розкриваються використані методичні проведення лабораторних досліджень скріплення роздрібнених фракцій.

1 етап. Для виготовлення кубічних зразків масиву, скріпленого полімерною смолою Marithan®, використовується металічна тригніздна форма ЗФК-70 з розміром комірки $70 \times 70 \times 70$ мм, що застосовується для виготовлення зразків бетону. У форму розміщуються фракції порід, які попередньо подрібнюються до розміру $0 \dots 50$ мм, що пов'язано із розміром гнізда форми.

Для визначення вмісту фракцій різних класів у прийнятому діапазоні $0 \dots 50$ мм було застосовано пропорційне масштабування фактичного гранулометричного складу порід (алевроліту та пісковика) з вивалу. За цим підходом така механічна властивість порушеного масиву як міжфракційна пустотність залежить не від абсолютного розміру фракцій, а від їхнього відносного розподілу. Масштабування полягає у відтворенні в лабораторних умовах гранулометричної кривої, яка геометрично подібна до кривої натурального гранулометричного розподілу порід вивалу. Результати визначення вмісту фракцій за літологічними різницями наведено у таблиці 2.5.

Для дослідження ефективності консолідації фракцій порід полімерною смолою, що розглядається, передбачається виготовлення кубічних зразків штучних масивів із наступним визначенням їх фізико-механічних властивостей: алевроліт + поліуретанова смола; пісковик + поліуретанова смола. Використання саме фракцій пісковика та алевроліту у дослідженнях пояснюється тим, що це найбільш типові та поширені літологічні різниці в межах шахтного поля ПрАТ «ШУ «Покровське».

2 етап. Консолюдований поліуретановою смолою масив з фракцій порід досліджується у двох варіантах: спочатку у максимально розпушеному вільному стані, що характеризує максимальну міжфракційну пустотність, та в ущільненому стані, який непрямо імітує зміну тріщинної пустотності у реальних умовах. Для приготування масиву з фракціями порід як у розпушеному, так ущільненому стані застосовується металева тригніздна кубічна форма ЗФК-70 ($7 \times 7 \times 7$ см), де фракції порід розміщуються на всю її висоту.

Таблиця 2.5 – Розподіл гранулометричного складу фракцій порід алевроліту та пісковика в лабораторних умовах

Клас фракції, мм	Вихід фракції, %	
	Алевроліт	Пісковик
0...10	13,8	4,8
10...20	28,5	27,3
20...30	31,8	25,3
30...40	16,0	20,3
40...50	9,9	22,3
Разом	100	100

У подальшому передбачається, що додана у форму з породою полімерна поліуретанова смола повинна заповнити міжфракційні пустоти алевроліту та пісковика для їх склеювання в єдиний консолідований масив. Перед проведенням досліджень всі варіанти фракцій порід досліджувались у сухому стані, який досягався за допомогою сушильної шафи СНОЛ 58/350.

Міжфракційна пустотність засипаних у комірку металевої форми неущільнених фракцій порід може бути визначена простим способом, згідно ДСТУ [8], як різниця сухої чистої маси фракцій порід по відношенню до сухої маси цільного зразка породи за умови однакового об'єму (форма – 343 см³):

$$\eta = \frac{m_{роз}^{віль}}{m_{масив}} \cdot 100, \% , \quad (2.1)$$

де $m_{роз}^{віль}$ – маса розпушених фракцій порід, вільно засипаних у металеву форму, г;

$m_{масив}$ – маса цільного зразка породи об'ємом, рівному формі, г.

Таким чином визначається максимально можлива величина міжфракційної пустотності фракцій порід у вільному стані.

Для варіювання величини міжфракційної пустотності η здійснюється їх примусове ущільнення за допомогою вібраційного впливу. Для дослідження ущільнення фракцій порід під вібраційним впливом (частота коливань 1500 Гц)

використовується аналізатор ситовий вібраційний АСВ-300U, що є у наявності в центрі колективного користування науковим обладнанням НТУ «Дніпровська політехніка». Висушені до постійної маси фракції порід засипались у тригніздову металеву форму під рівень без трамбування. Металеву форму встановлювали на верхню платформу вібраційного аналізатору АСВ-300U з притискним механізмом і збільшували величину міжфракційної пустотності, підвищуючи час процесу вібрації (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Дослідження варіювання пустотності фракцій порід для імітації їх стану в зонах роздрібнення та знеміцнення

Після вимкнення вібраційного аналізатору фіксувався рівень усадки від верхньої кромки форми до поверхні ущільнених фракцій. Для того, щоб виготовити цілісний кубічний зразок консолідованого масиву було здійснено досипання фракцій порід поверх ущільненого масиву на величину усадки, тобто до верхньої кромки форми. Оскільки ущільнений масив сформований на всю висоту зразка, то його вага порівнювалась з цілісним масивом з урахуванням

однакового об'єму кубічного зразка 343 см^3 , при цьому міжфракційна пустотність розраховувалась за формулою:

$$\eta = \frac{m_{роз}^{ущіл}}{m_{масив}} \cdot 100, \% , \quad (2.2)$$

де $m_{роз}^{ущіл}$ – маса ущільнених фракцій порід у металевій формі, г;

$m_{масив}$ – маса цільного зразка породи об'ємом з урахуванням величини усадки маси ущільнених фракцій порід, г.

Для приготування поліуретанової смоли потрібно налити однакову кількість компонента А (смола) та компонента В (каталізатор) у дві окремі ємності (рис. 2.7а). Потім компоненти А і В одночасно виливаються в єдину ємність і перемішуються протягом 15 – 20 секунд (рис. 2.7б). Далі готову суміш виливають на фракції розпушених порід у металевій формі до рівня її висоти. Загальні витрати порід і компонентів полімерної смоли для проведення лабораторного експерименту наведено у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Компоненті склади фракцій порід різного літотипу, скріплені поліуретановою смолою

Пустотність	Тип породи	Розхід компонентів, г		Фракції порід, г
		Смола (компонент А)	Каталізатор (компонент Б)	
22	Алевроліт	20,8	23,2	709,0
28		26,4	29,5	654,4
34		32,1	35,9	599,9
39		36,8	41,1	554,0
43		40,6	45,4	517,1
26	Пісковик	24,5	27,4	710,7
31		29,2	32,7	664,8
36		34,0	38,0	618,9
41		38,7	43,2	572,9
45		42,4	47,5	535,6

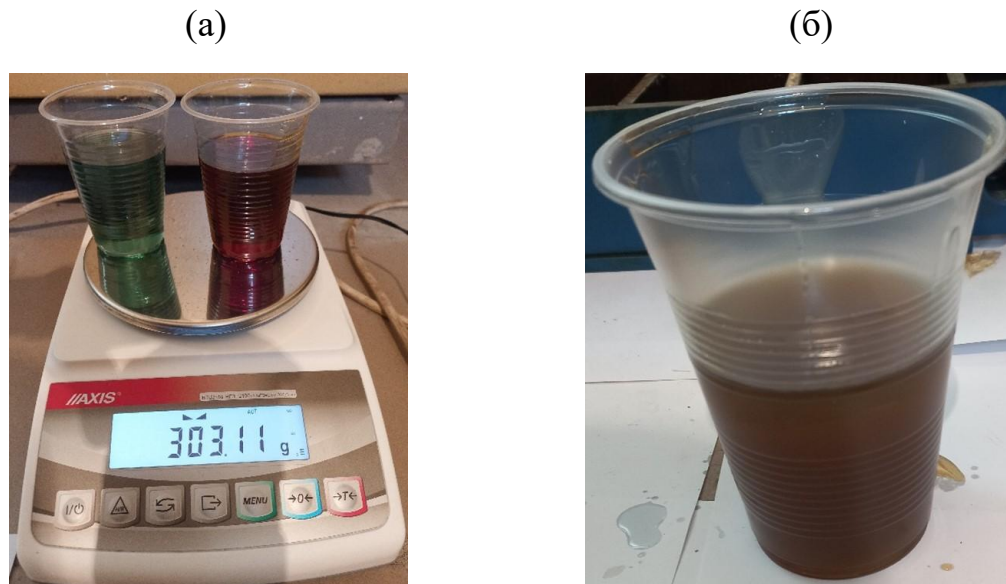


Рисунок 2.7 – Приготування поліуретанової смоли: (а) зважування компонентів;
(б) вигляд суміші після механічного перемішування компонентів

Визначення міжфракційної пустотності порід при різних варіантах її варіювання дозволяє визначити необхідний об'єм поліуретанової смоли, необхідний для скріплення й формування консолідованого масиву:

$$V_{cm} = \frac{V_{\phi} \cdot \eta}{k_g}, \text{ см}^3, \quad (2.3)$$

де V_{ϕ} – об'єм металевої кубічної форми, см^3 ;

η – визначена міжфракційна пустотність, %;

k_{cn} – коефіцієнт спінювання поліуретанової смоли, $k_{cn} = 2$.

Визначивши необхідний об'єм поліуретанової смоли в рідкому стані V_{cm} та оперуючи значенням її щільності в рідкому стані ρ , можна визначити необхідну масу смоли за формулою:

$$m_{cm} = V_{cm} \cdot \rho_{cm}, \text{ г}. \quad (2.4)$$

Важливо, що смола та каталізатор повинні зберігатись при температурі навколишнього середовища $5 - 30^{\circ}\text{C}$, згідно заявлених виробником технічних характеристик, що відповідало фактичним умовам збереження у лабораторії.

Розміщені фракції піскови́ка та алевроліту в металевій формі ЗФК-70 наведено на рисунку 2.8а, зразки піскови́ка та алевроліту з додаванням

поліуретанової смоли – на рисунку 2.8б відповідно. Зразки вистоювались не менше заявленого часу повного затвердіння (не менше 30 хв).



Рисунок 2.8 – Загальний вигляд фракцій пісковика та алевроліту в металевій формі: (а) розміщені фракції порід; (б) фракції порід, скріплені поліуретановою смолою

Етап 3. Після регламентованої виробниками тривалості твердіння полімерної смоли 30 хв, металеві форми розбираються і, таким чином, отримуються виготовлені зразки консолідованого полімерною смолою масиву з пісковика та алевроліту, а також зразка чистої полімерної смоли (рис. 2.9).

Етап 4. Отримані зразки консолідованого поліуретановою смолою масиву підлягають випробуванням та визначенням найважливіших фізико-механічних властивостей.



Рисунок 2.9 – Ілюстрація виготовлених зразків консолідованого смолою фракцій порід пісковика та алевроліту з пустотністю 42 – 45% та чистого полімеризованого продукту

Перед випробуванням отримані зразки зважуються та з урахуванням відомого їх об'єму ($7 \times 7 \times 7 \text{ см} = 343 \text{ см}^3$) визначається щільність консолидованого масиву. Далі встановлюється міцність на одноосьовий стиск, що може свідчити про ступінь зміцнення масиву. Найбільш складними є методики з визначення модуля пружності (Юнга) та коефіцієнту Пуассона консолидованого полімерною смолою масиву.

Модуль пружності порід є важливим параметром в геомеханіці для оцінки стійкості гірничих виробок, який визначає здатність породи чинити опір деформації під дією навантаження і повертатися до вихідної форми після зняття даного навантаження. Чим вище модуль пружності породи, тим більший тиск вона здатна витримувати і меншою є ймовірність виникнення руйнувань та деформацій. Знання модуля пружності порід допомагає оцінити, яке навантаження порода може витримати без руйнування, які заходи необхідно вживати для зміцнення гірничих виробок, як зміниться напружено-деформований стан порід при зміні геометричних параметрів виробки тощо. В цілому, знання модуля пружності порід є важливим фактором для проєктування та експлуатації гірничих виробок у різних умовах.

Незважаючи на складність визначення модуля пружності за нормативними методиками, існують дієві механізми встановлення низки важливих додаткових параметрів під час випробування на одноосьовий стиск, завдяки яким, за допомогою авторитетного аналітичного виразу, знаходиться його значення.

Формула для розрахунку модуля пружності під час випробувань на стиск породи базується на стандарті, розробленому Міжнародним бюро механіки гірських порід [9, 10]. На практиці, відповідно до рекомендацій даного бюро, модуль пружності E визначається під час випробувань на одноосьовий стиск із використанням наступного виразу:

$$E = \frac{\Delta F \cdot h_1}{S \cdot \Delta h}, \text{ Па}, \quad (2.5)$$

де $\Delta F = F_2 - F_1$ – різниця кінцевого та початкового навантаження на зразок, кН;

F_1 – початкове навантаження, зареєстроване на приладі на початку випробування, кН;

F_2 – навантаження наприкінці випробування, зареєстроване на приладі, кН;

$\Delta h = h_2 - h_1$ – різниця кінцевої та початкової висоти зразка, мм;

h_1 – початкова висота зразка, виміряна за допомогою штангенциркуля або лінійки, мм;

h_2 – кінцева висота зразка, виміряна за допомогою штангенциркуля або лінійки після зняття навантаження, мм;

S – площа поперечного перерізу зразка, мм².

Таким чином, на основі проведення лабораторних досліджень встановлюються важливі фізико-механічні властивості консолідованого поліуретановою смолою масиву гірських порід, а саме: щільність, модуль Юнга, міцність на стиск.

Для визначення фізико-механічних властивостей (зокрема міцності на стиск та модуля пружності) композитного масиву «порода + поліуретанова смола» у межах об'ємного вмісту смоли від 0 до 22 – 25%, що відповідає характерному діапазону більш реальної тріщинуватості масиву, було прийнято рішення про аналітичне продовження лабораторних результатів шляхом екстраполяції. Оскільки в умовах лабораторії фізично неможливо відтворити консолідовані зразки з дуже низькою міжфракційною пустотністю (менше 20%), характер кривих у діапазоні 0...20%, що відповідає природним станам порід із тріщинною пустотністю (до 0,7% для алевроліту та 0,3% для пісковика), був визначений на основі екстраполяції поліноміальних апроксимацій. Прийняте рішення є науково обґрунтованим у випадках, коли експериментально встановлено стабільну залежність параметра від змінної, а в лабораторних умовах неможливо відтворити весь об'єм досліджень.

У зв'язку з відсутністю спеціалізованого лабораторного обладнання для прямого визначення фізико-механічних характеристик зміцненого поліуретановою смолою консолідованого масиву гірських порід, такі важливі

властивості як міцність на розтяг, зчеплення, кут внутрішнього тертя та коефіцієнт Пуассона, визначалися аналітичним шляхом із використанням методів теорії композиційних матеріалів. Зазначені механічні характеристики є особливо важливими при чисельному моделюванні геомеханічного стану масиву при його зміцненні поліуретановою смолою.

Було застосовано узагальнене правило сумішей на основі моделі Фойгта [11], яка передбачає паралельне поєднання деформацій складових фаз композиту. Відповідно, характеристики зміцненого масиву оцінювалися як зважене середнє між властивостями природної гірської породи та поліуретанової смоли, пропорційно до об'ємної частки кожного компонента. Такий підхід дозволяє отримати прогностичні розрахункові значення параметрів зміцненого масиву, які достатньо точно відображають зміну механічної поведінки порід після ін'єкційного зміцнення й забезпечують необхідну інформативність для використання в подальших чисельних розрахунках.

Задача визначення фізико-механічних властивостей композитного матеріалу, що утворений із двох або більше фаз, у нашому випадку твердих фрагментів гірської породи та полімерної смоляної матриці, належить до фундаментальних проблем механіки неоднорідних середовищ. Основна мета полягає у тому, щоб на підставі відомих характеристик і об'ємного вмісту кожної зі складових фаз спрогнозувати ефективні усереднені властивості новоутвореного композиту як цілісного матеріалу.

Найбільш універсальним та широко застосовуваним спрощеним методом властивостей композитів є так зване «правило сумішей» [12, 13]. Незважаючи на свою простоту, цей підхід дозволяє отримати та виявити основні тенденції зміни властивостей залежно від об'ємного вмісту фаз. Новий композитний матеріал, а саме, конгломерат з твердих фракцій порід, скріплений поліуретановою смолою, розглядається як двофазна система: наповнювач, яким є частинки гірської породи (алевроліт, пісковик), та матриця, якою виступає полімерна смола, що заповнює міжфракційний простір.

Основним параметром, що визначає вклад кожного компонента, є його об'ємна частка у композиті. Для двофазної системи завжди виконується умова:

$$V_{nor} + V_{cm} = 1, \text{ Па}, \quad (2.6)$$

де V_{nor} – об’ємна частка породи, %;

V_{cm} – об’ємна частка смоли (чисельно дорівнює пустотності фракцій порід), %.

Для прогнозування відсутніх параметрів застосовується лінійне правило сумішей, а саме модель Фойгта, яка заснована на припущенні про ізодеформацію. Передбачається, що при навантаженні композиту деформація в обох компонентах (породі та матриці) однакова і дорівнює загальній деформації композиту, що по суті аналогічно до паралельного з’єднання елементів в механіці.

Досліджувана механічна властивість композитного матеріалу за моделлю Фойгта може бути представлена виразом:

$$P_{ком}^{gl} = P_{nor} \cdot V_{nor} + P_{cm} \cdot V_{cm}, \text{ Па} \quad (2.7)$$

де P_{nor} – фізико-механічна властивість вихідної породи;

V_{nor} – об’ємна частка породи у полімерному композиті, %;

P_{cm} – фізико-механічна властивість поліуретанової смоли (матриці);

V_{cm} – об’ємна частка поліуретанової смоли у полімерному композиті, %.

Слід зазначити, що лінійний підхід до визначення властивостей композитного матеріалу за моделлю Фойгта є деякою ідеалізацією, оскільки не враховує складні мікромеханічні ефекти на межі розділу фаз «порода – смола», такі як концентрація напружень або неідеальність адгезії. Проте, припущення про застосування цієї моделі для аналітичного визначення таких властивостей як зчеплення, міцність на розтяг, кут внутрішнього тертя і коефіцієнт Пуассона, є фізично обґрунтованим. Дане твердження зумовлено тим, що для цих параметрів домінуючим є адитивний (сумарний) внесок властивостей кожного компонента у загальну реакцію матеріалу на навантаження.

Таким чином, незважаючи на зазначені спрощення, модель Фойгта приймається як коректний та широко застосовуваний у інженерній практиці метод для отримання попередніх оцінок і прогнозування властивостей композитів, де передбачається спільна робота його складових.

2.3 Методика досліджень індексу геологічної міцності масиву (GSI) у зоні впливу геологічного порушення на основі шахтної інформації

Дослідження структури та тріщинуватості масиву гірських порід у зоні впливу дрібноамплітудних геологічних порушень типу «скид» було проведено з метою уточнення геомеханічних характеристик порід і оцінки їхньої стійкості в умовах шахтних виробок. Основним завданням стало визначення показника геологічної міцності гірських порід GSI (Geological Strength Index) [14], який є основним загальноприйнятим у світовій практиці геомеханіки параметром для оцінки якості масиву та прогнозування поведінки порід під впливом гірського тиску.

З метою уточнення ступеня тріщинуватості та порушеності масиву гірських порід у зоні впливу дрібноамплітудних геологічних порушень типу «скид» і безпосереднього визначення показника GSI було вивчено та систематизовано значний об'єм даних щодо відібраних протягом тривалого часу ведення гірничих робіт на ПрАТ «ШУ «Покровське» кернів з масиву різного літологічного складу покрівлі, яка представлена як пісковиком, алевролітом, так і їх комбінацією в межах кернових зразків. Крім цього, здійснено відсорткування та обробка зафіксованої геологічної інформації описів приконтурного стану й структури масиву саме у межах впливу геологічних порушень. Проаналізовано та систематизовано значний масив даних з кернового буріння при відпрацюванні запасів блоків № 8 – 11, а також додаткової інформації геологічних описів стану приконтурного масиву, зафіксованих геологічною службою.

Спільно з геологічною службою шахти проводився детальний аналіз отриманих за тривалий час ведення гірничих робіт кернових зразків. Фіксувалися такі їх параметри як глибина відбору та ступінь відновлення керну (відсоток цілісного матеріалу). Проте, основна увага приділялася оцінці структурних і геологічних характеристик порід кернових зразків та даних з геологічних описів стану приконтурного масиву в зонах впливу геологічних порушень при проведенні виїмкових штреків, зокрема:

– ступінь тріщинуватості: визначалася щільність та орієнтація тріщин, їхня довжина і взаємне розташування;

- якість поверхні тріщин: оцінювалася шорсткість, наявність глинистого або цементованого матеріалу, що впливає на міцність масиву;
- ступінь порушеності: аналізувалися ознаки механічного руйнування та залишкової цілісності порід.

Загалом проаналізовано та вивчено 30 кернових зразків пісковика та 28 – алевроліту, відібраних з покрівлі різних виїмкових виробок, а також понад 30 геологічних описів стану приконтурного масиву саме у зоні впливу геологічних порушень. На основі отриманих даних про структуру та тріщинуватість порід проводилася оцінка показника GSI за методикою, запропонованою Е. Хоеком, адаптованою для вугільних родовищ. Для цього застосовувалися спеціальні таблиці та графіки (рис. 2.10), що враховують ступінь тріщинуватості, якість поверхні тріщин і загальну структуру масиву [14]. Кожен керновий зразок аналізувався індивідуально, згідно таблиці оцінки показників, а результати узагальнювалися для визначення середнього значення GSI у певній зоні впливу порушення.

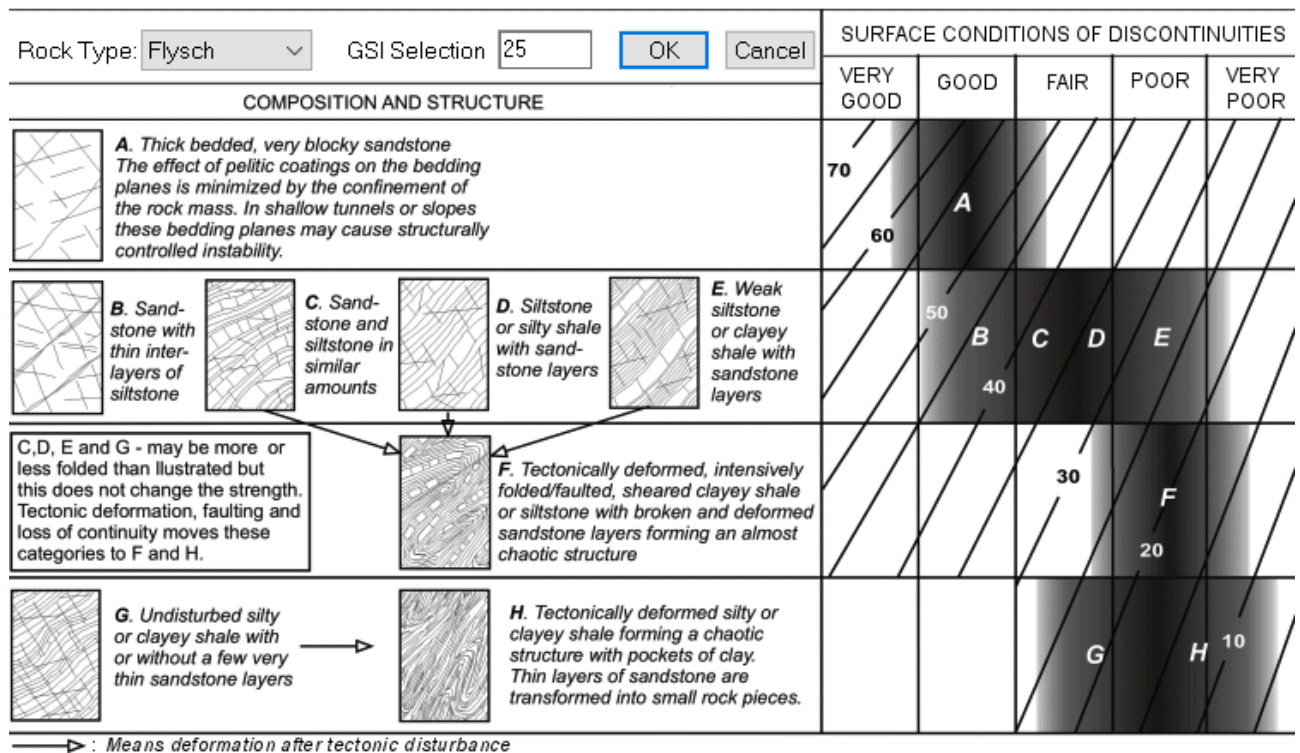


Рисунок 2.10 – Таблиця для оцінки показників GSI масиву гірських порід вугільних родовищ

Такий підхід з відбору кернів у шахтних умовах та описів стану масиву дозволив отримати об'єктивні дані щодо стану порід у зоні впливу порушень. Отримані значення GSI використовувалися для подальшого чисельного моделювання з метою стійкості виробки при входженні у зону геологічного порушення, а також наукового обґрунтування подальших параметрів ін'єкційного закріплення порід покрівлі на основі поліуретанових смол.

Отримання та детальний аналіз складу та структури кернів, окрім показника GSI, дозволяє також визначити тріщинну пустотність масиву. У алевролітах і пісковиках об'єм пор і тріщин може досягати 5% [4], при цьому недоступними для проникнення смоли є пори в породах. Однак, слід відзначити, що у зонах впливу геологічних порушень породи можуть бути в роздробленому стані, а пояснюється це тим, що, коли прохідницький вибій виїмкового штреку створив пустоту в масиві та призвів до перерозподілу напружень, тріщини розкриваються і масив додатково роздрібнюється, що особливо характерно для алевролітів, які мають більший ступінь тріщинуватості та шарувату будову. Окрім цього, за характером вивалоутворення можна констатувати, що тріщинна та міжфракційна пустотність знеміцненого алевроліту є на порядок більшою, ніж 5%, адже при вивалі породи розбиті на фракції різного розміру.

Як вже раніше зазначалось, масив гірських порід у зоні впливу геологічного порушення, особливо алевроліт, може бути знеміцненим, і окрім тріщинних пустот мають місце міжфракційні пустоти, які збільшуються у зв'язку із поступовим осипанням порід, що пов'язано з тривалістю часу експлуатації виробки під дією сил гірського тиску.

Тріщинна пустотність масиву може бути визначена як прямим, так і непрямим методом. Прямий метод, який є більш точним, полягає у відборі кернових зразків масиву різної довжини (3 – 5 м), детальному вивченні кількості й числа тріщин, мінімальної, максимальної та середньої їх ширини у системі, й може бути виражений із застосуванням формули [15]:

$$J_K = \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{l_K} \cdot 100\%, \quad (2.8)$$

де b_i – середня ширина розкриття кожної i -ої тріщини, м;
 l_k – довжина гірничого керна або відрізка масиву, м;
 n – кількість тріщин у межах довжини керна l_k , од.

Непрямий метод полягає в обстеженні якості, структури та тріщинуватості відслоненої поверхні масиву гірських порід при проведенні гірничих виробок, а пустотність може бути визначена таким чином [16]:

$$J_{об} = \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i + b_i} \cdot 100\%, \quad (2.9)$$

де b_i – ширина тріщин в системі, м;
 a_i – відстань між тріщинами в системі, м;
 n – кількість систем тріщин, од.

Одним з останніх цілеспрямованих вивчень стану масиву в зоні впливу геологічного порушення з амплітудою зміщувача 0,5 – 0,6 м та кутом 50° був відбір кернових зразків у процесі проведення конвеєрного штреку № 6 лави південної панелі блоку № 0 між ПК 221 – 222.

Відповідно до нормативної методики [17], прогностна зона впливу порушення за розрахунком становила близько 8 м. Отже, було прийнято рішення відібрати керни масиву від зміщувача на відстань до 8 м. Кернове буріння свердловин безпосередньо здійснили після проходження прохідницького вибою геологічного порушення. Покрівля вугільного пласта d_4 представлена алевролітом природною міцністю 35 – 50 МПа.

Для інструментального вивчення реального впливу порушення, геологічної структури тріщинуватості та загальної порушеності масиву було пробурено 5 кернових свердловин діаметром 70 мм (рис. 2.11): № 1 – безпосередньо у зоні зміщувача, та 4 з інтервалом 2 м – у висячому боці порушення, що забезпечило покриття всієї зони впливу прогностної довжині 8 м. У кожній свердловині виконано опис керна за структурно-геологічними ознаками: ступінь порушеності, орієнтація та щільність тріщин, що дозволило провести розрахунок GSI з урахуванням реальних даних.

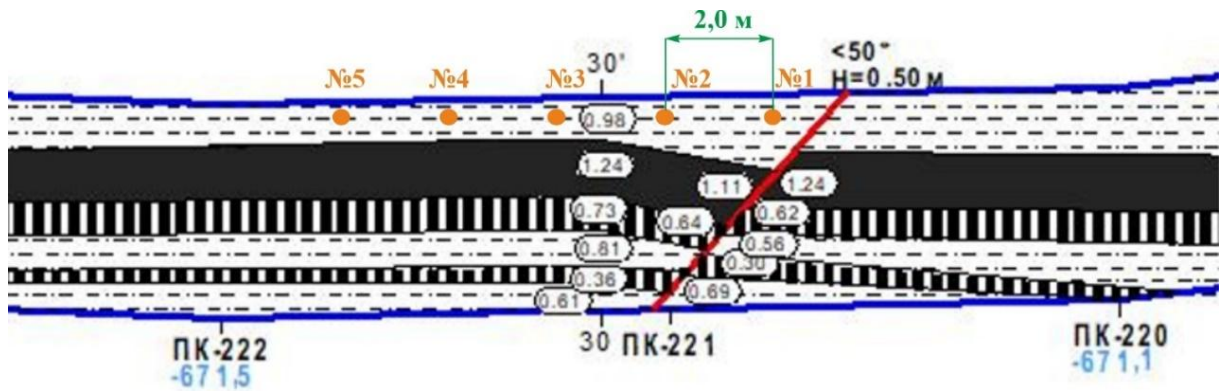


Рисунок 2.11 – Схема розташування свердловини для відбору керну в зоні впливу геологічного порушення конвеєрного штреку № 6 лави південної панелі бл. № 10 (продольний вигляд)

Оскільки досвідом проведення та спостереження за стійкістю виробок встановлено, що висота вивалів з покрівлі знаходиться у діапазоні 0,5 – 5,0 м, було прийнято рішення бурити свердловини довжиною 3 м під кутом 45° до горизонтальної площини, що пояснюється охопленням середньої зони між боком та покрівлею виїмкового штреку (рис. 2.12).

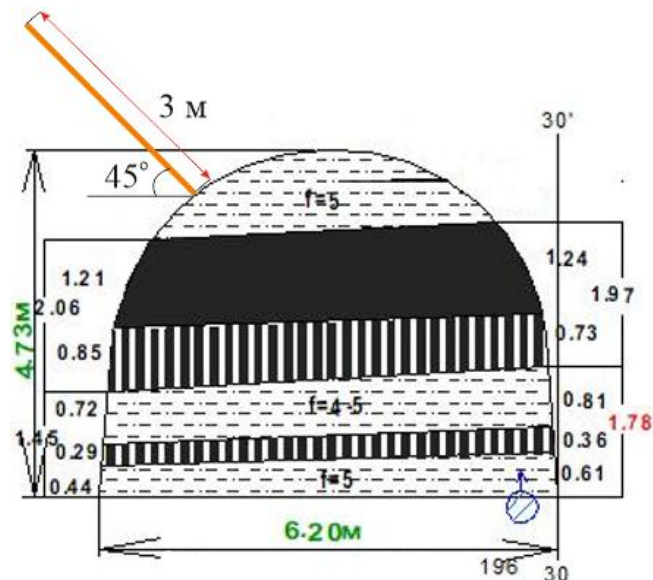


Рисунок 2.12 – Схема розташування свердловини для відбору керну в зоні впливу геологічного порушення конвеєрного штреку № 6 лави південної панелі бл. № 10 (поперечний вигляд)

Таким чином, як з відібраних кернових зразків масиву, так і з детального опису структури та тріщинуватості відслоненої поверхні, з'являється можливість встановити взаємозв'язок показника GSI з тріщинною і міжфракційною пустотністю, що має суттєву наукову цінність для прогнозування параметрів ін'єкційних робіт.

2.4 Методика чисельного моделювання геомеханічних процесів у масиві, закріпленому поліуретановою смолою

Для гірничої науки та практики представляє цінність дослідження впливу параметрів розривних геологічних порушень на напружено-деформований стан прилеглого масиву з урахуванням уточненого показника GSI за даними шахтного керна буріння, що дозволить в подальшому сприяти обґрунтуванню раціональних технологічних параметрів ін'єкційного закріплення приконтурного масиву гірських порід поліуретановими смолами.

Вирішення геомеханічних задач досягається шляхом застосування сучасного програмного комплексу Phase2 (компанії Rocscience Inc.), що реалізує двовимірне чисельне моделювання методом скінченних елементів і дозволяє проводити детальний аналіз складного напружено-деформованого стану неоднорідного породного масиву [18, 19]. Основною перевагою даного пакета є наявність бібліотеки сучасних моделей поведінки порід, включаючи критерії міцності Мора-Кулона, Хоека-Брауна, Друккера-Прагера та інші. Не менш важливою перевагою програмного комплексу є функція стадійного дослідження з можливістю реалістичного накопичення напружень та деформацій у масиві при переході на іншу стадію моделювання.

Обґрунтування та прийняття належного критерію міцності згідно гірничо-геологічних умов ведення гірничих робіт в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське» здатне адекватно описати механічну поведінку тріщинуватих масивів, у тому числі їх позамежне деформаційне розміщення. Крім того, розвинені інструменти геометричного моделювання надають можливість створювати складні геологічні структури і, що важливо для даного дослідження, реалізовувати зонований

підхід, задаючи різні властивості (зокрема геологічний індекс міцності GSI) для різних ділянок моделі. Сукупність цих можливостей робить Phase2 оптимальним інструментом для детального аналізу стійкості виїмкових виробок, особливо при перетині геологічного порушення. Безпосередньо критерій міцності обґрунтовується далі після розробки геомеханічних моделей.

Для досліджень приймаються гірничо-геологічні умови проведення виїмкових виробок у межах порівняно нового блоку № 11, де гірничі роботи досягли найбільшої глибини 1000 м. У межах виїмкових полів блоків № 10 і 11 мають місце як прогнозовані геологічні порушення, так і не прогнозовані, які розкриваються прохідницькими вибоями при проведенні виїмкових штреків. Оскільки у 70 – 80% породами безпосередньої покрівлі є саме алевроліти, а 20 – 30% – пісковик, для побудови геомеханічної моделі приймається наявність над та під вугільним пластом d_4 саме алевроліту. Більше того, саме при наявності алевроліту і відбувається найбільша кількість та глибина вивалів порід, у порівнянні з більш стійким та менш тріщинуватим пісковиком.

Структура вуглевмісної товщі порід прийнята за даними 4-х відпрацьованих лав у блоці № 11. У межах блоку вугільний пласт d_4 має потужність 1,2 – 2,3 м, безпосередня покрівля (алевроліт) потужністю 1,5 – 8,0 м, основна покрівля – пісковик потужністю 5 – 20 м. Безпосередня підшва пласта є алевролітом, потужність якого сягає 2 – 15 м, а основна підшва – пісковиком потужністю 4 – 15 м. Кут падіння пласта і порід – 3 – 5°, прийнятий усередненим 4°. Узагальнені фізико-механічні властивості порід у частині шахтного поля, а саме блоці № 11, складені на основі вивчення прогнозу гірничо-геологічних умов проведення штреку та різних аналітичних джерел.

Оскільки зона впливу геологічного порушення має певні зони впливу від площини зміщувача у напрямку висячого боку та лежачого боків, що виражається зміною стійкості та тріщинуватості порід певного ступеня, у чисельному моделюванні моделювалось погіршення стану масиву при проведенні виїмкового штреку шляхом зміни показника індексу геологічної міцності GSI, який є відомим показником оцінки стану порушеності масиву і враховує масштабний ефект, що є більш наближеним до реальних умов.

Властивості порід в межах блоку № 11 наведено у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Фізико-механічні властивості природного масиву гірських порід

Літотип	γ , т/м ³	σ_{cm} , МПа	σ_p , МПа	E , МПа	μ	c , МПа	φ , град
Вугілля	1,34	13,5	1,0	4100	0,26	1,5	26
Алевроліт	2,7	45	3,5	5300	0,28	5	28
Пісковик	2,75	75	6,5	11000	0,25	3	34

Показник GSI був запропонований Хоеком та Брауном у 1990-х роках як складова їхнього нового критерію міцності гірських порід, яким сьогодні користуються багато вчених та інженерів у закордонній практиці та який закладений у багатьох програмних продуктах моделювання методом скінченних елементів [14]. Показник GSI природного фоновому стану порід за результатами геологічної розвідки та прогнозів оцінюється у 55 – 60 балів для пісковика (5 – 10 тріщин на 1 п.м.), а алевроліту – 50 – 55 балів (8 – 15 тріщин на 1 п.м.).

Особливістю чисельного моделювання геомеханічних процесів у масиві навколо штреку в поперечному перерізі є те, що неможливо чітко відслідкувати вплив геологічного порушення, у порівнянні з повздовжнім перерізом. Тому єдиним варіантом є пониження фізико-механічних властивостей масиву шляхом зменшення показника GSI, що імітує у моделі входження виїмкового штреку в зону впливу геологічного порушення і, відповідно, у більш тріщинуватий масив.

Імітація входу прохідницького вибою виїмкового штреку в зону впливу при чисельному моделюванні виконувалась шляхом поступового зменшення індексу геологічної міцності масиву GSI при його значеннях 50, 40, 30 і 20 та оцінювались переміщення й деформації масиву з фіксацією критичного порогового показника GSI, коли зміщення контуру виробки стають критичними та призводять до руйнування рамного кріплення і вивалоутворення. Виявлення критичного порогового значення показника GSI є безпосередньо індикатором необхідності термінових заходів зміцнення приконтурного масиву, яким і є його

ін'єкційне зміцнення поліуретановою смолою. Отже, при погіршенні стану масиву, що відбувається в зоні впливу геологічних порушень, і критичному пороговому показнику GSI, далі застосовується трансформація геомеханічної моделі з урахуванням зміцнення.

Геометричні розміри геомеханічних моделей прийняті такими, щоб уникнути впливу крайового ефекту та максимально забезпечити достовірність моделювання. У покрівлю та підшову враховано породи на відстань не менше 20 м, згідно існуючим нормативним методикам. Розмір моделі у боках від виїмкової виробки прийнятий не менше 5 розмірів ширини виробки у проходці 6 м по обидва боки. Таким чином, вертикальний розмір моделі склав 50 м, горизонтальний – 70 м. Літологічний склад вуглевмісної товщі порід, а саме потужності вугільного пласта d_4 , потужності шарів алевроліту та пісковика в покрівлі та підшві у геомеханічних моделях прийняті усередненими для умов блоків № 10 і 11. Прийняті розміри геомеханічної моделі за вертикальною та горизонтальною координатами Y і X є мінімально достатніми для опису збурень поля напружень навколо штреку, виходячи з того, що компоненти напружень на межах моделі наближаються до вихідного гідростатичного стану ($\sigma_y = \gamma H$, $\sigma_x = \lambda \gamma H$) з точністю до 10%, що цілком допустимо для гірничо-технічних розрахунків. Побудована геомеханічна модель ілюструється на рисунку 2.13.

Моделювався пластовий виїмковий штреки блоку № 11 перерізом у проходці $23,3 \text{ м}^2$ виключно арочної форми зі склепінням, близьким до циркульного, для кріплення яких найбільш інформативними геометричними параметрами є радіус склепіння та висота прямолінійної частини стійки рами [20]. Виробка підтримується рамним триланковим податливим кріпленням арочної форми КШПУ-20,3 зі спецпрофілю СВП-33. Форма та розміри кріплення КШПУ-20,3 відображені відповідно до паспорта кріплення розглянутого виїмкового штреку. Рами виготовлені зі спецпрофілю СВП-33 з кроком встановлення 0,5 м уздовж виробки. Змодельовано реальний поперечний перетин спецпрофілю СВП-33 з точним відображенням конструкції податливого замку та міжрамного огороження з металевої сітки.

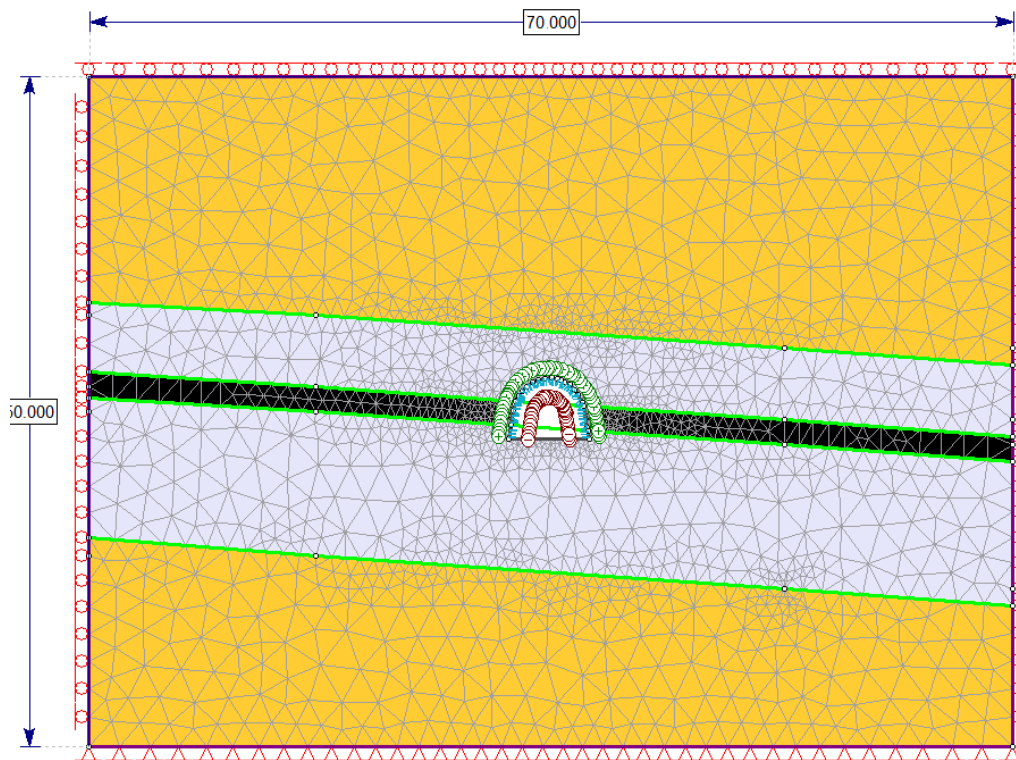


Рисунок 2.13 – Геомеханічна модель масиву гірських порід, що містить виїмковий штрек у поперечному вигляді

Спецпрофіль СВП виготовляється із сталі Ст. 5 з такими механічними характеристиками: модуль пружності $E^p = 21 \cdot 10^4$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu^p = 0,3$. Кріплення у програмі задається спеціальною функцією *Liner*, що проводиться вздовж контуру виробок із заданням відповідних параметрів.

Відповідно до плану гірничих робіт, глибина розташування базової ділянки виробки становить $H = 950$ м (по підшві пласта d_4). Верхня горизонтальна площина моделі має позначку 905 м, що за середньозваженої об'ємної ваги порід $\gamma = 22$ кН/м³ формує вертикальне навантаження на верхній межі моделі $\sigma_y = \gamma H = 21$ МПа. Нижня межа моделі має жорстку опору і служить площиною початку відліку вертикальної координати. За бічними площинами моделі введено умову плоскої деформації, що відповідає реальному механізму деформування масиву і широко використовується у геотехнічних розрахунках підземних гірничих виробок. За класичним підходом, боковий тиск (горизонтальні напруження) у масиві гірських порід на певній глибині можна оцінити через коефіцієнт Пуассона:

$$\sigma_x = \lambda \gamma H = \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma H, \quad (2.10)$$

де μ – усереднений коефіцієнт Пуассона шарів гірських порід, $\mu = 0,27$.

Розрахункове значення σ_x складає 8 МПа, проте численні емпіричні та натурні дослідження для глибоких горизонтів свідчать, що фактичні горизонтальні напруження можуть перевищувати розрахункові за класичною теорією, що пов'язано з тривалою геотектонічною еволюцією, впливом тектонічних порушень, тріщинуватістю, структурною неоднорідністю масиву. У моделі σ_x прийнято збільшеним до 12 МПа ($\lambda \approx 0,56$), що відповідає більш реалістичним умовам напруженого стану порід та дозволяє точніше моделювати геомеханічні процеси у приконтурному масиві.

Далі, у міру проведення лабораторних досліджень, визначення й уточнення механічних властивостей масиву, консолідованого поліуретановою смолою, здійснюється трансформація геомеханічної моделі, а саме, додавання до неї зони зміцнення приконтурного масиву смолою (рис. 2.14). Згідно досвіду виконання ін'єкційного закріплення порід полімерними смолами, довжина нагнітальних шпурів змінюється у діапазоні 3 – 5 м, отже моделюється різна ширина зони зміцнення приконтурного масиву, яка прийнята у дослідженні 2,5; 3,5 і 4,5 м.

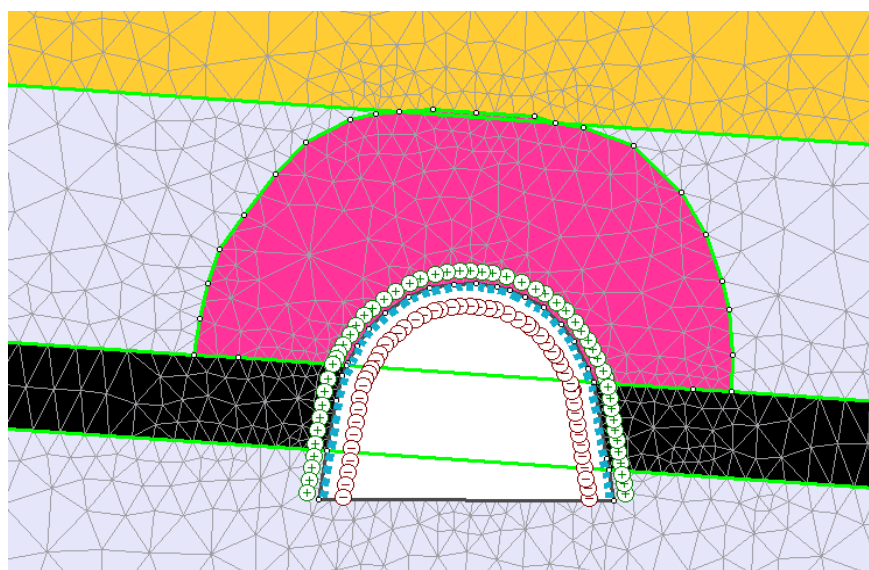


Рисунок 2.14 – Додавання зони ін'єкційного зміцнення приконтурного масиву поліуретановою смолою у геомеханічну модель при проведенні штреку

Згідно ідеї дослідження, ін'єкційне закріплення послабленого впливом геологічного порушення масиву при проведенні виїмкового штреку дозволяє не лише уникнути вивалів порід у зонах послаблення, але й також у подальшому попередити вивали вже при посуванні фронту очисних робіт до цього геологічного порушення, особливо на ділянці сполучення «лава – штрек». Зазначене свідчить про те, що для доведення геомеханічної ефективності зміцнення масиву поліуретановими смолами також потрібно створити та науково дослідити геомеханічну модель на ділянці сполучення «лава – штрек», яка ілюструється на рисунку 2.15.

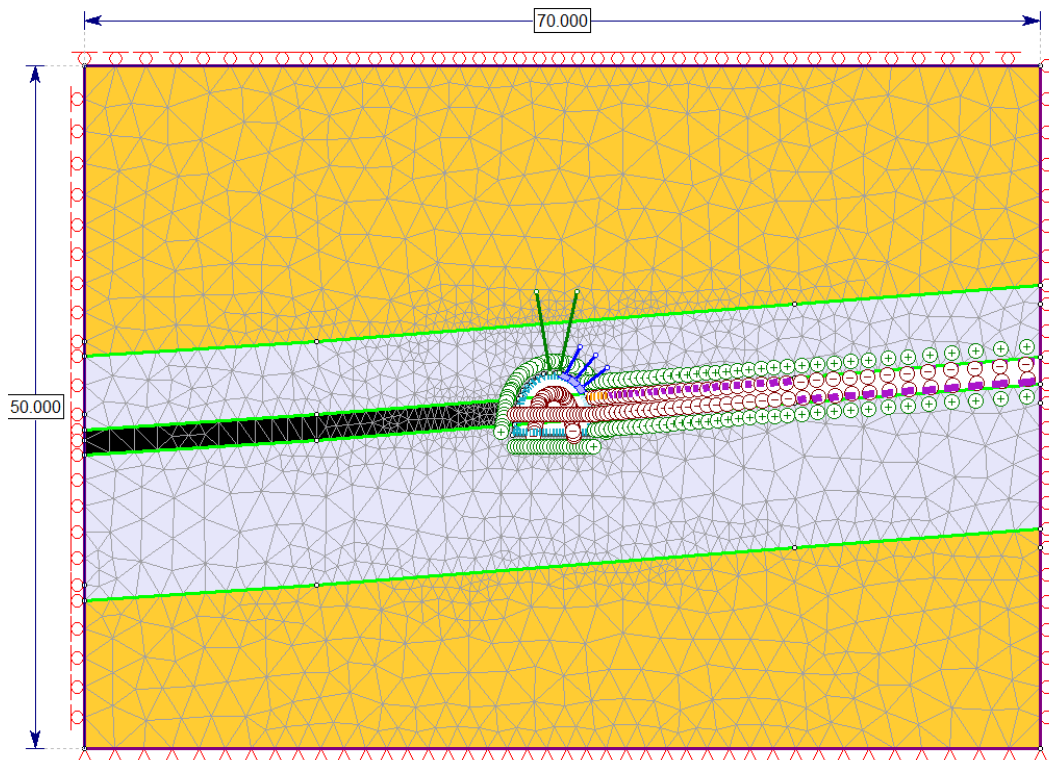


Рисунок 2.15 – Геомеханічна модель масиву гірських порід на сполученні «лава – виїмковий штрек» при веденні очисних робіт

Геомеханічна модель вуглевмісної товщі для дослідження стійкості приконтурного масиву за геометричними параметрами приймається аналогічною як при проведенні виїмкового штреку. Згідно сучасних паспортів очисних робіт, у лавах блоків № 10 і 11 у моделях враховано основні елементи системи кріплення як виїмкового штреку, так і очисного вибою: наявність

2 канатних анкерів довжиною 6 м, наявність 3 сталеполімерних анкерів довжиною 2,4 м, нахилених у напрямку очисного вибою, відпір секцій механізованого кріплення МКЮ4У-10/20 та відпір дерев'яних стійок, розташованих для кріплення бровки лави.

Аналогічно, у міру проведення лабораторних досліджень, визначення й уточнення механічних властивостей масиву, консолідованого поліуретановою смолою здійснюється трансформація геомеханічної моделі, а саме, додавання до неї зони зміцнення приконтурного масиву смолою на сполученні «лава – виїмковий штрек» (рис. 2.16). При цьому, ширина зони зміцнення приймається вже сталою на підставі попередніх досліджень її варіювання на стадії проведення виїмкового штреку та при критичному пороговому значенні GSI масиву, за якого є потреба у термінових заходах зміцнення масиву.

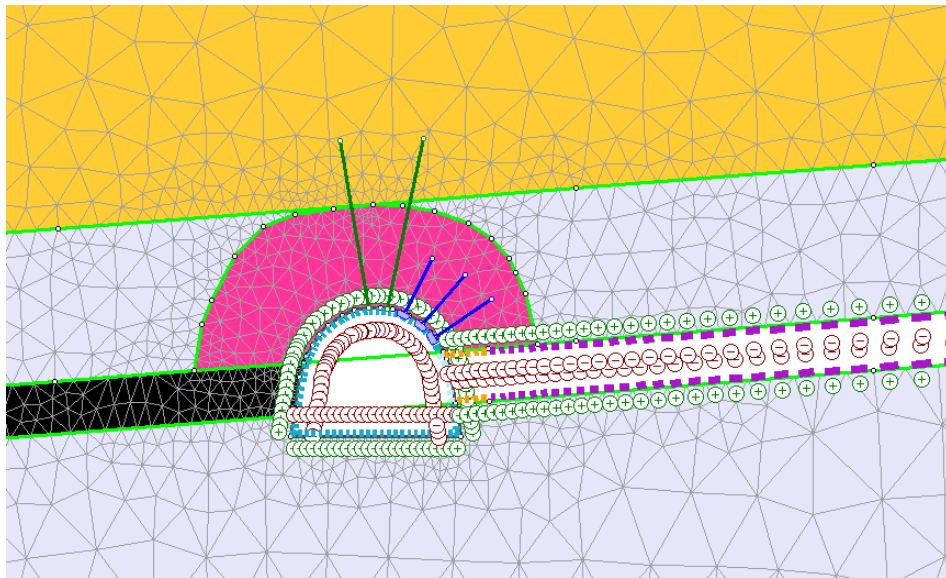


Рисунок 2.16 – Додавання зони ін'єкційного зміцнення приконтурного масиву поліуретановою смолою у геомеханічну модель на сполученні «лава – виїмковий штрек»

Як раніше зазначалось, важливо науково обґрунтовано в геомеханічній моделі прийняти критерій міцності порід. Застосування нелінійного критерію міцності масиву Хоека-Брауна для вирішення поставленої геомеханічної задачі є найбільш доцільним вибором. По-перше, критерій був спеціально розроблений

для оцінки міцності тріщинуватих масивів, що точно відповідає нашим геологічним умовам – наявності шаруватих осадових порід (алевролітів, пісковиків) середньої міцності 45 – 75 МПа, перетнутих геологічним порушенням. По-друге, нелінійна огинаюча крива руйнування більш реалістично описує механічну поведінку порід у широкому діапазоні стискаючих напружень, що виникають у масиві навколо виїмкового штреку в умовах значних глибин, а саме 900 – 1000 м, на відміну від більш спрощених лінійних моделей, таких як лінійний критерій Мора-Кулон. Модель же Хоека-Брауна на противагу моделі Мора-Кулона є нелінійною. Це означає, що її огинаюча крива руйнування є кривою, що набагато точніше відображає реальну поведінку скельних порід, міцність яких зростає при збільшенні всебічного тиску (напружень, що обтискають).

Основним параметром критерію є використання індексу міцності GSI, що є чисельною оцінкою якості масиву (від 0 до 100), яка визначається візуально на основі його структури (блочності, тріщинуватості) та стану поверхонь розривів (шорсткість, наявність заповнювача). Використовуючи GSI, критерій знижує лабораторну міцність незайманої породи (σ_{ci}) та її внутрішні фрикційні властивості (m_i) до еквівалентних характеристик реального масиву (m_b , s , a), враховуючи також ступінь порушення порід при вийманні (фактор D).

Основними формулами критерію є рівняння руйнування і вирази для розрахунку параметрів масиву. Загальне рівняння критерію Хоека-Брауна пов'язує максимальне (σ_1') і мінімальне (σ_3') головні ефективні напруження у момент руйнування [21, 22]:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (2.11)$$

де σ_1' – максимальне ефективне головне напруження;

σ_3' – мінімальне ефективне головне напруження;

σ_{ci} – межа міцності при одновісному стиску інтактної породи;

m_b , s , a – змінні параметри масиву.

Коефіцієнт фракційних властивостей масиву визначимо:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right). \quad (2.12)$$

Коефіцієнт структурного зчеплення скального масиву

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right). \quad (2.13)$$

Показник ступеня, що описує огинальну кривизну руйнування:

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right), \quad (2.14)$$

де GSI – геологічний індекс міцності породи;

m_i – константа матеріалу для інтактної породи;

D – фактор порушення, що залежить від способу ведення робіт (від 0 для ідеальної проходки до 1 для дуже поганих умов вибухових робіт).

У програмному пакеті Phase2 вбудований калькулятор розрахунку параметрів критерію Хоека-Брауна, для чого достатньо ввести визначений показник GSI , міцність на стиск інтактної породи (лабораторна міцність), модуль Юнга, параметр m_i згідно літотипу породи та фактор порушення масиву D , який приймається 0,1 – 0,5 при проведенні гірничих виробок механічним комбайновим способом та залежить від якості обробки порід прохідницького вибою (у нашому випадку приймається середнє значення $D = 0,2$).

Для розрахунку параметрів критерію міцності за Хоеком-Брауном важливо визначити емпіричний коефіцієнт m_i , що характеризує крихкість і схильність породи до руйнування за формуванням тріщин, який вже достатньо точно визначено дослідниками для кожного літотипу породи на основі одновісних та тривісних випробувань. Для літотипів порід, що є характерними для шахтного поля ПрАТ «ШУ «Покровське», прийняті значення коефіцієнту m_i наведено у таблиці 2.8.

За методикою Хоека-Брауна існують пікові та залишкові параметри, коли масив переходить в заграничний стан.

Таблиця 2.8 – Значення показника m_i різних літотипів
шахтного поля ПрАТ «ШУ «Покровське»

Літотип	Діапазон значень m_i	Середнє значення
Вугілля	7 ± 2	7
Алевроліт	9 ± 3	9
Пісковик	17 ± 5	17

Методикою рекомендується від встановленого пікового значення GSI визначати залишкове значення, шляхом пониження першого на 10 – 15 пунктів. При зміні показника GSI автоматично перераховуються найважливіші параметри критерію m_b , s , a . У зв'язку з тим, що програмою чисельного моделювання приймається дослідження стану масиву в зоні впливу геологічних порушень з різним значенням GSI, потребує визначення саме m_b , s , a , що було безпосередньо здійснено та наведено у таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Параметри критерію Хоека-Брауна
для досліджуваних типів гірських порід

Гірська порода	Значення параметрів критерію Хоека-Брауна							
	GSI		m_b		s		a	
	peak	residual	peak	residual	peak	residual	peak	residual
Вугільний пласт	50	40	0,856	0,562	0,02	0,0006	0,505	0,511
	40	30	0,562	0,369	0,0006	0,0002	0,511	0,522
	30	20	0,369	0,242	0,0002	0,00005	0,522	0,543
	20	10	0,242	0,159	0,00005	0,000015	0,543	0,585
Алевроліт	50	40	1,101	0,723	0,02	0,0006	0,505	0,511
	40	30	0,723	0,475	0,0006	0,0002	0,511	0,522
	30	20	0,475	0,312	0,0002	0,00005	0,522	0,543
	20	10	0,312	0,205	0,00005	0,000015	0,543	0,585
Пісковик	60	50	3,17	2,08	0,007	0,002	0,502	0,505
	50	40	2,08	1,37	0,002	0,0006	0,505	0,511
	40	30	1,37	0,90	0,0006	0,0002	0,511	0,522
	30	20	0,90	0,59	0,0002	0,00005	0,522	0,543

Після комплексу лабораторних та аналітичних досліджень властивостей зміцненого масиву поліуретановою смолою та визначення нестійкого знеміцненого його стану масиву (критичне значення GSI), де ймовірними є процеси вивалоутворення у геомеханічній моделі, задається зона зміцнення вже з новими фізико-механічними властивостями трансформованого смолою масиву і досліджується ефективність ін'єкційного закріплення.

Важливо, що вже до зони зміцнення приконтурного масиву виїмкового штреку, яка по суті є в'язко-пластичним середовищем, застосовується критерій міцності Мора-Кулона. На відміну від критеріїв, що враховують природну структуру порід, як емпіричний критерій Хоека-Брауна, модель Мора-Кулона краще описує поведінку штучно сформованого композиту, в якому механічна відповідь визначається зчепленням (c) та внутрішнім тертям (φ), що залежать від ступеня його полімеризації та співвідношення жорсткої (породної) та полімерної основ.

Отже, чисельне моделювання виконується комбінованим способом: для дослідження стійкості приконтурного масиву використовується критерій міцності Хоека-Брауна, який емпірично враховує стан природного масиву залежно від показників міцності породи, геологічної структури (GSI) та ступеня порушеності. У зонах цілеспрямованого ін'єкційного зміцнення, а саме приконтурний масив, де структура порід радикально змінюється внаслідок введення полімерного матеріалу, застосовується критерій Мора-Кулона.

Такий комбінований підхід дозволяє коректно врахувати геомеханічну неоднорідність середовища та забезпечити достовірну оцінку напружено-деформованого стану масиву навколо штреку, в тому числі прогнозування зміщень, пластичних зон та напружень як у природному масиві, так і в зоні штучного зміцнення.

2.5 Методика шахтного експерименту ефективності ін'єкційного закріплення тріщинуватих порід у зоні впливу геологічного порушення

Після проведення комплексу лабораторних та геомеханічних досліджень і формування рекомендацій щодо обґрунтування раціональних параметрів ін'єкційного нагнітання поліуретанової смоли Marithan®, заплановано проведення шахтного експерименту за наступною методологічною схемою. Загальна схема експерименту (рис. 2.17) передбачає після проходження зони геологічного порушення прохідницьким вибоєм на основі визначеного керновим відбором показника GSI у зоні впливу та розрахованих за отриманими науковими залежностями технологічних параметрів ін'єкційного закріплення, виконати фактичне нагнітання смоли у порушений масив. Для цього безпосередньо за прохідницьким вибоєм, перед зоною впливу змішувача, розташовуються ємності з компонентами смоли, які через нагнітальну установку MULTI-STANDARD-4/1 подаються по напірних магістралях. Далі по гнучких рукавах компоненти надходять до змішувача, де відбувається їх активація, і вже у вигляді готового ін'єкційного складу подаються у шпури, пробурені в масив зони впливу геологічного порушення у висячому та лежачому боках.

У ході проведення шахтного експерименту, окрім забезпечення технологічного процесу ін'єкційного нагнітання смоли, здійснювався також комплексний моніторинг параметрів ін'єкційного зміцнення з метою подальшого аналізу ефективності закріплення порід у зоні впливу геологічного порушення. Зокрема, для кожного нагнітального шпуру фіксувалися технологічні параметри, такі як відстань між рядами шпурів, довжина шпуру, кут буріння, тривалість нагнітання, тиск подачі та об'єм поданої у шпур смоли (рекомендований і фактичний).

Аналіз даних дозволив оцінити ступінь досягнення проєктних параметрів ін'єкційного нагнітання. Після завершення ін'єкційних робіт у масиві було виконано контрольне буріння та відбір кернових зразків у зоні ін'єкційного закріплення, що дозволило оцінити якість зміцнення порід.

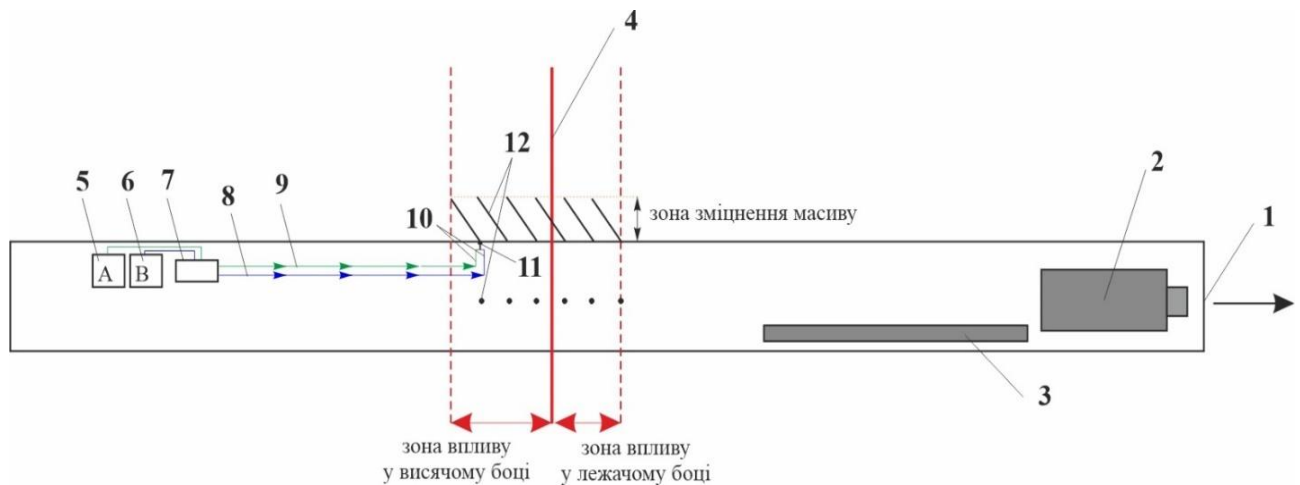


Рисунок 2.17 – Схема шахтного експерименту з ін'єкційного нагнітання

- поліуретанової смоли Marithan®: 1 – прохідницький вибій;
 2 – прохідницький комбайн; 3 – стрічковий перевантажувач;
 4 – змішувач геологічного порушення; 5 – ємність компонента А (смола); 6 – ємність компонента В (каталізатор); 7 – насосна нагнітальна установка MULTI-STANDARD-4/1 (Weber);
 8, 9 – напірні магістралі для подачі компонентів А і В; 10 – напірні рукава (шланги); 11 – змішувач; 12 – нагнітальні шпури

Для проведення експерименту з нагнітання смоли обрано геологічне порушення у 2-му півн. штреку нової лави блока № 11 (ПК 127 – 128) та заплановано прослідкувати ефективність закріплення зазначеної ділянки на сполученні «лава – штрек» після запуску 2-ї півн. лави блока № 11 та її підходу до закріпленого масиву у визначеному геологічному порушенні.

2.6 Висновки до розділу 2

У результаті досліджень доцільності ін'єкційного закріплення тріщинуватих порід в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське» та розробленої комплексної методики лабораторних і шахтних досліджень та чисельного моделювання стійкості приконтурного масиву виїмкового штреку можна зробити наступні висновки:

1. Аналіз зіставлення результатів визначення гранулометричних характеристик порід вивалів алевроліту (0...250 мм) та пісковика (0...300 мм), а також умови застосування способів зміцнення порід покрівлі вказують на те, що згідно класифікації за кускуватістю вони відносяться до I та II категорії, а ефективним способом зміцнення порід покрівлі є нагнітання поліуретанових смол ін'єкційним способом.

2. Розроблено методику лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей масиву, консолідованого поліуретановою смолою, яка полягає у моделюванні процесу заповнення міжфракційного простору порід (алевроліту, пісковика) поліуретановою смолою Marithan® із подальшим визначенням основних механічних характеристик зміцненого масиву. З урахуванням ускладнень при прямих дослідженнях в діапазоні пустотності 0 – 22% та обмеженості лабораторної бази, застосовано також аналітичний підхід для оцінки властивостей поліуретаново-породного композиту, який ґрунтується на узагальненому лінійному правилі сумішей з урахуванням об'ємної частки та властивостей кожної з фаз: жорстка – порода, пластична – полімерна смола.

3. Розроблено методику визначення індексу геологічної міцності масиву (GSI) у зоні впливу геологічного порушення на основі шахтної інформації, яка передбачає комплексне використання результатів кернового буріння, структурно-геологічного опису зразків, оцінки тріщинуватості та якості поверхонь тріщин, а також геологічного опису приконтурного масиву безпосередньо виїмкових виробок. Методика дозволяє враховувати реальні умови порушеності порід, уточнювати параметри тріщинної пустотності, ступінь дезінтеграції та встановлювати обґрунтоване значення GSI для подальшого чисельного моделювання й проєктування параметрів ін'єкційного закріплення.

4. Розроблено методику чисельного моделювання геомеханічних процесів у масиві, закріпленому поліуретановою смолою, яка полягає в поетапній трансформації геомеханічної моделі на основі уточненого індексу GSI, реальних структурно-геологічних характеристик приконтурного масиву, а також лабораторних і натурних даних щодо властивостей зміцненого композиту.

Методика передбачає послідовне врахування змін геологічної структури, тріщинуватості, механічних характеристик і напруженого стану масиву при проходженні виїмкового штреку через зону геологічного порушення – від природного фону до умов локального зміцнення. Критерієм стійкості застосовано комбінацію моделей Хоека-Брауна (для незміненої породи) та Мора-Кулона (для зміцненого в'язко-пластичного середовища), що забезпечує адекватне відображення напружено-деформованого стану приконтурного масиву та дозволяє прогнозувати межі пластичних зон, осідань покрівлі та необхідність ін'єкційного зміцнення.

5. Розроблено методику шахтного експерименту з оцінки ефективності ін'єкційного закріплення тріщинуватих порід поліуретановою смолою в зоні впливу геологічного порушення, яка полягає в поетапному проведенні буріння, нагнітання, моніторингу та контролю фізико-механічного стану приконтурного масиву. Методика передбачає попереднє визначення параметрів масиву на основі геологічного опису, GSI та тріщинуватості, виконання нагнітання з фіксацією ключових змінних (довжина шпуру, тиск, витрата, об'єм смоли, геометрія ін'єкцій), а також подальший відбір кернових зразків для оцінки якості зміцнення. Методика дозволяє кількісно оцінити вплив технологічних параметрів ін'єкції на реальне зміцнення масиву та уточнити рекомендації для подальшого застосування технології у складних гірничо-геологічних умовах.

2.7 Список використаних джерел до розділу 2

1. Дьомін, В.Ф., Дьоміна, Т.В., & Попова, Т.А. (2021). Технологія зміцнення нестійких гірських масивів синтетичними смолами у вугільних шахтах. *Сучасні тенденції та інновації у науці та виробництві*, 123, 1-8.

2. Яковенко, В.Г., Бондаренко, В.І., Петльований, М.В., Ковалевська, І.А., & Драгун, Д.В. (2024). Аналіз особливостей вивалоутворення приконтурних порід виїмкових виробок та шляхи досягнення їх стійкості. *Збірник наукових праць НГУ*, 76, 127-141. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/76.127>

3. Бондаренко, В., Яковенко, В., & Петльований, М. (2023). Аналіз особливостей вивалоутворення порід при проведенні виїмкових виробок в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське». В *Матеріалах XVI міжнародної науково-практичної конференції «Українська школа гірничої інженерії»* (с. 15-16). Східниця: ЛізуновПрес. <https://doi.org/10.33271/usme16.015>
4. Зеркаль, В.В. (2017). Інноваційні технології при проведенні та підтриманні гірничих виробок на шахтах Західного Донбасу. *Геотехнічна механіка*, 135, 258-265.
5. Nie, S., Wang, K., Zhao, Y., & Wang, Z. (2019). Recent progress in polymer-containing soft matters for safe mining: Gas adsorption, diffusion, and flow in nanopores. *Polymers*, 11(10), 1649. <https://doi.org/10.3390/polym11101649>.
6. DeMarco, M.J. (2008). Polyurethane resin (PUR) injection for rock mass and structure stabilization. In *Proceedings of the 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering* (pp. 1-10). Arlington: Missouri University of Science and Technology.
7. Weber Mining. (2023). *Marithan® polyurethane resins for rock stabilization*. Retrived from: <https://weber-mining.com/product-range-resins>
8. ДСТУ Б В. 2.7-71:1998. (1999). Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань (ГОСТ 8269.0-97). Київ: НДПВІстромсировина.
9. ISRM. (2018). *Suggested method on uniaxial compressive strength and deformability of rock materials (2018 revised version)*. International Society for Rock Mechanics. Retrived from: <https://isrm.net/isrm/page/show/1234>.
10. Bieniawski, Z.T., & Hawkes, I. (1983). Suggested methods for determining the strength and deformability of rock materials. Part 1: Suggested method for determining deformability of rock masses in situ. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20(6), 303-310. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(83\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(83)90004-7)
11. Zhang, Q., Wang, Y., Li, J., & Wang, Z. (2023). Constitutive model for grouted rock mass by macro-meso damage. *Polymers*, 15(13), 2884. <https://doi.org/10.3390/polym15132884>

12. Li, J., Liu, B., Rim, D., & Yang, J. (2015). Elastic modulus calculation model of a soil-rock mixture at normal stress. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 576080. <https://doi.org/10.1155/2015/576080>
13. Christensen, R.M. (2022). Improved Voigt and Reuss formulas with the Poisson effect. *Materials*, 15(16), 5656. <https://doi.org/10.3390/ma15165656>
14. Marinos, P., & Hoek, E. (2000). GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In *Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering* (pp. 142-150). Melbourne, Australia.
15. Hovorka, S.D., Mace, R.E., & Collins, E.W. (1995). *Permeability, porosity and connectivity: A technical report on the Edwards Aquifer, San Antonio, Texas. Edwards Aquifer Authority*. Austin, United States, 147 p.
16. Рекомендації з вивчення тріщинуватості гірських порід при інженерно-геологічних дослідженнях для будівництва. (1974). Будвидав, 40 с.
17. Геологічні роботи на вуглевидобувних підприємствах України: Інструкція (КД 12.06.204-99). (1999). Київ: Міністерство пального і енергетики України.
18. Nikitina, A., Borzykh, D., Rib, S., Lesnykh, A., & Zhao, T. (2021). Numerical modeling of the stress-strain state of peripheral massif in the vicinity of mine workings. *E3S Web of Conferences*, 330, 01009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202133001009>
19. Khan, H.A.A., Villegas, A.M.T., & De la Cruz, J.M. (2024). Rock slope stability analysis of a limestone quarry in a case study of an open-pit mine in the Philippines. *Scientific Reports*, 14, 18147. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69196-8>
20. Bondarenko, V.I., Symanovych, H.A., Kovalevska, I.A., Shyshov, M.V., & Yakovenko, V.H. (2023). Geomechanical substantiation of parameters for safe completion of mining the coal reserves adjacent to main workings. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 46-52. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-1/046>
21. Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. *Materials of the North American Rock Mechanics Society*, 1, 267273.

22. Hoek, E., & Brown, E.T. (2019). The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), 445-463. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>

23. Яковенко, В. (2025). Оцінка стану масиву у зонах геологічних порушень для його ін'єкційного закріплення в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське». В *Матеріалах XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Українська школа гірничої інженерії»* (с. 33-34). Східниця, Україна: ЛізуновПрес. <https://doi.org/10.33271/usme18.033>

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ СТУПЕНЯ ПОРУШЕНОСТІ ПРИКОНТУРНОГО МАСИВУ ТА ГЕОМЕХАНІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЙОГО ІН'ЄКЦІЙНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ

3.1 Виявлення характеру вивалоутворення порід приконтурного масиву виїмкових виробок у зонах високої порушеності масиву

Аналіз останнього досвіду проведення виїмкових виробок у блоках № 10 і 11 в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське» показує, що мали місце часті вивали за їх довжиною протягом терміну всього проведення. У пустотах вивалів здійснюється викладка клітей з негорючих матеріалів із забутуванням боків виїмкової виробки. Для аналізу особливостей вивалоутворення порід ПрАТ «ШУ «Покровське» були проаналізовані фактичні геологічні розрізи проведення 4-х виїмкових виробок та гірничо-геологічних умов відпрацювання цих 4-х лав підприємства, де зафіксовані випадки вивалів:

- 1-й півн. конв. штрек ц.п. блока № 11 та гірничо-геологічні умови відпрацювання 1-ї північної лави ц.п. блока № 11;
- 1-й півд. конв. штрек ц.п. блока № 11 та прогноз гірничо-геологічних умов відпрацювання 1-ї південної лави лави ц.п. блока № 11;
- 9-й півн. конв. штрек блока № 10 та гірничо-геологічні умови відпрацювання 9-ї північної лави блока № 10;
- конвеєрний штрек 2-ї лави півд. пан. блока № 10 та гірничо-геологічні умови відпрацювання 2-ї лави півд. пан. блола № 10.

Найбільш типові форми вивалів порід, що фіксувались при проведенні вищезазначених виробок виїмкових штреків, наведено на рисунку 3.1 [1, 2].

Для виявлення глибоких механізмів та закономірностей вивалоутворення при проведенні виробок необхідно проводити комплекс лабораторних та багатостатистичних шахтних спостережень за станом і властивостями порід, геометрією вивалів, швидкістю посування та організацією робіт прохідницьких вибоїв.

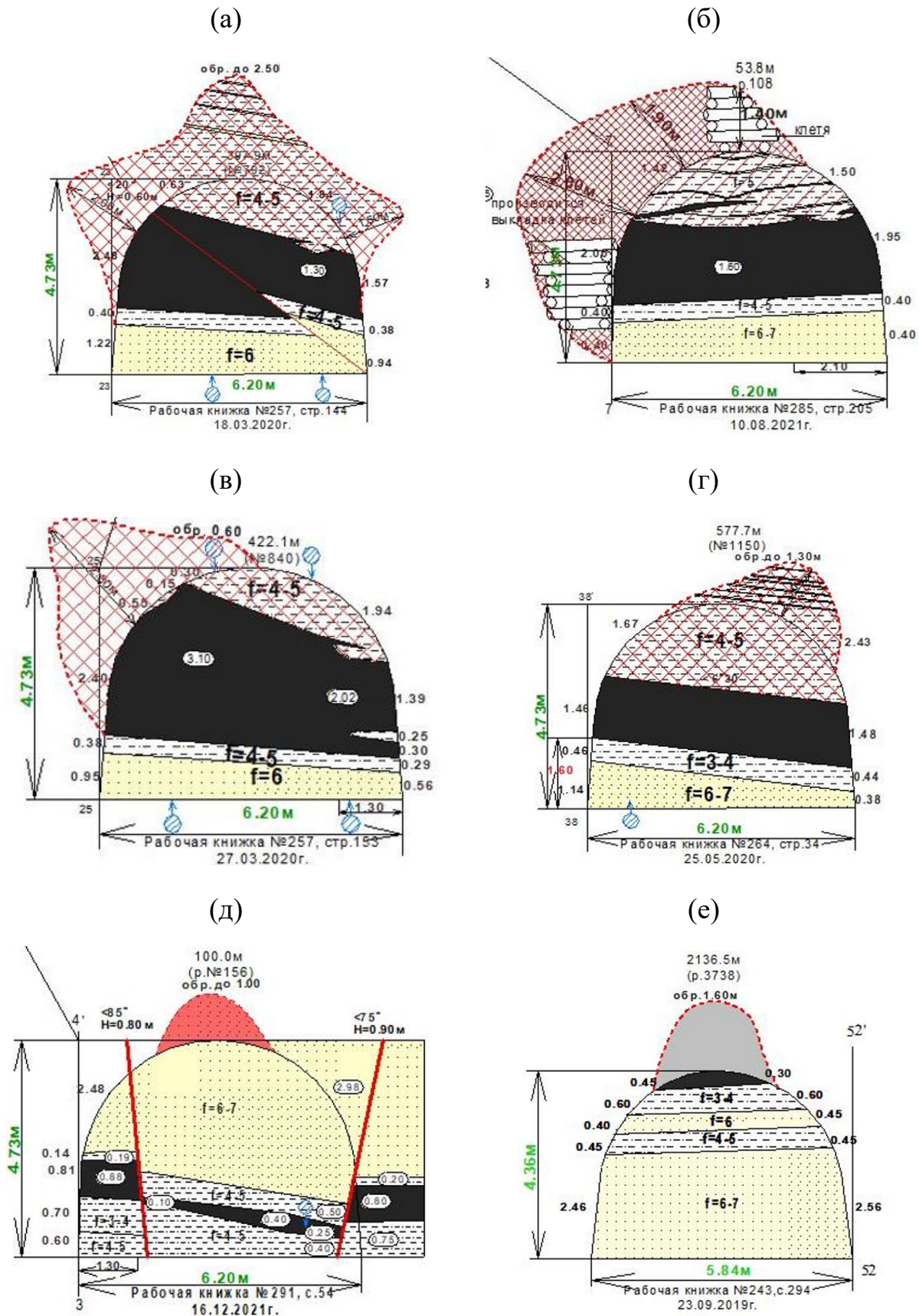


Рисунок 3.1 – Варіація типів форм вивалів порід з покрівлі та бортів виїмкових виробок: (а) трикутна; (б) бокова сводчата; (в), (г) кососпрямована, купольна; (д), (е) пряма, купольна

Проте, збір та систематизація шахтних даних щодо вивалів порід (табл. 3.1) при проведенні виїмкових виробок дозволяє сформулювати основні тенденції та особливості їх проявів. Аналіз даних таблиці 3.1 дозволив сформулювати основні особливості вивалоутворення:

- вивалоутворення порід приконтурного масиву спостерігається, незважаючи на спеціальні заходи, що застосовуються для їх попередження (буріння штангового кріплення), що, вірогідно, свідчить про надто знеміцнений стан порід при їх розкритті прохідницьким вибоєм;

- частіше спостерігаються потужні вивали (висотою до 5 м), коли у покрівлі порід залягають алевроліти, адже їх міцність та природна тріщинуватість є гіршою за пісковик, і присутня властивість шаруватості у структурі алевроліту. Форма вивалів, зазвичай, є трикутною або кососпрямованою у бортах виробки;

- рідше відбувається вивалоутворення (висотою 0,3 – 1,0 м), коли покрівля представлена пісковиком, який є міцнішим в 1,7 – 2,0 рази та з меншою інтенсивністю природної тріщинуватості;

- відмічається вплив на вивалоутворення збільшення потужності вугільного пласта у прохідницькому вибої. При максимальній потужності пласта 3,1 м зафіксовано найбільший за геометричними розмірами вивал, хоча відсутнє у зоні вивалу геологічне порушення та розмиви порід покрівлі вугільними прошарками;

- при заляганні в покрівлі алевроліту міцністю 40 – 50 МПа у зоні впливу геологічних порушень та їх розмивів вугільними прошарками за довжиною виїмкової виробки спостерігаються протяжні вивали з висотою обвалень 0,5 – 5,0 м. Так, при проведенні 1-го північного конвеєрного штреку центральної панелі блока № 11 утворилась зона вивалів порід у пікетах ПК 38 – 44, протяжність якої сягнула 60 м;

- вагомим фактором на розміри вивалоутворення є вплив кута падіння зміщувача геологічного порушення: при збільшенні кута падіння зміщувача, зміщення гірських порід зменшуються, адже зменшується протяжність зони

послаблення порід. Наявний масив шахтних даних щодо вивалів є недостатньо варіативним щодо аналізу впливу кута зміщувача;

– вплив глибини розробки на вивалоутворення не прослідковується, оскільки у масиві наданих шахтних даних вивали відбулись на приблизно однаковій глибині – 950 – 980 м.

Після проведення виїмкових штреків, що перетнули геологічне порушення, фіксуються відшарування порід покрівлі та боків виробок, при цьому породи часто знаходяться у дезінтегрованому та роздрібненому стані (рис. 3.2).

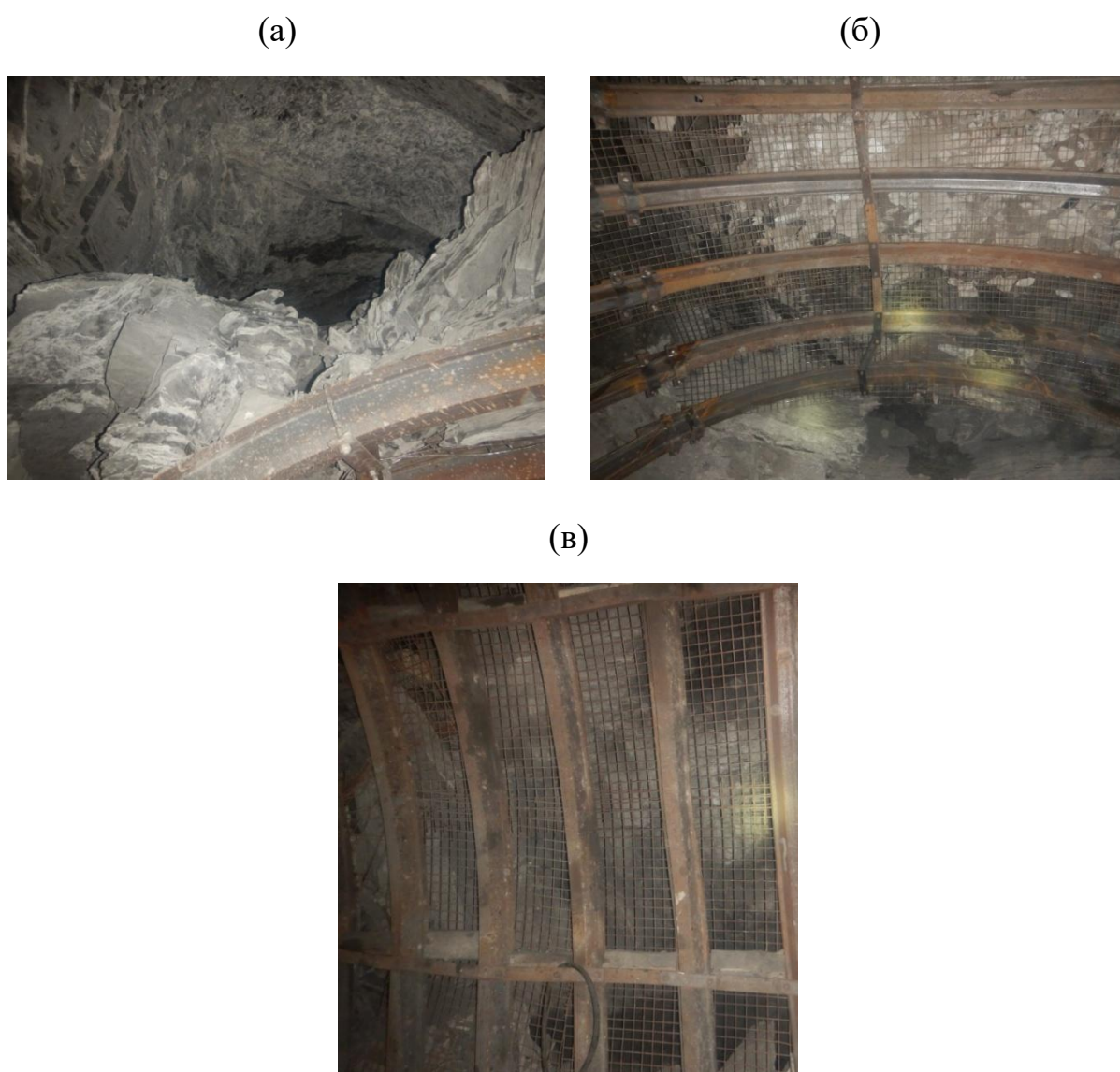


Рисунок 3.2 – Фотофіксація відшарування нестійких тріщинуватих порід при проведенні конвеєрного штреку: (а) утворення куполу вивалу; (б) відшарування фракцій порід у покрівлі; (в) відшарування порід у боках

Таблиця 3.1 – Систематизація умов проявів вивалоутворень порід в аналізованих виїмкових виробках

Виробка	Місце вивалу	Орієнтація, розмір вивалу	Форма вивалу	Тип порід	Міцність, МПа	Тріщинуватість	Глибина розробки, м	Потужність пласта, м	Амплітуда змішувача, м	Наявність розмивів у покрівлі
1 півн. конв. штр. ц.п. бл. № 11	ПК 31-32	Борт виробки до 1,4 м	Бокова купольна	Алевроліт	40	Закриті тріщини різного орієнтування під кутом 70 – 80°, 8 – 15 тр. на 1 п.м.	980	1,76 – 2,3	–	Розмив, вугільний прошарок
	ПК 38-40	Покрівля, правий і лівий борти 3,0×2,0×1,6 м	Трикутна	Алевроліт з прошарками пісковика	40		980	1,3 – 2,5	$H = 0,6 \text{ м}$ $\alpha < 20^\circ$	Розмив, вугільний прошарок
	ПК 42	Покрівля, правий і лівий борти 3,0×2,5×2,0 м	Трикутна	Алевроліт з прошарками пісковика	40		980	1,3 – 2,5	–	–
	ПК 43	Борт виробки до 2,5 м	Косо-спрямована, купольна	Алевроліт	40		980	1,6 – 3,1	–	Розмив, вугільний прошарок
	ПК 43-44	Покрівля, правий і лівий борти 5,0×3,0×3,0 м	Трикутна	Алевроліт з прошарками пісковика	40		980	1,76 – 3,1	–	–
1 півд. конв. штр. ц.п. бл. № 11	ПК 5	Покрівля, правий і лівий борти 0,7×2,0×1,2 м	Трикутна	Алевроліт	50		950	1,85 – 2,15	$H = 1,0 \text{ м}$ $\alpha < 20^\circ$	Розмив, вугільні прошарки
	ПК 5	Борт виробки 1,4×2,0 м	Бокова сводчаста	Алевроліт	50		950	2,0	–	Розмив, вугільні прошарки
9 півд. конв. штр. ц.п. бл. № 11	ПК 9-10	Покрівля виробки 1,0 м	Пряма, купольна	Пісковик	70	Одиничні відкриті тріщини під кутом 70 – 90°, 5 – 10 тр. на 1 п.м.	960	0,8 – 0,88	$H = 0,8 - 0,9 \text{ м}$ $\alpha < 75-85^\circ$	–
конв. штр. 2 лави півд. пан. бл. № 10	ПК 214	Покрівля виробки 1,0 м	Пряма, купольна	Вугілля Алевроліт	15 40	Закриті тріщини різного орієнтування під кутом 70 – 80°, 8 – 15 тр. на 1 п.м.	752	Пусті породи	$H = 2,5 \text{ м}$ $\alpha < 50^\circ$	–

Наведені шахтні спостереження показують, що при перетині прохідницьким вибоєм виїмкового штреку зони геологічного порушення, вивали порід відбуваються, зазвичай, не миттєво, а на деякому віддаленні від фронту прохідницьких робіт, що пов'язано з процесом перерозподілу опорного тиску та стадійністю розвитку геомеханічних процесів у часі. Такий процес деформування ослабленого масиву можна умовно поділити на три стадії.

На першій стадії, одразу за прохідницьким комбайном, породи в зоні порушення зазнають переважно пружних деформацій, зберігаючи тимчасову стійкість. На другій стадії, у міру віддалення вибою, відбувається поступове накопичення непружних (пластичних) деформацій, розкриття тріщин та розвиток процесів повзучості, що призводить до поступового зниження міцнісних властивостей порід. На третій стадії, коли накопичені деформації перевищують критичну межу, відбувається їх крихке руйнування та втрата несучої здатності масиву, що і проявляється у вигляді інтенсивних вивалів.

Отже, саме часовий проміжок між початковими деформаціями (стадія 1) та настанням фази руйнування (стадія 3) створює певне технологічне «вікно» для проведення випереджувального зміцнення приконтурного масиву штреків шляхом ін'єкційного закріплення поліуретановими смолами. Нагнітання поліуретанової смоли дозволить штучно підвищити міцнісні властивості та зчеплення масиву в ослабленій зоні й ефективно зупинити розвиток деформацій на другій стадії, запобігаючи їх переходу в критичну фазу.

Шахтні спостереження та аналіз типових форм вивалів (рис. 3.2) також показують характерну особливість, а саме, що руйнування порід відбувається не тільки з покрівлі, але й інтенсивно розвивається з боків виробки. Таке геомеханічне явище свідчить про те, що стійкість контуру визначається не лише гравітаційними силами, а й комплексним напружено-деформованим станом, що формується навколо виробки. Після виймання породи відбувається перерозподіл початкових напружень масиву, що призводить до значної концентрації горизонтальних напружень саме на боках виробки, і коли напруження перевищують межу міцності порід відбувається їх руйнування, яке проявляється

у вигляді відшарувань, сколювань та вивалів. Отже, вивали з боків є прямим наслідком бічного гірського тиску, а їх інтенсивність залежить від співвідношення міцності порід та рівня горизонтальних напружень.

Висувається припущення, що ін'єкційне зміцнення масиву поліуретановою смолою здатне вплинути не лише на зменшення зміщень покрівлі приконтурного масиву, але й на суттєве підвищення стійкості його боків. Геомеханічне обґрунтування цього припущення полягає у створенні єдиної несучої системи «зміцнена порода – масив». Нагнітання смоли зв'язує тріщинуваті породи покрівлі в монолітну конструкцію, формуючи штучне композитне склепіння зі значно вищими характеристиками міцності та модулем пружності. Це нове, більш жорстке склепіння, перехоплює на себе значну частину вертикальних напружень від ваги вищележачих порід і, завдяки своїй цілісності, ефективно перерозподіляє їх вглиб гірського масиву, використовуючи боки виробки як міцні опори. Внаслідок цього відбувається розвантаження приконтурної зони боків від надлишкової концентрації напружень, що є основною причиною їх руйнування.

Таким чином, локальне втручання в один елемент системи (зміцнення покрівлі) може призвести до позитивного геомеханічного ефекту – зменшення не тільки зміщень порід покрівлі, але й конвергенції контуру боків виробки, що здатне комплексно підвищити стійкість виробки в цілому.

3.2 Вивчення структури та тріщинуватості масиву за даними шахтного кернового буріння

Важливим етапом наукового обґрунтування параметрів попереднього ін'єкційного закріплення масиву поліуретановою смолою є розробка механізму для оперативного реагування на зміну структурного стану масиву, що може бути досягнуто шляхом встановлення взаємозв'язку між візуальною експрес-оцінкою стану порушеності масиву на підставі визначення індексу його геологічної міцності GSI та кількісною характеристикою, а саме сумарною пустотністю (тріщинна, міжфракційна).

Встановлення такого зв'язку є корисним з наукової та практичної точок зору, оскільки знання величини GSI дозволяє швидко, безпосередньо у виїмковій виробці, охарактеризувати якість масиву, тоді як саме показник сумарної (тріщинної та міжфракційної) пустотності є основним вихідним параметром для розрахунку необхідного об'єму поліуретанової смоли.

Для оцінки ступеню порушеності масиву було виконано системне кернове вивчення структури та тріщинуватості приконтурного масиву за матеріалами шахтного буріння, накопиченими протягом тривалого досвіду відпрацювання запасів коксівного вугілля блоків № 7 – 11, а саме при проведенні виїмкових штреків. Шахтоуправлінням «Покровське» здійснюється періодичний та цілеспрямований відбір кернів масиву гірських порід для уточнення літологічної структури й визначення механічних властивостей масиву. При цьому, при аналізі всієї наявної інформації, визначено, що частина кернів була вилучена безпосередньо в межах впливу зон геологічних порушень при різних амплітудах (0,3 – 1,7 м) та кутах падіння зміщувача (35 – 80°). При цьому важливо, що наявна геологічна інформація містила як дані кернового буріння, так і опису стану приконтурного масиву при проведенні виробок, що дозволяє також розділити методи оцінювання на прямі (кернове буріння) та непрямі (геологічний опис приконтурного масиву).

Безпосередньо опрацювання матеріалів кернового буріння здійснювалось за методичною схемою: опис кернів та їх фотодокументація (рис. 3.3), оцінка структурної будови, кускуватості, підрахунок кількості фрагментів на погонну довжину, визначення мінімальної, максимальної і середньої ширини розкриття тріщин, фіксація якості поверхонь розривів (шорсткість, наявність заповнювачів, ступінь вивітрювання) та подальше ранжування інтервалів за шкалами індексу геологічної міцності GSI [3]. Слід зазначити, що у відібраних кернах алевролітів у зонах впливу геологічних порушень його структура часто фіксувалась дезінтегрованою та роздрібненою. В такому випадку проводилося вагове визначення частки роздрібненого матеріалу та розрахунок загальної пустотності за різницею маси і щільності, що дозволило одночасно врахувати не лише тріщинну, але й міжфракційну пустотність дезінтегрованого алевроліту.



Рисунок 3.3 – Приклад фотодокументації відібраного керна зразка порід покрівлі, що представлена пісковиком

Першочергово оцінювався природний (фоновий) стан порід пісковиків та алевроліту в непорушеному масиві за результатами аналізу його структури по розвідувальних свердловинах за довжиною виїмкових стовпів. За результатами аналізу усереднено стан порід, які мають наступні особливості.

Пісковик сірий, дрібнозернистий з прошарками середньозернистого, польовошпатово-кварцевий, переважно на міцному карбонатному цементі, що забезпечує високу міцність породи. Структура масивна, сильно блокувата, з вираженою шаруватістю та плитчастим розшаруванням. Іноді зустрічаються прошарки алевроліту потужністю до 1,5 м. Тріщинуватість середня, в середньому 5 – 8 тріщин на погонний метр, що утворює порівняно масивні стійкі блоки. Тріщини переважно закритого типу, орієнтовані під кутом 70 – 80°. Поверхні розривів (тріщин) жорсткі, невивітрені, переважно гладкі, без видимого заповнювача, що свідчить про якість масиву вище середнього. Міцність пісковиків на стиск коливається у діапазоні 60 – 110 МПа.

За результатами комплексного аналізу цих характеристик, відповідно до діаграми Хоека, масив відноситься до категорії між А і В, є міцним та блоковим,

з прошарками алевроліту, з «хорошою» якістю поверхонь тріщин. Зазначені особливості дозволяють впевнено оцінити показник GSI у діапазоні 55 – 60, при цьому тріщинна пустотність масиву пісковика знаходиться в діапазоні 0,5 – 1,8%.

Алевроліт темно-сірий, слюдистий, з добре вираженою горизонтально- та хвилясто-шаруватою текстурою, що підкреслюється тонкими прошарками вуглистою матеріалу та натяками вуглефікованого детриту по площинах напластування. Структура масиву блокувата, шарувата, компетентна, порода відносно міцна. Тріщинуватість помірна, в середньому 6 – 10 тріщин на погонний метр. Тріщини переважно закритого типу, зорієнтовані під кутом 60 – 75° до напластування. Поверхні розривів гладкі або злегка шорсткі, невивітрені, іноді зі слабким залізистим пофарбуванням, але без глинистого заповнювача, що свідчить про середню якість масиву. Міцність алевроліту на стиск знаходиться у діапазоні 35 – 60 МПа.

За результатами комплексного аналізу, масив алевроліту відноситься до категорії В («шаруватий/блокуватий») з якістю поверхонь між «хорошою» та «середньою». Зазначене дозволяє оцінити показник GSI у діапазоні 50 – 55. Згідно зі встановленою кореляційною залежністю для алевроліту (верхня крива на графіку), такій якості масиву відповідає тріщинна пустотність до 6 – 7%.

Далі наводяться приклади визначення індексу геологічної міцності за результатом вивчення структури та геологічних особливостей кернових зразків, відібраних безпосередньо у зонах впливу геологічних порушень.

Керн відібрано при проведенні 9-го півд. «біс» конв. штрек блоку № 10 в районі ПК 40 у зоні впливу геологічного порушення амплітудою 0,7 м та кутом падіння зміщувача 30°. Свердловина довжиною 5,0 м, вихід керна становив 4,65 м (93%), що свідчить про задовільну збереженість зразка. Порода – світло-сірий дрібнозернистий пісковик на глинистому цементі, місцями карбонатизований. Структура масиву сильно блокувата та порушена: керн розпався на 56 фрагментів, що становить в середньому 10 – 12 кусків на 1 погонний метр, з довжиною уламків від 0,04 до 0,28 м. Тріщини різноспрямовані, їхні поверхні шорсткі, хвилясті, зі слідами окислення та

місцями з тонким глинистим заповнювачем, що вказує на зниження міцності контактів між блоками. За діаграмою Хюека, структура масиву, що характеризується великою кількістю блоків, відповідає категорії D («дуже блокуватий»). Якість поверхонь розривів, враховуючи їх хвилястість, окислення та наявність глинистого заповнювача, оцінюється на межі між «середньою» та «поганою». Перетин цих характеристик впевнено визначає індекс геологічної міцності $GSI \approx 40$, що характеризує масив як такий, що має порушену структуру та середню стійкість. Розрахунок середньої тріщинної пустотності показує, що її значення складає близько 2,8%.

Керн відібрано з покрівлі біля борту виробки при проведенні 4 півд. конв. штреку блоку № 7 у районі ПК 155 у зоні впливу геологічного порушення, утвореного з двох площин скидів, що сходяться під кутами 35 і 40° та амплітудою зміщення вугільного пласта 0,55 – 0,75 м. Довжина свердловини – 5,0 м, низький вихід керна – 4,15 м (83%) – вказує на значну порушеність масиву. Порода – сірий пісковик, слюдистий, на глинистому цементі, слабозцементований, дезінтегрований та легко розсипається. Керн розділився на 88 фрагментів, що становить в середньому приблизно 18 кусків на 1 погонний метр та свідчить про інтенсивну тріщинуватість і хаотичну структуру. Тріщини переважно субвертикальні, широко розкриті (до 2,5 см), їхні поверхні шорсткі, з ознаками вивітрювання. За діаграмою Хюека, структура масиву є роздробленою та хаотичною, відповідає категорії F (інтенсивно-деформована). Якість поверхонь, враховуючи їх шорсткість, вивітрювання та значне розкриття, класифікується як «погана». Перетин цих двох показників на діаграмі дає значення $GSI \approx 20$, що дозволяє ідентифікувати масив як структурно ослаблений, з низькою несучою здатністю та високою схильністю до вивалів. Розрахована структурна деградація пісковика відповідає тріщинній пустотності 4,8%.

Керн відібрано при проведенні 6 конв. штреку лави південної панелі блоку № 10 біля покрівлі виробки в районі ПК 221 у зоні впливу скиду з амплітудою 0,5 м та кутом падіння 50°. Вихід керна становить 91%. Порода представлена алевролітом темно-сірим, слюдистим, з горизонтально-смугастою текстурою,

що обумовлена тонкими прошарками вуглефікованої флори. Структура масиву сильно блокувата, порушена, що підтверджується розпадом керна на 65 окремих фрагментів, тобто в середньому 12 – 14 кусків на погонний метр. Довжина уламків варіюється від 0,03 до 0,22 м. Тріщини різноспрямовані, з розкриттям до 1,5 см. Поверхні розривів шорсткі, слабо хвилясті, зі слідами окислення та місцями з тонкими примазками глинисто-вуглистою матеріалу, що свідчить про знижену міцність контактів між блоками. За діаграмою Хоека, структура масиву, що характеризується великою кількістю дрібних блоків, відповідає категорії D («дуже блокуватий»). Якість поверхонь, враховуючи їх шорсткість та наявність слабого заповнювача (примазок), оцінюється як «середня». Перетин цих характеристик визначає індекс геологічної міцності $GSI \approx 35$, що характеризує масив як структурно ослаблений та такий, що потребує уваги при виборі заходів кріплення. Розрахована тріщинна пустотність масиву складає 11,5%.

Керн відібрано при проведенні 2 півн конв. штреку лави центр. панелі блоку № 11 зі стінки виробки у зоні геологічного порушення з амплітудою 0,4 – 0,5 м та кутом падіння 35° . Фіксувався низький вихід керна – 78%, що вказує на значну порушеність. Порода – алевроліт темно-сірий, нестійкий, крихкий, дезінтегрований. Керн представлений сумішшю дрібних уламків та щебню з рідкими цілими фрагментами довжиною не більше 0,1 м. Структура масиву хаотична, роздрібнена, що унеможлиблює точний підрахунок кількості тріщин на метр. Поверхні розривів, що вдалося ідентифікувати, нерівні, хвилясті, покриті липкою глинистою плівкою (глинкою тертя). За діаграмою Хоека, така хаотична, роздроблена структура відповідає категорії F/G («інтенсивно-деформована/хаотична»), а якість поверхонь тріщин з наявністю глинистого матеріалу є «поганою». Перетин цих показників дає $GSI \approx 20$, що характеризує масив як вкрай нестійкий, з дуже низькою несучою здатністю.

Через дезінтеграцію структури було проведено вагове визначення частки роздрібненого матеріалу. Розрахунок загальної пустотності за різницею маси і щільності дозволив врахувати не тільки тріщинну, але й міжфракційну пустотність, а сукупна пустотність склала 16,5%.

Аналогічним чином, разом з геологічною службою шахти, узагальнено та систематизовано інформацію щодо структурних особливостей інших кернових проб. Загалом проаналізовано 30 кернів пісковика і 28 алевроліту, відібраних з покрівлі як у природному масиві поза впливом геологічних порушень, так і у зонах впливу цих порушень, після чого для кожного зразка визначено GSI та показники тріщинної пустотності. Результати аналізу засвідчили закономірне погіршення структурної цілісності (зростання кускуватості, ширини та заповненості тріщин, збільшення частки роздрібненої фракції, локальне підвищення сумарної пустотності) у безпосередній зоні впливу геологічних порушень порівняно з фоновими природними умовами стану порід без впливу геологічних порушень за даними розвідувальних свердловин по довжині виїмкових стовпів.

При цьому стійкої функціональної кореляції величини GSI саме з амплітудою та кутом падіння зміщувача встановити не вдалося через значну кількість впливових факторів, а саме комплексний характер формування самої зони тектонічного порушення. Індекс GSI є інтегральною характеристикою, що залежить не стільки від геометричних параметрів (амплітуди, кута), скільки від внутрішньої структури зони порушення, зокрема її фактичної потужності, інтенсивності вторинної тріщинуватості, а також наявності та складу заповнювача, такого як глина тертя або тектонічна брекчія. Важливе значення відіграє і літологічний склад порід, оскільки різні типи порід (наприклад, крихкий пісковик та пластичний алевроліт) по-різному реагують на однакові тектонічні навантаження, демонструючи різний ступінь дезінтеграції.

На основі обробки значного масиву геологічних даних встановлені залежності взаємозв'язку індексу геологічної міцності різних літотипів порід з величиною їх тріщинної та міжфракційної пустотності у зонах впливу геологічних порушень, що ілюструються на рисунку 3.4. Аналіз результатів дозволив виявити залежність сумарної (тріщинної та міжфракційної) пустотності від індексу геологічної міцності GSI для обох літологічних типів порід, яка найкраще апроксимується експоненційною функцією з високим коефіцієнтом детермінації.

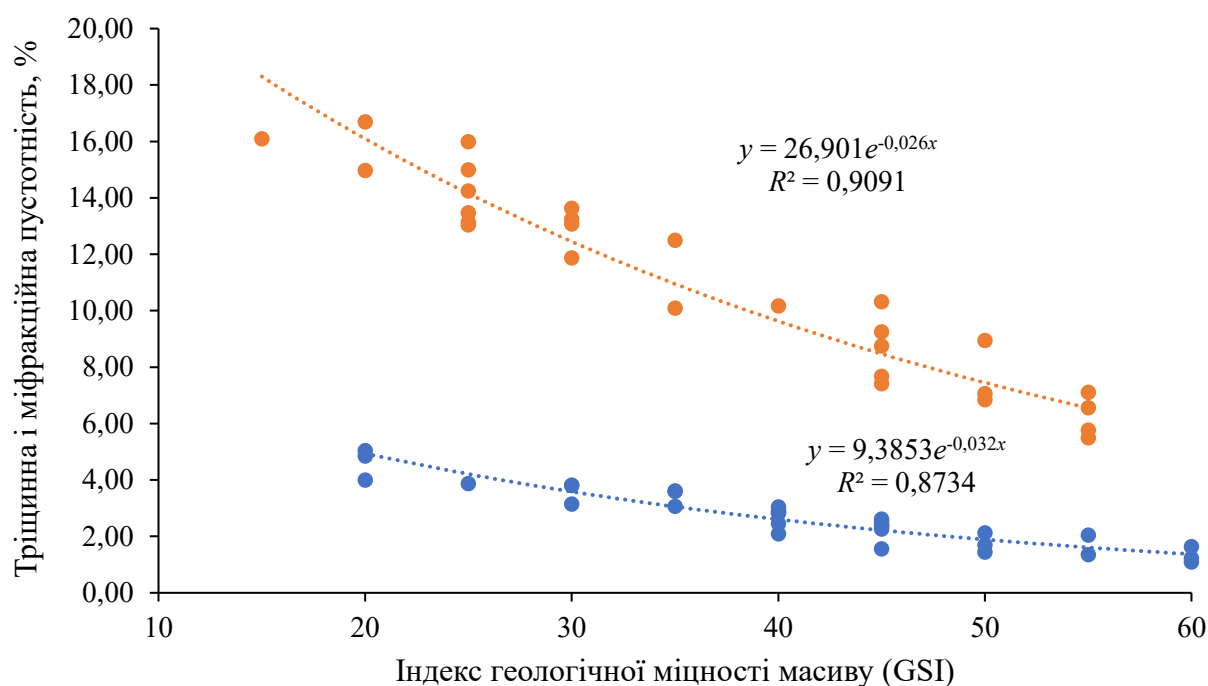


Рисунок 3.4 – Залежності зміни сукупної (тріщинної та міжфракційної) пустотності масиву залежно від індексу геологічної міцності масиву GSI

Для пісковика (нижня крива на графіку) встановлено, що навіть при значному зниженні GSI до 20, що відповідає сильно порушеним породам, його пустотність зростає лише до 4 – 5%, що підтверджує відносно блочну структуру руйнування та обмежене розуцільнення. При цьому алевроліт (верхня крива) демонструє значно інтенсивніше зростання пустотності при погіршенні якості масиву: при $GSI = 20$ пустотність алевроліту сягає 16 – 18%, тоді як у природному стані ($GSI = 50 - 55$) складає близько 5 – 7%. Така висока пустотність є наслідком сукупності тріщинних і міжфракційних пор, що утворюються через дезінтеграцію та схильність алевроліту до крихкого руйнування з утворенням дрібних фракцій. Встановлена кількісна різниця у структурній деградації цих порід дозволяє не тільки диференційовано підходити до оцінки стану масиву залежно від літології, але є основою для обґрунтування раціонального об'єму нагнітання поліуретанових смол.

Встановлені залежності далі будуть використані як вихідні дані для уточнення показника GSI у геомеханічних моделях та для проєктування параметрів ін'єкційного зміцнення.

3.3 Лабораторні дослідження міцнісних властивостей

консолідованих поліуретановою смолою зразків шахтних порід

В результаті проведення досліджень щодо ущільнення фракцій порід за допомогою вібраційного аналізатора отримано 5 рівнів міжфракційної пустотності, прийнятих як основа для лабораторних експериментів. Отримані значення охоплюють весь діапазон станів матеріалу від максимально розпушеного (варіант 5), що відповідає вільному засипанню, до максимально щільного (варіант 1), досягнутого в результаті інтенсивного віброущільнення на лабораторній установці (табл. 3.2). Варіювання рівнів пустотності досягалося шляхом зміни тривалості вібраційного впливу, що дозволило створити серії зразків для подальшого зміцнення смолою та встановлення залежності їх характеристик міцності від початкової пустотності.

Таблиця 3.2 – Рівні варіювання пустотності за даними вібраційного ущільнення у лабораторних умовах

Варіанти варіювання пустотності	Алевроліт	Пісковик
1	22	26
2	28	31
3	34	36
4	39	41
5	43	45

Згідно попередніх розроблених методичних положень було розраховано, за даними отриманої міжфракційної пустотності, вагу компонентів як жорсткої породної фази, так і компонентів поліуретанової смоли, а саме, компоненту А (смола) і компоненту В (каталізатор).

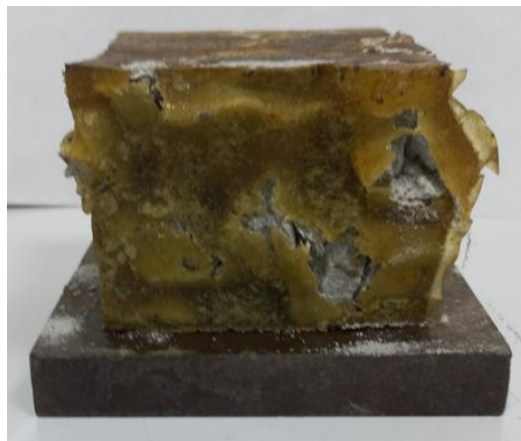
Експериментальні суміші, з яких виготовлялись кубічні зразки композитного матеріалу (порода + смола), а також витрати матеріалів наведено у таблиці 3.3. Випробування зразків скріплених фракцій порід поліуретановою смолою на стиск за допомогою лабораторного пресу дозволили встановити залежність їх міцнісних характеристик та модуля пружності від початкової міжфракційної пустотності, яка у скріпленому масиві відповідає об'ємному вмісту смоли (рис. 3.5).

Таблиця 3.3 – Компонентні склади фракцій порід різного літотипу, скріплених поліуретановою смолою

Пустотність, %	Тип породи	Розхід компонентів, г		Фракції порід, г
		Смола (компонент А)	Каталізатор (компонент Б)	
22	Алевроліт	20,8	23,2	709,0
28		26,4	29,5	654,4
34		32,1	35,9	599,9
39		36,8	41,1	554,0
43		40,6	45,4	517,1
26	Пісковик	24,5	27,4	710,7
31		29,2	32,7	664,8
36		34,0	38,0	618,9
41		38,7	43,2	572,9
45		42,4	47,5	535,6

За результатами проведених лабораторних та аналітичних досліджень визначено фізико-механічні властивості консолідованого смолою композитного матеріалу для алевроліту та пісковика [4]. Слід зазначити, що такі властивості як міцність на стиск та модуль пружності були встановлені прямим лабораторним шляхом. Інші важливі для моделювання за критерієм Мора-Кулона фізико-механічні властивості, зокрема міцність на розтяг, зчеплення, кут внутрішнього тертя та коефіцієнт Пуассона, були розраховані аналітичним методом.

(a)



(б)



Рисунок 3.5 – Ілюстрація в'язко-пластичного режиму деформування зразків фракцій порід, консолідованих полімерною смолою:

(а) пісковик; (б) алевроліт

Розрахунок базується на правилі сумішей за моделлю Фойгта, яка є фізично обґрунтованою для умов ізодеформації як припущення спільної роботи компонентів та адекватно описує сумарний внесок властивостей вихідної породи та полімерної матриці смоли. Визначений комплекс властивостей композитного масиву (порода + смола) з різними рівнями пустотності наведено у таблиці 3.4.

Слід зазначити, що згідно моделі Фойгта для визначення певної фізико-механічної властивості композиту потрібно знати властивість вихідної породи ($P_{пор}$) при різній її пустотності. Для цього було використано встановлену раніше емпіричну кореляційну залежність, яка пов'язує кожен рівень сумарної пустотності з відповідним значенням індексу геологічної міцності GSI.

Таблиця 3.4 – Фізико-механічні властивості композитного масиву (порода + смола)
за результатами лабораторних та аналітичних досліджень

Пустотність, %	Тип породи	Міцність на стиск, МПа	Міцність на розтяг, МПа*	Модуль пружності, МПа	Зчеплення (с), МПа*	Кут внутрішнього тертя (φ), °*	Коефіцієнт Пуассона (μ)*
0 – 7 (природній масив)	Алевроліт	50,0	5,0	5300	3,0	28,0	0,280
22		41,5	5,1	1380	5,5	21,84	0,284
28		32,0	6,4	650	6,2	20,16	0,286
34		23,0	7,8	420	6,9	18,48	0,287
39		15,5	8,4	310	7,5	17,08	0,288
43		13,0	8,9	250	8,0	15,96	0,289
0 – 3 (природній масив)	Пісковик	75,0	7,5	11000	5,0	34,0	0,250
26		62,0	7,7	1620	8,0	25,16	0,263
31		48,0	7,9	780	8,6	23,46	0,266
36		33,0	8,3	510	9,1	21,76	0,268
41		20,0	9,4	380	9,7	20,06	0,271
45		16,0	9,7	300	10,1	18,7	0,273

* дані, прийняті на основі існуючих аналогічних досліджень та аналітичних розрахунків

Таким чином, для кожного значення пустотності визначався відповідний індекс GSI, який, у свою чергу, використовувався як вхідний параметр у програмному комплексі RocLab. На основі даної програми, застосовуючи критерій міцності Хоска-Брауна, розраховувалися еквівалентні параметри міцності масиву за критерієм Мора-Кулона – зчеплення c та кут внутрішнього тертя φ . Саме ці розраховані значення і приймалися за шукані властивості початкової породи $P_{пор}$. Такий двоетапний підхід дозволив для будь-якого рівня пустотності отримати обґрунтовані вхідні дані для подальшого розрахунку властивостей кінцевого композиту за формулою правила сумішей.

На основі отриманих даних встановлено наукові залежності зміни цих властивостей від частки смоли у структурі зміцненого масиву. Результати експериментів для алевроліту та пісковика були оброблені та представлені графічно, що демонструється на рисунках 3.6 – 3.8.

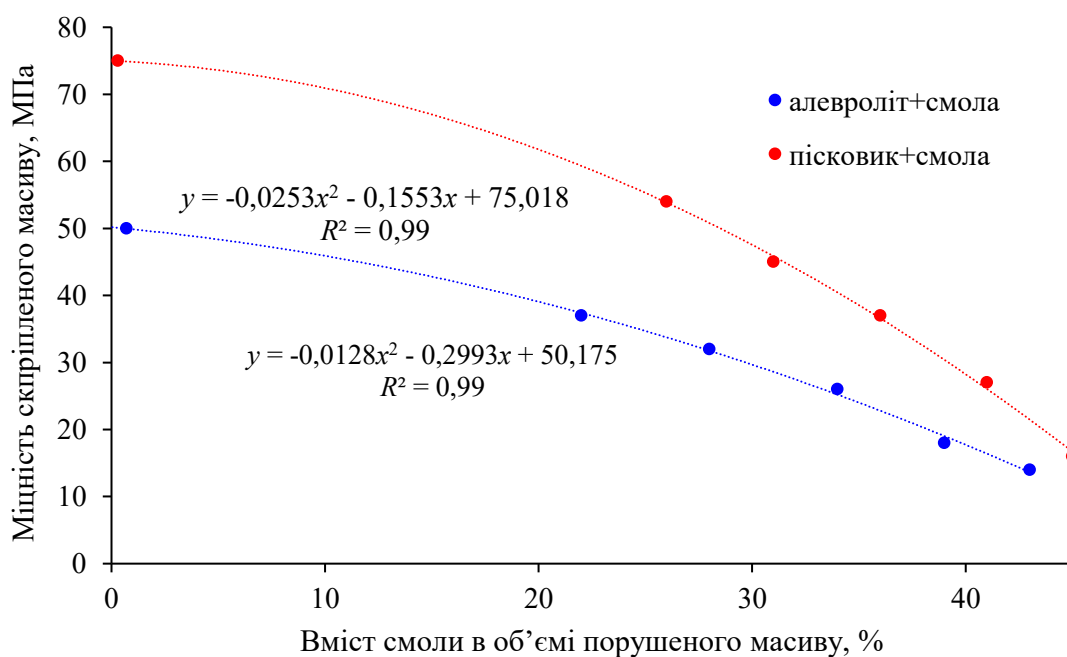


Рисунок 3.6 – Залежності міцності на стиск композитного матеріалу (порода + смола) залежно від вмісту поліуретанової смоли у системі

На підставі отриманих графіків (рис. 3.6) встановлено, що залежність міцності скріпленого масиву від об'ємного вмісту в ньому смоли (що

еквівалентно початковій пустотності) має виражений нелінійний, зворотний характер і з високим ступенем достовірності $R^2 = 0,99$ описується поліноміальною функцією другого порядку. Закономірність відображає кількісно-якісну зміну несучої структури композиту: від жорсткого кам'яного каркаса, що визначає високу міцність при малому вмісті смоли 5 – 5%, до податливої смоляної матриці, контролюючу низьку міцність при високому вмісті смоли 20 – 45%. Таким чином, отримані емпіричні залежності є надійним інструментом для інтерполяції та прогнозування несучої здатності зміцнених порід.

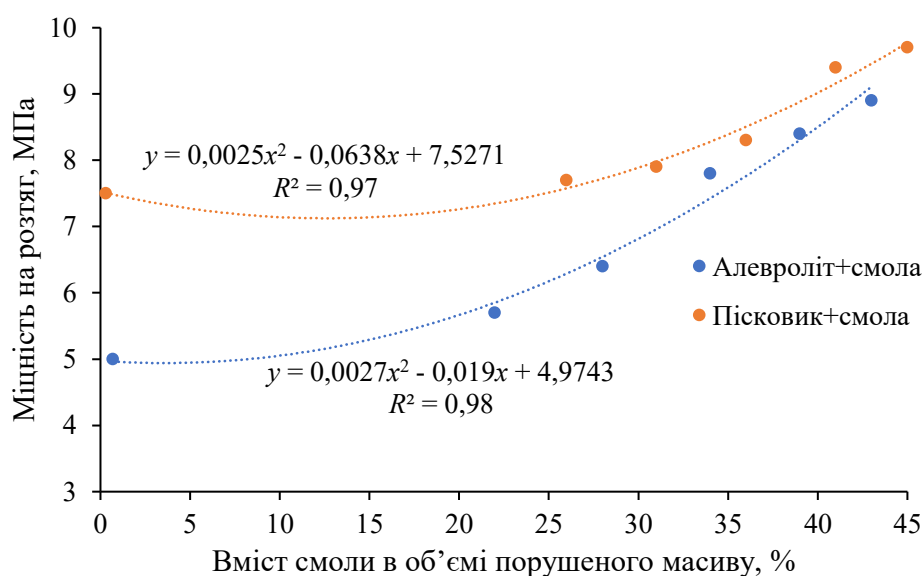


Рисунок 3.7 – Залежності прогнозованої міцності на розтяг композитного матеріалу (порода + смола) від вмісту поліуретанової смоли у системі

Аналіз рисунка 3.7 показує, що зі зростанням вмісту поліуретанової смоли у системі спостерігається чітка тенденція підвищення міцності композитного матеріалу на розтяг як на основі фракцій алевроліту, так і пісковика. Отримані залежності мають нелінійний характер із високим ступенем достовірності апроксимації ($R^2 = 0,97 - 0,98$), що свідчить про стабільний вплив смоли на зчеплення зерен породи та формування більш монолітної структури композиту. При збільшенні вмісту смоли від 5 до 45% відбувається суттєве зростання прогнозованої міцності, особливо інтенсивне у діапазоні понад 25%, де поліуретанова матриця починає відігравати домінуюче значення у передачі

напружень між частками породи. Характер залежностей вказує на підвищення ефективності армування мікропустот і покращення адгезійно-когезійних властивостей системи, що робить отримані залежності корисним інструментом для прогнозування міцності на розтяг зміцненого смолою масиву.

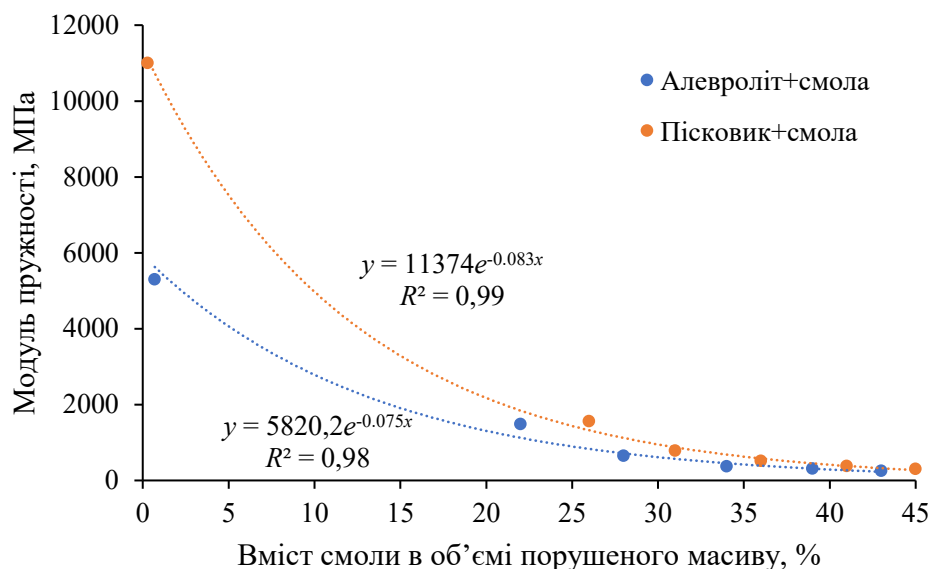


Рисунок 3.8 – Залежності модуля пружності композитного матеріалу (порода + смола) залежно від вмісту поліуретанової смоли у системі

Аналіз рисунка 3.8 показує, що залежність модуля пружності скріпленого масиву від об'ємного вмісту в ньому смоли (що еквівалентно початковій пустотності) має виражений нелінійний, зворотний характер і з високим ступенем достовірності ($R^2 > 0,98$) описується експоненційною функцією. Встановлена закономірність відображає кількісно-якісну зміну несучої структури композиту: від жорсткого кам'яного каркасу, який визначає високу жорсткість (модуль пружності) при малому вмісті смоли (5 – 15%), до податливої смоляної матриці, властивості якої починають домінувати при високому вмісті смоли (25 – 45%), коли початкова структура породи дезінтегрована. Таким чином, отримані в результаті проведених досліджень емпіричні залежності є надійним інструментом для прогнозування деформаційних властивостей зміцнених гірських порід.

Незважаючи на фундаментальну відмінність у морфології тріщинного та міжфракційного простору між реальним тріщинуватим масивом і лабораторним зразком із фракцій порід, слід розглядати даний експеримент як коректний метод фізичного аналогового моделювання. Попри відсутність реальної подібності, такий підхід зберігає фізико-хімічну сутність процесу, а саме зміцнення масиву за рахунок формування композитної матриці «порода – полімер». Основна наукова цінність експериментів полягає у встановленні кількісних емпіричних залежностей між початковою пустотністю системи та підсумковими характеристиками властивостей зміцненого матеріалу. Отримані експериментальним шляхом дані є єдиною фізичною основою для подальшого калібрування та верифікації параметрів у чисельній геомеханічній моделі, яка дозволяє перейти від якісних припущень до розрахунку, що базується на реальних властивостях.

Отримані дані фізико-механічних характеристик консолідованого поліуретановою смолою масиву використовуються як вихідні параметри у чисельному моделюванні геомеханічного стану приконтурного масиву при його ін'єкційному закріпленні при проведенні штреку та далі на сполученні «лава – штрек», що знаходяться в зоні впливу геологічних порушень.

Суттєвою перевагою консолідації тріщинуватого або вже знеміцненого масиву гірських порід полімерними смолами є відсутність втрати суцільності в режимі деформування. Якщо при одноосьовому навантаженні на зразок міцної гірської породи відбувається крихке руйнування, то консолідований полімерною смолою масив деформується у в'язко-пластичному режимі. Зі зростанням пустот тріщинуватості та збільшенні об'єму смоли, що нагнітається, характер в'язко-пластичного деформування буде яскравіше проявлятися. Проведений експеримент та випробування дозволяють стверджувати, що скріплення масиву фракцій порід поліуретановою смолою істотно впливає на режим деформування (рис. 3.9, 3.10). Подібний режим зафіксований також іншими вченими у процесі лабораторних досліджень з визначення механічних властивостей консолідованого смолами масиву [5-7].

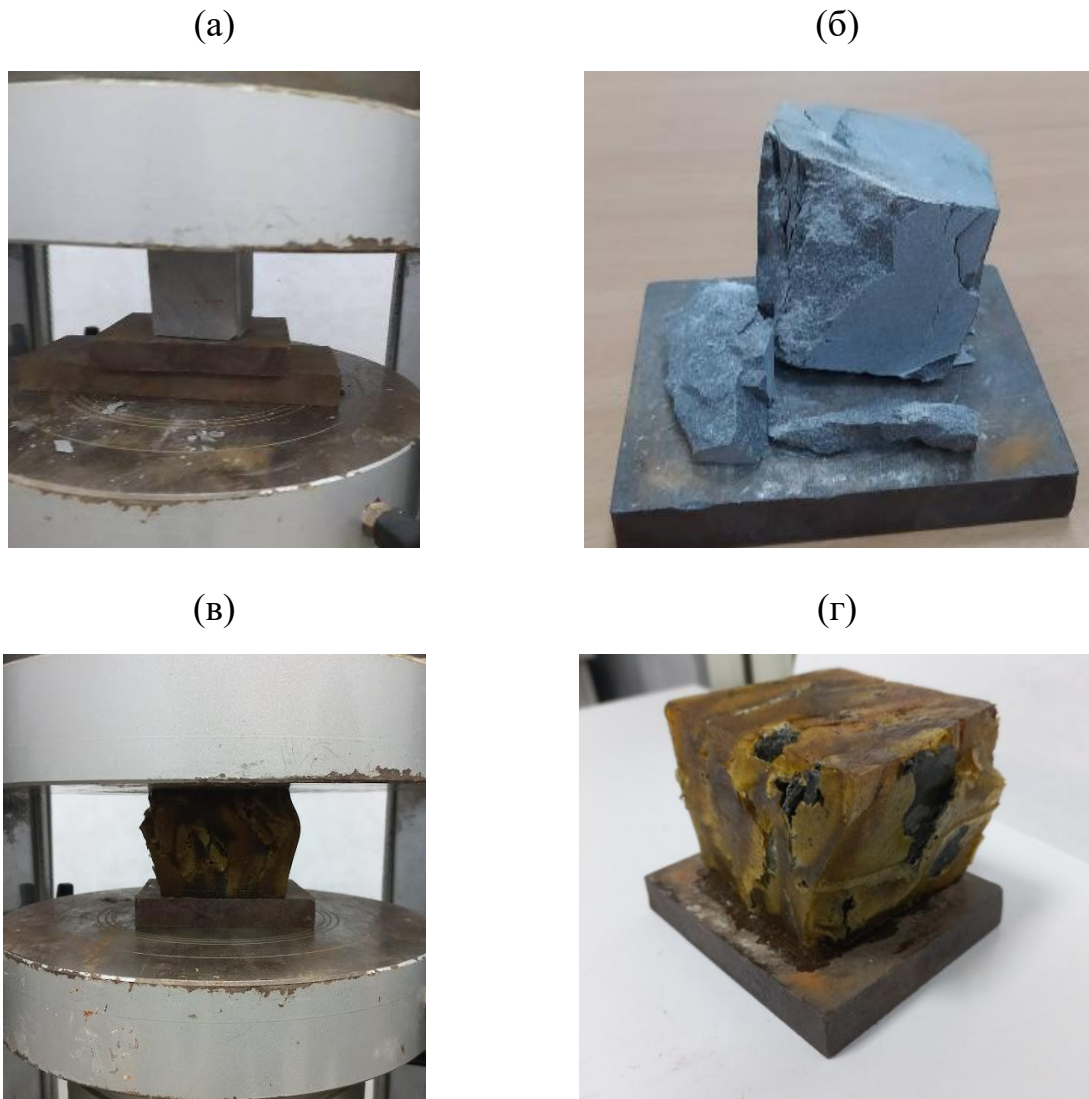


Рисунок 3.9 – Деформування зразків гірської породи та композитного масиву: (а) пісковик; (б) алевроліт + смола

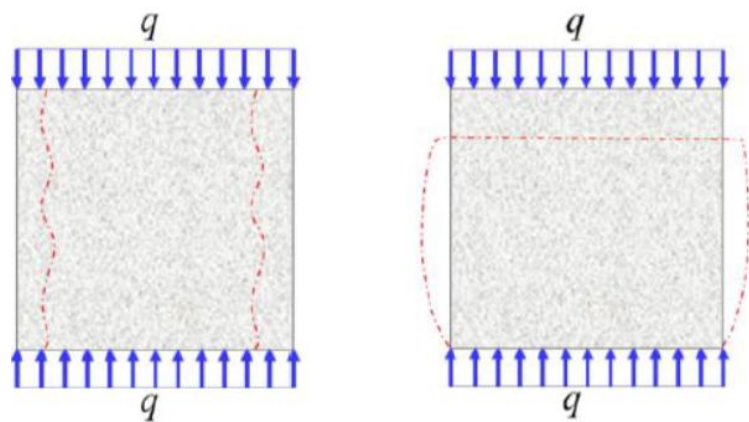


Рисунок 3.10 – Схематичне зображення процес руйнування зразків чистої гірської породи та композитного масиву: (а) крихке руйнування; (б) в'язко-пластичне руйнування

Наведені ілюстрації якісної характеристики деформаційних властивостей та результати випробувань (рис. 3.9, 3.10) дозволили зробити висновки про зміну характеру руйнування масиву, консолідованого поліуретановою смолою. Встановлено, що введення поліуретанової смоли у пустотний простір змінює режим деформування гірських порід, переводячи його з крихкого стану, характерного для природного масиву, у в'язко-пластичний. Зафіксована зміна наочно підтверджується характером руйнування лабораторних зразків: якщо природний пісковик при стиску зазнає крихкого руйнування з утворенням чітких поверхонь сколювання, то консолідований смолою зразок демонструє значні пластичні деформації з боковим розширенням, зберігаючи при цьому цілісність та залишкову несучу здатність. Виявлено, що такий перехід є наслідком покращення деформаційної здатності масиву, що, в свою чергу, зумовлено зростанням параметрів міцності, а саме міцності на розтяг та зчеплення, які забезпечує полімерна матриця.

Встановлена зміна режиму деформування свідчить про важливий факт: у чисельному моделюванні геомеханічних процесів при додаванні закріпленої смолою зони приконтурного масиву відтворення саме в'язко-пластичної поведінки масиву досягається шляхом прийняття пікових значень параметрів міцності рівними їх залишковим значенням, що є фізично та фундаментально адекватним рішенням. Так, при консолідації масиву гірських порід полімерними смолами в натурних умовах відбувається перехід від крихкого їх руйнування до в'язкого, що значно покращує несучу здатність масиву в цілому на стадії післяпікового навантаження, запобігає крихкій нестабільності та обваленню. Основна причина полягає в тому, що сила зчеплення, створювана взаємодією полімерної матриці з породами, запобігає розповсюдженню тріщини та перешкоджає її розкриттю.

Піддатливий режим роботи масиву гірських порід, зміцненого нагнітанням полімерних смол, означає здатність породної маси гнучко підлаштовуватися під умови навантаження, що змінюються, особливо на сполученні лави та виїмкового штреку. При такому режимі роботи зміцненого

масиву відбувається поступове розкриття тріщин та утворення нових, дрібніших, що дозволяє зміцненому масиву краще деформуватися без крихкого руйнування. На сполученні «лава – виїмковий штрек» це особливо важливо, оскільки в цьому місці навантаження можуть значно змінюватися залежно від того, наскільки інтенсивно відбувається видобування вугілля. Завдяки податливому режиму роботи масиву зміцнені гірські породи можуть ефективно компенсувати зміни навантаження, що допомагає запобігти обваленням та забезпечити безпеку робіт.

Враховуючи необхідність підвищення стійкості масиву та безпеки виконання гірничих робіт, застосування ін'єкційного закріплення поліуретановими смолами тріщинуватого, низько стійкого масиву гірських порід доцільно здійснювати саме на стадії виконання прохідницьких робіт, коли формуються першопричини вивалів з покрівлі та боків виїмкових виробок. Для попередження вивалів порід, підвищення стійкості й цілісності виїмкової виробки при її проведенні доцільно застосувати випереджальне ін'єкційне зміцнення порід поліуретановими смолами, що дозволить у майбутньому досягти безаварійної експлуатації сполучень «лава – штрек» при виконанні очисних робіт.

При ін'єкційному закріпленні поліуретановими смолами масиву гірських порід при проведенні виїмкових виробок створюються сприятливі умови при майбутньому веденні очисних робіт у підготовленому виїмковому стовпі. При посуванні очисного вибою на сполученні «лава – виїмковий штрек» у небезпечних зонах вивалів масив гірських порід буде знаходитись у в'язко-пластичному стані, що в режимі його деформування збереже цілісність та попередить вивали знеміцнених порід покрівлі. Попереднє ін'єкційне закріплення масиву гірських порід поліуретановими смолами на стадії прохідницьких робіт є ефективним заходом досягнення безаварійності та безпеки при виконанні технологічних процесів прохідницькими та видобувними бригадами.

3.4 Еволюція геомеханічного стану тріщинуватого приконтурного масиву при змінному значенні індексу геологічної міцності GSI

Згідно розробленої методики, імітація входу прохідницького вибою виїмкового штреку в зону впливу геологічного порушення у чисельному моделюванні виконувалась шляхом поступового зменшення індексу GSI при його значеннях 50, 40, 30 і 20 та оцінювались переміщення й деформації масиву з фіксацією критичного порогового показника GSI, коли зміщення контуру виробки стають критичними і призводять до руйнування рамного кріплення та безпосередньо вивалоутворення. Глибина розташування виїмкової виробки складає 950 м, що є середнім значенням для умов розробки запасів блоків № 10 і 11.

В результаті виконання серії розрахунків шляхом чисельного моделювання отримано епюри переміщень та пластичних деформацій з різним варіюванням GSI, що наведено на рисунках. Отримані епюри сумарних переміщень і зон пластичних деформацій приконтурного масиву виїмкового штреку за умов природної фонові геологічної міцності масиву ($GSI = 50$) свідчать про відносно стабільний стан виробки (рис. 3.11). За шкалою епюри переміщень (рис. 3.11a), максимальні значення горизонтальних зміщень спостерігаються у прилягаючих до контурів штреку зонах бічних бортів і покрівлі виробки та досягають 0,17 – 0,18 м.

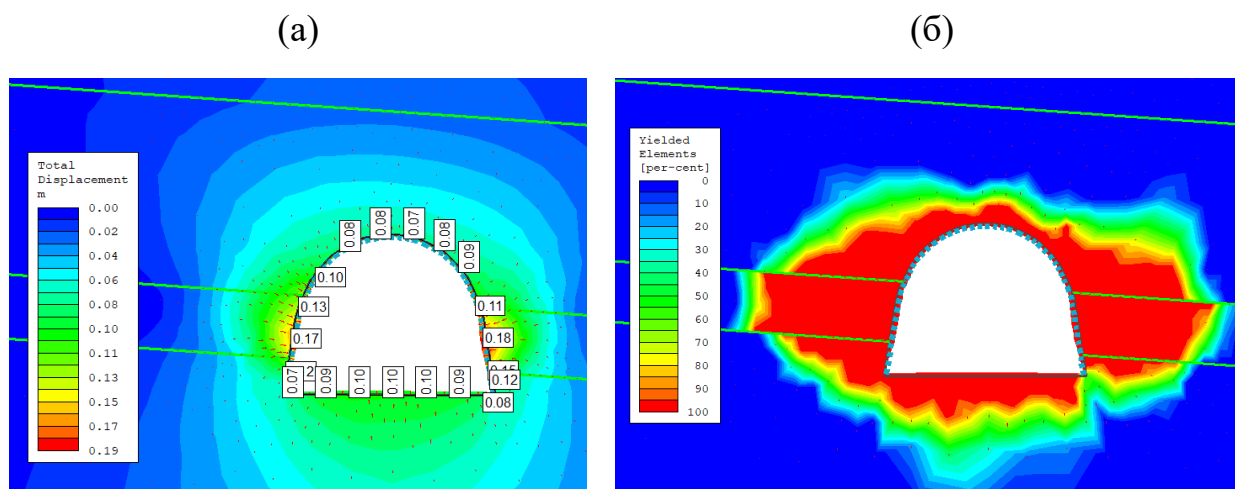


Рисунок 3.11 – Епюри загальних переміщень (а) та розвитку пластичних деформацій (б) приконтурного масиву при $GSI = 50$

У нижній частині – підшві та нижній частині бортів – переміщення знижуються до 0,08 – 0,10 м, що вказує на певну симетрію деформованого стану та розвантаження нижньої частини. Переважна частина переміщень локалізована в зоні 0,08 – 0,13 м, що відповідає пружно-пластичній поведінці порід зі збереженням несучої здатності та без перевищення граничної деформації кріплення. Таким чином, при $GSI = 50$ контур виробки зберігає стійкість, деформаційні зони не виходять за межі допустимих.

Аналіз епюри пластичних деформацій (рис. 3.11б) підтверджує зазначене: зони повного руйнування гірських порід з інтенсивністю 90 – 100% (червона зона) концентруються лише у вузьких смугах вздовж осі виїмкового штреку по горизонталі, переважно у бортових частинах масиву. Зазначені зони не поширюються на значну товщу масиву, а перехідна зона (зелена й жовта) з частковим пластичним розущільненням обмежена товщею 2,0 – 3,5 м від контуру виробки. В цілому, радіус активної деформаційної зони не перевищує 4 – 5 м, що для глибини 950 м є ознакою фонові стійкості. Ступінь пластичного розвантаження не викликає небезпеки вивалоутворення, а напружено-деформований стан приконтурного масиву характеризується стабілізованим характером. Отже, при $GSI = 50$ виробка залишається у стійкому стані без необхідності додаткового зміцнення або підсилення рамного кріплення, що є важливою контрольною точкою для оцінки деградації масиву при зниженні GSI в зоні впливу геологічних порушень.

Згідно з результатами моделювання, для випадку зниження якості масиву до $GSI = 40$, отримано епюри, що свідчать про перехід системи «масив – кріплення» у стан, який характеризується втратою несучої здатності приконтурних порід та розвитком порівняно більших деформацій. Якісний і кількісний аналіз цих результатів дозволяє зробити вичерпні висновки. Фіксуються на порядок більші значення зміщень контуру виїмкової виробки (рис. 3.12а). Кількісний аналіз епюри повних переміщень показує, що максимальні деформації мають асиметричний характер. Конвергенція боків штреку є домінуючим процесом і сягає максимальних значень 0,44 м у лівому та 0,48 м у правому боках.

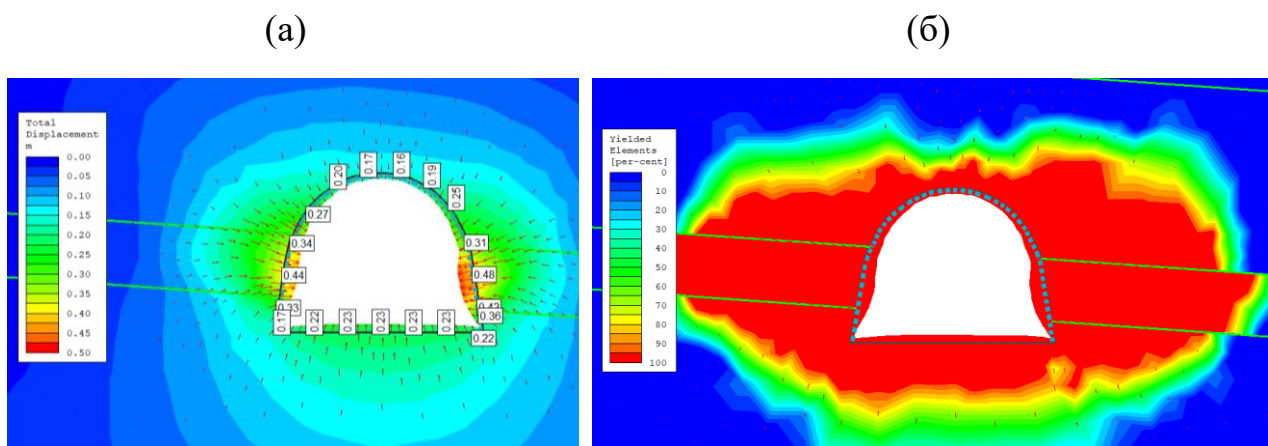


Рисунок 3.12 – Епюри загальних переміщень (а) та розвитку пластичних деформацій (б) приконтурного масиву при $GSI = 40$

Зазначена бокова конвергенція значно перевищує як осідання покрівлі, що становить 0,16 – 0,25 м, так і підняття підосви (до 0,23 м). Особливо показовим є порівняння з результатами для $GSI = 50$ (де максимальні зміщення становили 0,18 м): зниження індексу міцності всього на 10 одиниць призвело до зростання максимальних зміщень майже у 2,5 – 2,7 рази і свідчить про нелінійний, лавиноподібний характер процесу руйнування.

Епюра пластичних деформацій (рис. 3.12б) демонструє формування у приконтурному масиві навколо виробки суцільної та більшої зони пластичності (або зони знеміцнення) як у покрівлі, так і в її боках. Зазначена зона повністю охоплює весь контур виробки та поширюється вглиб масиву на суттєву відстань, що в 1,0 – 1,5 рази перевищує її поперечні розміри. З геомеханічної точки зору це означає, що приконтурний масив повністю втратив свою структурну цілісність і здатність нести навантаження в пружній стадії, перейшовши у стан поступового пластичного руйнування. Формування такої «арки» знеміцнення порід майже унеможливує утворення стійкого опорного склепіння, яке б могло перерозподіляти гірський тиск навколо виїмкової виробки.

Отже, можна констатувати, що при $GSI = 40$ виробка переходить у стан граничної рівноваги, де приконтурний масив значною мірою втратив власну несучу здатність, і основне навантаження перейшло на рамне кріплення. Зафіксовані в моделі деформації, що сягають 0,44 – 0,48 м, практично досягають

критичної межі податливості застосованого кріплення КШПУ, яка становить 500 мм, проте виробка ще зберігається в експлуатаційному стані.

Геомеханічна ситуація стану приконтурного масиву кардинально погіршується при перетинанні геологічного порушення прохідницьким вибоєм, де структурна порушеність масиву висока, а GSI сягає 30 (рис. 3.13).

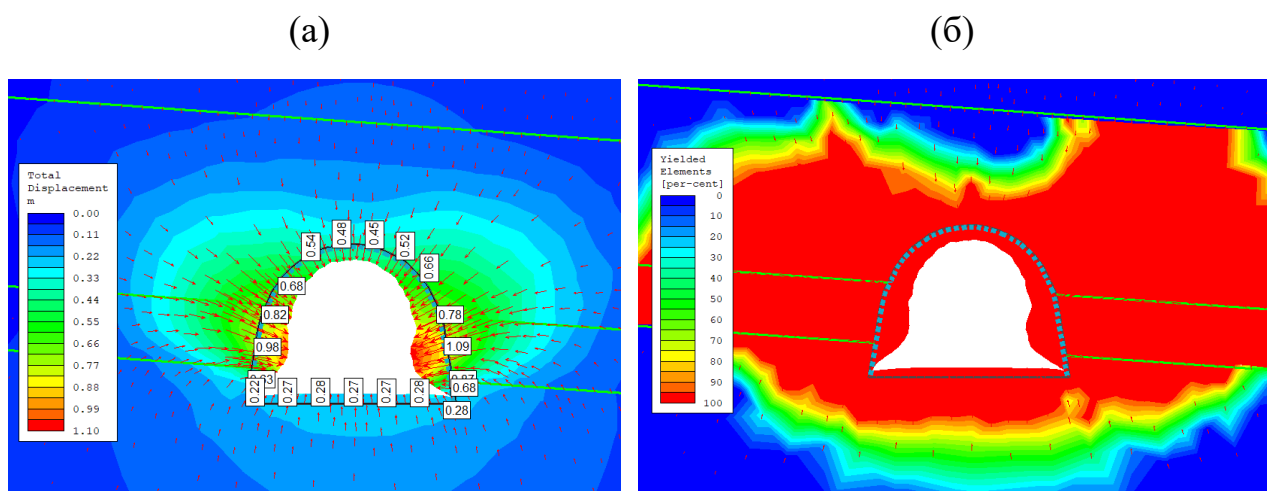


Рисунок 3.13 – Епюри загальних переміщень (а) та розвитку пластичних деформацій (б) приконтурного масиву при GSI = 30

Згідно з результатами чисельного моделювання для випадку подальшого зниження якості масиву до $GSI = 30$, встановлено сценарій активного прогресуючого руйнування та повної втрати стійкості виробки, що призводить до критичних за величиною зміщень контуру (рис. 3.13а), які є несумісними з експлуатацією виробки. Кількісно, максимальна конвергенція боків сягає 0,98 – 1,09 м, осідання покрівлі становить 0,15 – 0,66 м, а підняття підосви – 0,22 – 0,28 м. Такі величини деформацій значно перевищують межі податливості будь-якого стандартного кріплення і свідчать про формування вивалів боків та покрівлі виробки у процесі поступового деформування приконтурного масиву. Моделювання при $GSI = 30$ наочно демонструє кінцеву стадію руйнування, що настає після проходження критичного порогу стійкості. Аналіз епюри (рис. 3.13б) свідчить про те, що зона пластичних деформацій набуває

необмеженого характеру, поширюючись далеко вглиб масиву і вказуючи на неможливість формування будь-якої стійкої опорної структури навколо виробки.

Порівнюючи результати моделювання при $GSI = 40$ (стан граничної рівноваги з деформаціями до 0,5 м) та $GSI = 30$ (стан повного руйнування з деформаціями понад 1,0 м), можна зробити науковий обґрунтований висновок, що пороговим значенням для повного руйнування системи «масив – кріплення» та переходу до прогресуючих вивалів є показник $GSI \approx 35$. Тобто, експлуатація виробки в умовах $GSI \leq 35$ є вкрай небезпечною, оскільки система знаходиться на межі стійкості без будь-якого запасу міцності, що доводить абсолютну необхідність застосування випереджувального ін'єкційного зміцнення.

Розвиток катастрофічної геомеханічної ситуації стану приконтурного масиву спостерігається при перетинанні геологічного порушення прохідницьким вибоєм, де структурна порушеність масиву надто висока, а GSI сягає 20 (рис. 3.14).

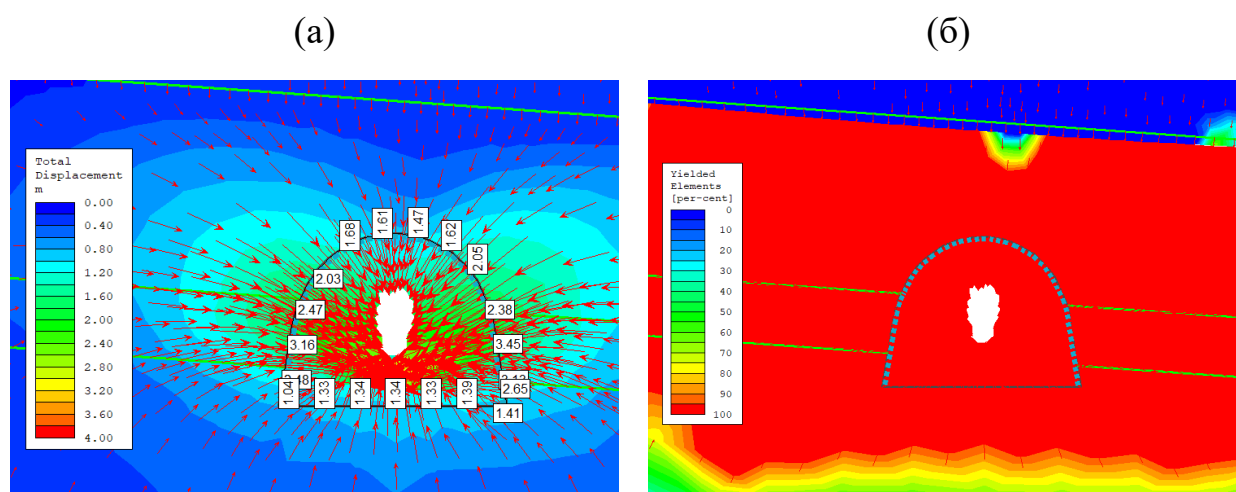


Рисунок 3.14 – Епюри загальних переміщень (а) та розвитку пластичних деформацій (б) приконтурного масиву при $GSI = 20$

В результаті моделювання геомеханічного стану приконтурного масиву для умов вкрай слабких порід із $GSI = 20$, отримано епюри, що демонструють сценарій повної втрати стійкості та неконтрольованого руйнування виробки. Наслідком такого тотального руйнування є катастрофічні за величиною зміщення контуру (рис. 3.14а), що призводять до фактичного завалення

виїмкової виробки. Кількісний аналіз показує, що конвергенція боків сягає 2,47 – 3,45 м, осідання покрівлі – 1,47 – 1,68 м, а підняття підосви – понад 1,3 м. Слід зазначити, що такий стан відображає лише кінцевий процес динамічного руйнування приконтурного масиву. Процес обвалення, зазвичай, не відбувається миттєво. Зафіксований рівень деформацій та повна втрата несучої здатності масиву є неминучими і з плином часу призведуть до повного задавлювання виробки за рахунок процесів повзучості та подальшого видавлювання порід.

Аналіз епюри пластичних деформацій (рис. 3.14б) показує формування практично необмеженої зони суцільного руйнування, яка поширюється на всю область моделювання масиву, що свідчить про те, що він повністю втрачає свою несучу здатність і поводить себе зрештою як сипуче середовище, нездатне сформувати будь-яку стійку структуру навколо виїмкової виробки.

Результати підтверджують, що раніше встановлений поріг стійкості ($GSI \approx 35$) є коректним, оскільки будь-яке подальше погіршення якості масиву призводить до повного його руйнування. Проведення виїмкової виробки у таких умовах є неможливим без попереднього створення потужного штучного склепіння, що доводить абсолютну необхідність застосування випереджувального ін'єкційного зміцнення порід.

За результатами чисельного моделювання встановлено закономірності розвитку деформаційних процесів у приконтурному масиві штреку залежно від якості порід, а саме показника GSI , що ілюструються на рисунку 3.15. Аналіз графіків показує, що зростання величини максимальних зміщень покрівлі, боків та підосви при зниженні індексу GSI найкраще апроксимується оберненими степеневими залежностями з високим ступенем достовірності ($R^2 > 0,98$). Встановлений зв'язок має яскраво виражений нелінійний характер: при погіршенні якості масиву (зниженні GSI) відбувається прогресуюче наростання деформацій. Аналіз кривих дозволив чітко ідентифікувати критичне порогове значення $GSI \approx 35$, оскільки саме при цьому та нижчих значеннях індексу розрахункові зміщення контуру виробки починають перевищувати межу податливості стандартного кріплення.

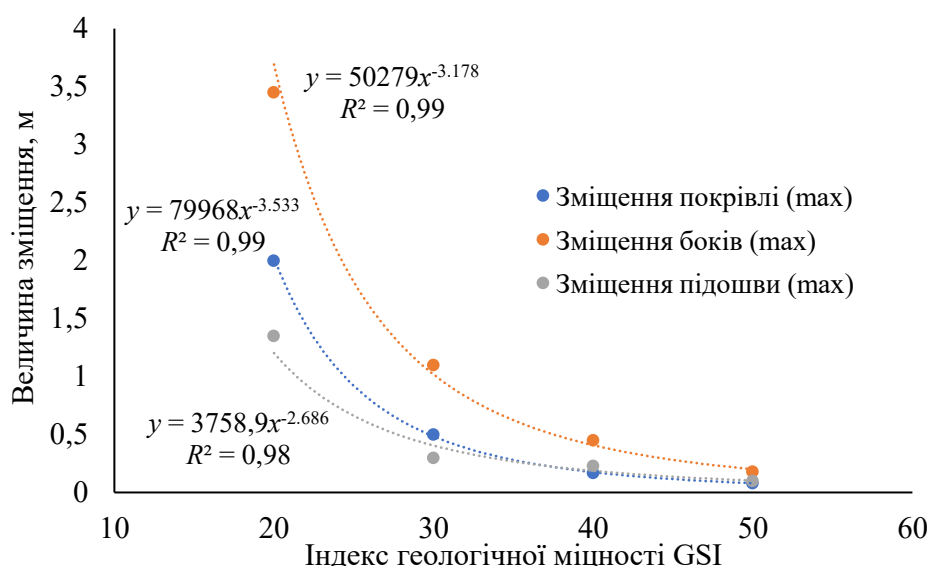


Рисунок 3.15 – Залежність зміни величини зміщень приконтурного масиву від показника індексу геологічної міцності

На підставі виконаних чисельних досліджень геомеханічного стану приконтурного масиву виїмкового штреку з різним значенням його індексу геологічної міцності GSI встановлено, що при імітації входження виїмкового штреку в зону геологічного порушення, що моделюється поступовим зниженням GSI від 50 до 20, відбувається закономірна еволюція напружено-деформованого стану навколишнього масиву, що полягає у переході від стану локального послаблення порід навколо виробки до критичного руйнування її покрівлі та боків. За результатами чисельного моделювання визначено, що критичним порогом, який ініціює інтенсивний розвиток зон пластичних деформацій та значне зростання зміщень контуру, є значення $GSI \leq 35$, яке слід вважати індикатором необхідності своєчасного застосування запобіжних заходів.

Враховуючи, що здебільшого вивалоутворення порід після проходження прохідницьким вибоєм зони геологічного порушення має не раптовий, а стадійний режим розвитку деформацій, який продовжується протягом певного часу, з'являється можливість застосувати випереджувальне ін'єкційне зміцнення масиву поліуретановими смолами для забезпечення стійкості контуру штреку в зоні впливу порушення для забезпечення сприятливих геомеханічних умов надалі, а саме при підході вже фронту очисних робіт [8, 9].

3.5 Дослідження геомеханічної ефективності ін'єкційного зміцнення приконтурного масиву поліуретановою смолою

Оскільки за результатами чисельного моделювання визначено, що критичним порогом, який ініціює інтенсивний розвиток зон пластичних деформацій та значне зростання зміщень контуру, є значення $GSI \leq 35$, яке слід вважати індикатором необхідності своєчасного застосування запобіжних заходів, було проведено порівняльну оцінку геомеханічної ефективності ін'єкційного закріплення порід покрівлі виїмкового штреку поліуретановою смолою при різній ширині зони ін'єктування 2,5; 3,5 і 4,5 м у критичних умовах порушеного масиву. У п. 3.3 досліджено геомеханічний стан приконтурного масиву за відсутності ін'єкційного закріплення навколо виробки (ширина 0 м), де формуються масштабні зони пластичних деформацій, що свідчить про повну втрату стійкості. Для масиву гірських порід встановлено критичне значення індексу геологічної міцності $GSI = 35$, при якому прогнозна сукупна (тріщинна та міжфракційна) пустотність складає 12%. Для цього стану визначені розрахункові властивості масиву після його закріплення смолою на основі лабораторно-аналітичного підходу. Так, міцність на стиск зміцненого масиву становить 45,4 МПа, міцність на розтяг – 5,1 МПа, зчеплення – 4,4 МПа, а кут внутрішнього тертя – $24,6^\circ$. Деформаційні властивості отриманого композитного матеріалу характеризуються модулем Юнга зі значенням 3160 МПа та коефіцієнтом Пуассона, рівним 0,29.

В результаті моделювання геомеханічного стану приконтурного масиву зі створенням «кільця» ін'єкційного закріплення шириною 2,5 м, що по своїй суті штучним склепінням, отримано епюри, які демонструють кардинальне покращення стійкості виробки та високу ефективність пропонованих заходів. Визначено, що створення такого склепіння (рис. 3.16а) призводить до радикального зниження конвергенції, а саме, максимальні зміщення боків зменшились до порівняно контрольованих 0,57 – 0,64 м. Особливо ефективно зміцнення працює у покрівлі, де осідання знизилось до 0,12 м.

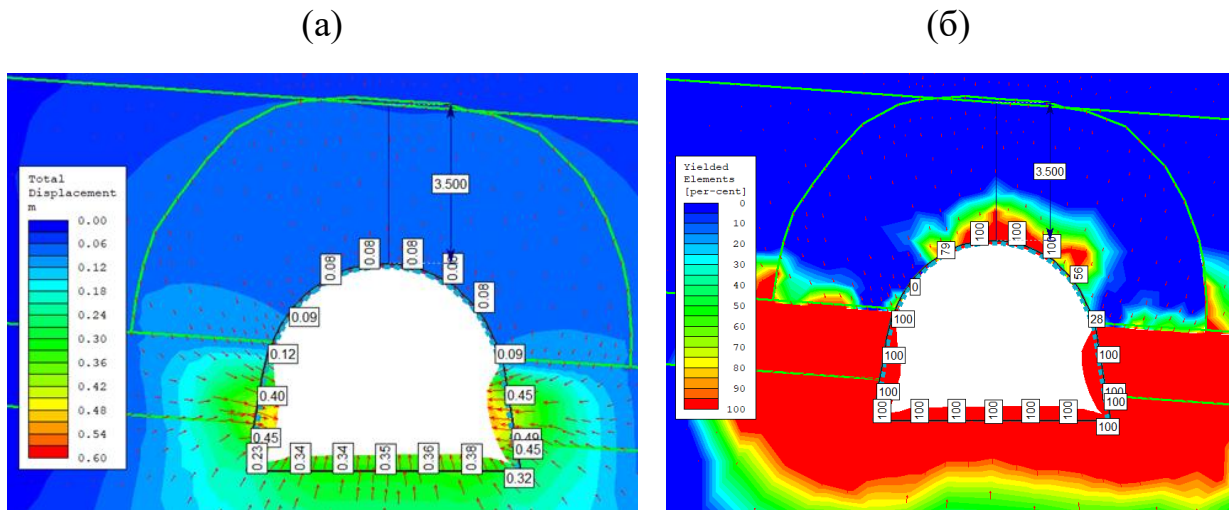


Рисунок 3.17 – Епюри загальних переміщень та розвитку пластичних деформацій при ширині ін’єкційного закріплення приконтурного масиву 3,5 м

В результаті моделювання при збільшенні ширини ін’єкційного закріплення масиву до 4,5 м отримано епюри (рис. 3.18), які демонструють досягнення максимально можливого стабілізуючого ефекту для даних умов. Кількісний аналіз епюри переміщень підтверджує високий ступінь стійкості: осідання покрівлі стабілізується на рівні 0,07 – 0,08 м (рис. 3.18а), підняття підосви не перевищує 0,38 м, максимальна конвергенція боків становить 0,41 – 0,47 м.

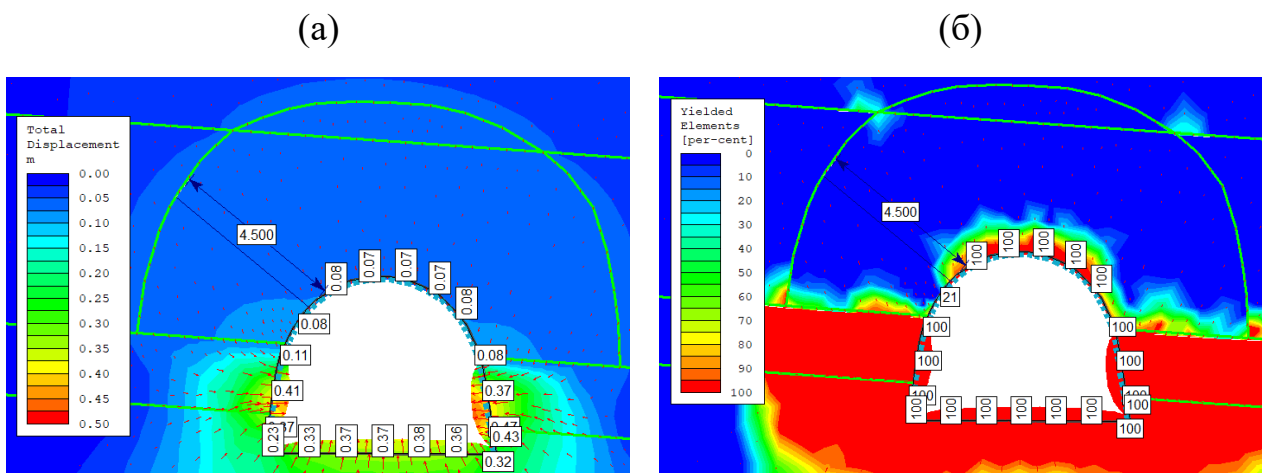


Рисунок 3.18 – Епюри загальних переміщень та розвитку пластичних деформацій при ширині ін’єкційного закріплення приконтурного масиву 4,5 м

Аналіз епюри пластичних деформацій (рис. 3.18б) показує, що зміцнене кільце масиву шириною 4,5 м створює надпотужне штучне склепіння, яке повністю ізолює контур виробки від зони руйнування у слабкому масиві. Зона пластичності, як і раніше, локалізується виключно за межами зміцненого шару, при цьому її інтенсивність дещо знижується.

Порівняльний аналіз результатів для ін'єкційного зміцнення приконтурного масиву шириною 2,5; 3,5 і 4,5 м дозволяє зробити наступний висновок: збільшення ширини зміцнення з 3,5 до 4,5 м не призводить до подальшого радикального зниження деформацій (максимальні зміщення залишаються на рівні 0,45 м). Зазначене свідчить про досягнення межі ефективності, за якою подальше збільшення ширини ін'єктування є недоцільним за техніко-економічними аспектами. Таким чином, оптимальною та достатньою для забезпечення надійної стійкості виробки у критичних умовах ($GSI < 35$) є ширина зони ін'єкційного закріплення 3,5 м. Встановлене оптимальне значення дозволяє обґрунтувати важливий технологічний параметр ін'єкційних робіт, а саме, довжину нагнітального шпура (3,0 м).

За результатами чисельного моделювання встановлено закономірності розвитку деформаційних процесів у приконтурному масиві штреку при різній ширині його ін'єкційного зміцнення, що ілюструються на рисунку 3.19. Аналіз даного рисунка показує, що ін'єкційне зміцнення покрівлі має комплексний стабілізуючий ефект. Виявлено, що зі збільшенням ширини укріпленої зони від 0 до 4,5 м суттєво зменшуються максимальні зміщення не лише безпосередньо покрівлі, але і боків виїмкової виробки.

Залежності з високим коефіцієнтом апроксимації ($R^2 = 0,99$) описуються поліноміальними функціями другого ступеня. При цьому визначено, що здимання порід підосви практично не залежить від ін'єкційного зміцнення приконтурного масиву, яке незначно знижується за лінійною залежністю, залишаючись майже на незмінному рівні. Виявлено, що застосування ін'єкційного зміцнення дозволяє сформувати над кріпленням стабільне штучне склепіння із в'язко-пластичного середовища.

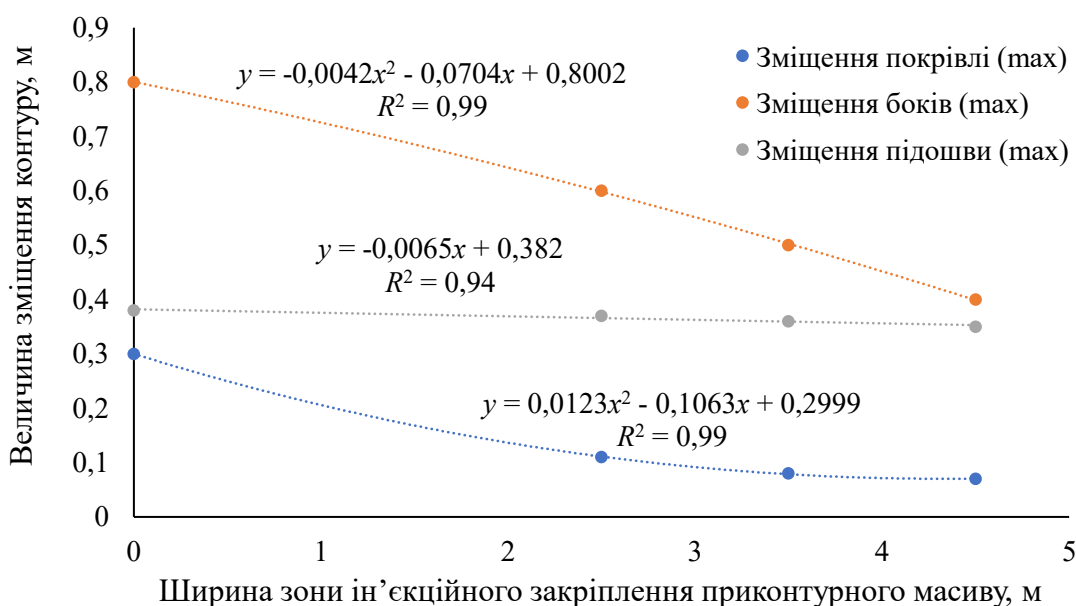


Рисунок 3.19 – Залежність зміни величини зміщень приконтурного масиву від ширини ін'єкційного зміцнення поліуретановою смолою

Встановлено пряму та чітку залежність ефективності цього методу від ширини зони ін'єктування: зі збільшенням ширини закріпленої області закономірно та суттєво зменшуються як максимальні зміщення контуру виробки, так і розмір зон пластичних деформацій приконтурного масиву.

Отримані результати науково обґрунтовують, що створення штучного зміцненого контуру на ширину 3,5 м є геомеханічно ефективним і надійним заходом для забезпечення безпеки та безаварійної роботи при перетині виїмковим штреком зон геологічних порушень. Таким чином підтверджено, що технологія ін'єкційного закріплення є ефективним рішенням забезпечення стійкості гірничих виробок у породах, послаблених впливом геологічних порушень, оскільки дозволяє створювати несучу конструкцію безпосередньо в масиві та запобігати розвитку критичних деформацій.

Оскільки дисертаційна робота присвячена дослідженню попереднього ін'єкційного зміцнення, особливу увагу приділено аналізу геомеханічної ситуації на сполученні «лава – штрек» при вході очисного вибою у зону ослабленого геологічним порушенням масиву.

Для всебічної оцінки геомеханічного стану та ефективності запропонованої технології ін'єкційного зміцнення було виконано порівняльний аналіз трьох розрахункових сценаріїв:

- традиційна технологія кріплення сполучення «лава – штрек» без впливу геологічного порушення в умовах природного фонового масиву ($GSI = 50 - 60$);
- традиційна технологія сполучення «лава – штрек» у зоні впливу геологічного порушення (критичний $GSI = 35$);
- застосування попереднього ін'єкційного зміцнення на ширину 3,5 м у тих самих складних умовах (критичний $GSI = 35$).

В результаті моделювання геомеханічного стану вузла сполучення «лава – штрек» для природних фонових умов без впливу геологічного порушення ($GSI = 50 - 60$) із застосуванням традиційної технології кріплення, отримано епюри (рис. 3.20), що свідчать про формування помірного напруженого стану та деформацій. На контурі штреку виникають критичні за величиною зміщення: осідання покрівлі сягає 0,19 – 0,25 см, а конвергенція боків у зоні сполучення досягає 0,24 м. При цьому аналіз епюри пластичних деформацій показує, що складна геометрія сполучення створює формування зони пластичності, що повністю охоплює контур як штреку, так і вікна лави.

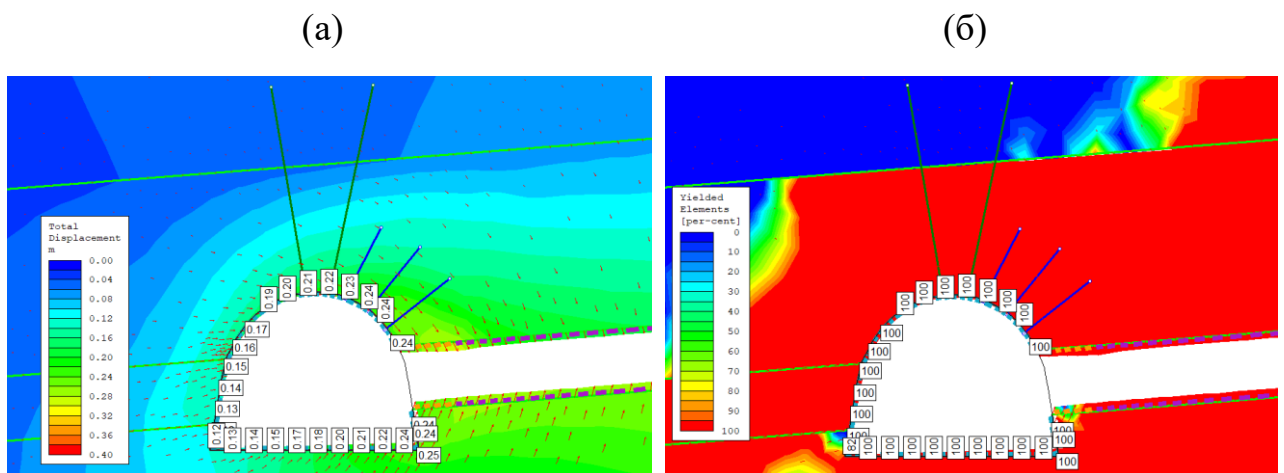


Рисунок 3.20 – Епюри загальних переміщень та розвитку пластичних деформацій при традиційній технології кріплення сполучення «лава – штрек» без впливу геологічного порушення в умовах природного фонового масиву ($GSI = 50 - 60$)

Це вказує на початкові стадії втрати несучої здатності приконтурного масиву, навіть при наявності сталеполімерних і канатних анкерів, що пояснюється значною глибиною розробки та, відповідно, вертикальних діючих напружень.

У результаті моделювання другого сценарію, а саме роботи сполучення «лава – штрек» за традиційною технологією кріплення вже у зоні впливу геологічного порушення (критичний $GSI = 35$) отримано епюри (рис. 3.21), що демонструють стан повного руйнування та втрати стійкості. Встановлено розвиток критичних для експлуатації виробки деформацій. Кількісний аналіз епюри переміщень (рис. 3.21а) показує, що осідання покрівлі штреку сягають 0,37 – 0,50 м і досягають межі піддатливості кріплення у боці виробки зі сторони вугільного пласта 0,22 м, а підняття підосви – до 0,25 м.

Аналіз епюри пластичних деформацій (рис. 3.21б) свідчить, що приконтурний масив повністю втратив свою несучу здатність. Навколо виробки сформувалась масштабна, суцільна зона пластичності, що доводить тотальне руйнування порід та їх перехід у стан, близький до сипучого середовища. Особливу небезпеку становить ситуація безпосередньо у вході в лаву, де фіксується інтенсивне прогинання покрівлі до 0,49 м, що повністю свідчить про формування майбутнього вивалу.

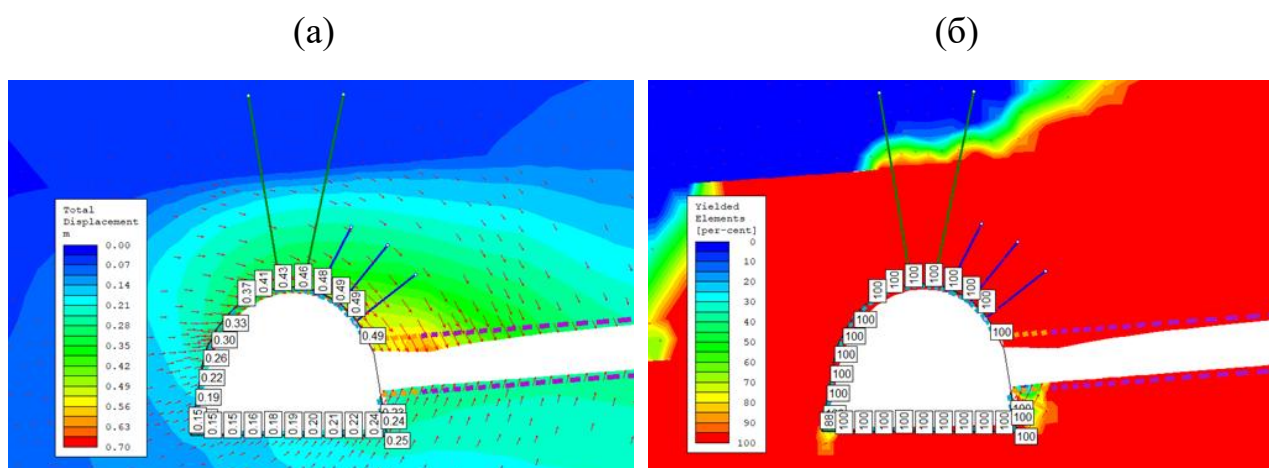


Рисунок 3.21 – Епюри загальних переміщень та розвитку пластичних деформацій при традиційній технології кріплення сполучення «лава – штрек» у зоні впливу геологічного порушення (критичний $GSI = 35$)

В результаті моделювання третього сценарію – застосування випереджувального ін'єкційного зміцнення на ширину 3,5 м в умовах критичного стану масиву ($GSI = 35$) отримано епюри, що демонструють надзвичайно високу геомеханічну ефективність запропонованої технології (рис. 3.22). Фіксується радикальне зниження деформацій (рис. 3.22а), а саме конвергенція боків, особливо в масиві вікна лави на сполученні, що раніше сягала критичних 0,49 м, і зменшилась до 0,13 м. Зміщення підосви стабілізувались на рівні 0,25 – 0,28 м. Особливо показовим є ефект у покрівлі, де осідання знизилось до 0,10 – 0,13 м.

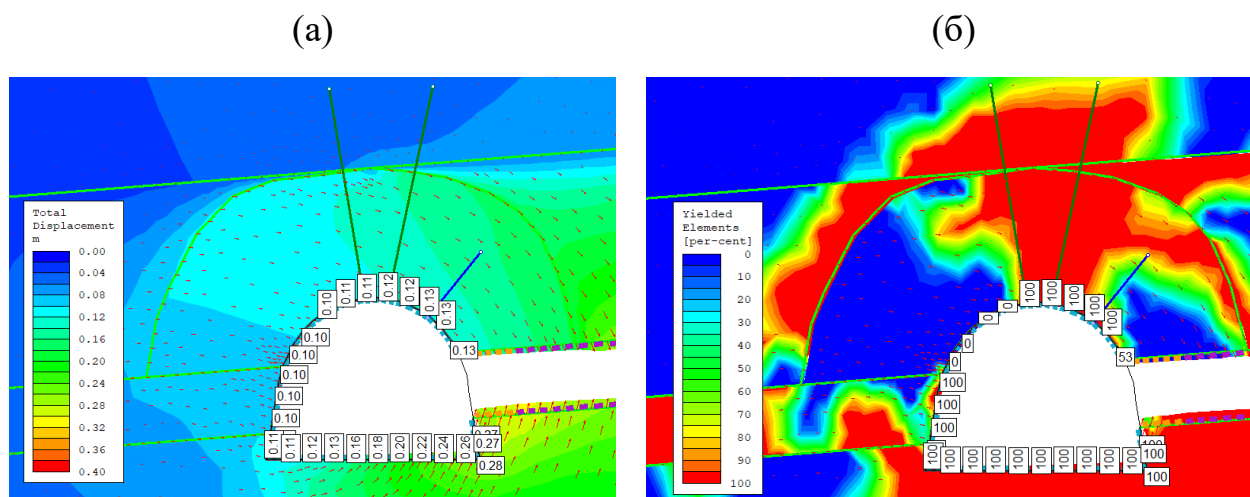


Рисунок 3.22 – Епюри загальних переміщень та розвитку пластичних деформацій при застосуванні попереднього ін'єкційного зміцнення на ширину 3,5 м у складних умовах (критичний $GSI = 35$)

Аналіз епюри пластичних деформацій (рис. 3.22б) показує, що створене композитне кільце «порода – смола» функціонує як потужне штучне несуче склепіння й повністю зупиняє розвиток зони пластичних деформацій на контурі виробки та переносить навантаження вглиб масиву, внаслідок чого сам приконтурний масив (у межах зміцненого шару) майже повністю залишається у пружному стані.

Моделювання доводить, що запропонована технологія дозволяє перевести систему «масив – кріплення» зі стану неминучого руйнування у

надійно стійкий стан з контрольованими деформаціями. Встановлено, що деформації покрівлі на сполученні «лава – штрек» при завчасному зміцненні поліуретановою смолою зменшуються у 3,75 разів (з 0,49 до 0,13 м), при цьому в сторону вікна лави у масив достатньо встановлювати 1 сталеполімерний анкер замість 3-х згідно паспорту без ін'єкційного зміцнення. Такий геомеханічний ефект забезпечується за рахунок локалізації зон пластичних деформацій у межах зміцненого контуру штреку, завдяки чому геомеханічний стан штреку на сполученні з лавою практично повертається до стабільного стану, характерного для непорушеного масиву.

Отримані результати за кількісно якісним характером тісно корелюють з даними, отриманими іншими вченими у контексті зменшення деформацій та покращення стійкості виїмкової виробки [10-12].

За результатами чисельного моделювання проведено порівняльний аналіз геомеханічного стану масиву на сполученні «лава – штрек» для різного ступеню порушеності масиву. Встановлено, що при зміні індексу геологічної міцності масиву від природного стану ($GSI = 50 - 60$) до умов впливу геологічного порушення (критичний $GSI \leq 35$), відбувається дестабілізація приконтурного виїмкового штреку на сполученні з лавою, зокрема, формуються масштабні зони пластичних деформацій, а зміщення контуру покрівлі значно зростає, що свідчить про втрату її несучої здатності. Досліджено ефективність завчасного закріплення порід покрівлі шляхом ін'єкційного зміцнення поліуретановою смолою, виконаного ще на стадії проведення штреку.

3.6 Висновки до розділу 3

У результаті проведення лабораторних досліджень та чисельного моделювання можна сформулювати основні наукові висновки розділу:

1. Встановлені залежності зміни фізико-механічних властивостей композитного матеріалу з різними співвідношеннями жорсткого породного скелету та полімерної матриці з поліуретанової смоли, зокрема поліноміальний

зв'язок з міцністю на стиск і розтяг, експоненційний зв'язок з модулем пружності та лінійний зв'язок зі зчепленням.

2. Досліджено геомеханічний стан масиву зі зниженням геологічного індексу міцності у діапазоні $GSI = 50 \dots 20$, що імітує входження прохідницького вибою у зону геологічного порушення, та встановлено порогове значення $GSI \leq 35$, за якого необхідним є термінове застосування ін'єкційного зміцнення масиву поліуретановою смолою.

3. Виявлено стійкий експоненційний кореляційний зв'язок ступеня тріщинної та міжфракційної пустотності для різних літотипів (алевроліт, пісковик) з індексом його геологічної міцності масиву (GSI) у зонах впливу дрібноамплітудних геологічних порушень для умов розробки запасів шахтного поля ПрАТ «ШУ «Покровське».

4. Встановлено поліноміальні залежності зміни зміщень покрівлі та боків виїмкового штреку залежно від ширини зміцнення приконтурної зони поліуретановою смолою, що дозволяє за технологічними особливостями піддатливості кріплення прогнозувати оптимальну ширину зміцнення.

5. Надано кількісно-якісну геомеханічну оцінку стану приконтурного масиву, зміцненого поліуретановою смолою: при проведенні виїмкового штреку зміщення боків знижуються у 5 разів, покрівлі – в 2 рази, а у по дальшому на сполученні «лава – штрек» – у 2,6 і 3,75 разів відповідно.

3.7 Список використаних джерел до розділу 3

1. Яковенко, В.Г., Бондаренко, В.І., Петльований, М.В., Ковалевська, І.А., & Драгун, Д.В. (2024). Аналіз особливостей вивалоутворення приконтурних порід виїмкових виробок та шляхи досягнення їх стійкості. *Збірник наукових праць НГУ*, 76, 127-141. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/76.127>

2. Бондаренко, В., Яковенко, В., & Петльований, М. (2023). Аналіз особливостей вивалоутворення порід при проведенні виїмкових виробок в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське». В *Матеріалах XVI міжнародної науково-практичної*

конференції «Українська школа гірничої інженерії» (с. 15-16). Східниця,: ЛізуновПрес. <https://doi.org/10.33271/usme16.015>

3. Яковенко, В. (2024). Експериментальні дослідження зміцнення покрівлі вугільного пласта поліуретановою смолою в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське». В *Матеріалах XVII міжнародної науково-практичної конференції «Українська школа гірничої інженерії»* (с. 13-14). Східниця: ЛізуновПрес. <https://doi.org/10.33271/usme17.013>

4. Bondarenko, V., Kovalevska, I., Petlovanyi, M., Yakovenko, V., & Sachko, R. (2023). The use of injection fixing to prevent the roof rock inrush at the junction of longwall faces with extraction drifts. In *Materials of the International Conference “XXXII Szkoła Eksploatacji Podziemnej”*. Krakow, Poland: Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, Akademia Górniczo-Hutnicza.

5. Liu, Y., Elsworth, D., & Pone, J.D.N. (2022). Investigating the effects of cement and polymer grouting on the shear behavior of rock joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(4), 1425-1442. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02765-5>

6. Wang, Y., Li, W., & Liu, X. (2023). Strength recovery of fissured granite with varying crack widths repaired by epoxy resin. *Results in Engineering*, 19, 101403. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101403>

7. Zhang, Q., Wang, Y., Li, J., & Wang, Z. (2022). Modified Burgers model of creep behavior of grouting-reinforced fractured rock mass. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 128, 104648. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104648>

8. Symanovych, H., Odnovol, M., Yakovenko, V., Sachko, R., Shaikhislamova, I., Reshetilova, T., & Stadnichuk, M. (2023). Assessing the geomechanical state of the main working network state in the case of undermining in the conditions of weak rocks. *Mining of Mineral Deposits*, 17(2), 91-98. <https://doi.org/10.33271/mining17.02.091>

9. Bruce, D.A., & DeMarco, M.J. (2003). Reinforcing coal mine roof with polyurethane injection. *Proceedings of the 19th International Conference on Ground Control in Mining*. Morgantown: National Institute for Occupational Safety and Health.

10. DeMarco, M.J. (2008). Polyurethane resin (PUR) injection for rock mass and structure stabilization. In *Proceedings of the 6th International Conference on Case*

Histories in Geotechnical Engineering (pp. 1-10). Arlington: Missouri University of Science and Technology.

11. Molinda, G.M. (2004). Evaluation of polyurethane injection for beltway roof stabilization in a West Virginia coal mine. *Proceedings of the 23rd International Conference on Ground Control in Mining*, 190-196.

12. Hildreth, C., Seidel, R., & Oglesby, K. (2020). Chemical injections can solve complex problems. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 102, 103450. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103450>

РОЗДІЛ 4

ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАГНІТАННЯ ІН'ЄКЦІЙНИХ СМОЛ У ЗОНІ ВПЛИВУ ГЕОЛОГІЧНИХ ПОРУШЕНЬ. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ

4.1 Методика розрахунку параметрів завчасного ін'єкційного нагнітання тріщинуватих порід

Розробці методики визначення параметрів завчасного ін'єкційного нагнітання тріщинуватих порід передував комплексний науково-дослідний підхід, що поєднав у собі три основні результати досліджень: лабораторні випробування, натурні (шахтні) дослідження та чисельне моделювання геомеханічних процесів. На першому етапі в лабораторних умовах було визначено фізико-механічні властивості як вихідних зразків порід, так і композитних матеріалів «порода – поліуретан». Також, для отримання об'єктивних даних щодо структурних особливостей масиву, було проведено шахтні дослідження, які дозволили встановити емпіричну залежність між загальною тріщинною пустотністю порід та їх геомеханічним станом, кількісно вираженим через індекс геологічної міцності GSI. Отримані дані стали вихідною базою для третього етапу, а саме чисельного моделювання у програмному комплексі скінченно-елементного аналізу. Моделювання дозволило детально вивчити закономірності розподілу деформацій та зон пластичності у системі «масив – кріплення – ін'єкційне зміцнення» при варіюванні параметрів ширини закріплення масиву. Таким чином, комплексний аналіз та узагальнення результатів, отриманих трьома незалежними методами, забезпечили створення науково обґрунтованої методики розрахунку, яка враховує як властивості матеріалів, так і геомеханічні умови їх роботи в породному масиві.

1. Визначення геологічного індексу міцності масиву GSI у зоні впливу геологічного порушення. При вході прохідницького вибою виїмкового штреку в геологічне порушення одразу за прохідницьким комбайном здійснюється кернове буріння свердловин з наступним аналізом структури та якості кернів.

Після визначення показника масиву GSI та при виявленні його критичного порогу $GSI \leq 35$ з урахуванням типу порід покрівлі здійснюється визначення прогнозної сукупної пустотності масиву:

$$- \text{алевроліт: } J = 26,9e^{-0,026GSI}; \quad (4.1)$$

$$- \text{пісковик } J = 9,38e^{-0,032GSI}. \quad (4.2)$$

2. *Визначення раціональної ширини зони ін'єкційного закріплення та ефективної довжини нагнітального шпура.* Визначається мінімально необхідна та технологічно доцільна ширина закріплення B , яка забезпечить стійкість виробки. Розрахунок ґрунтується на використанні емпіричних поліноміальних залежностей, отриманих раніше шляхом чисельного моделювання:

$$U_{\text{покp}} = 0,0042B^2 - 0,0704B + 0,8002; \quad (4.3)$$

$$U_{\text{бок}} = 0,0123B^2 - 0,1063B + 0,3. \quad (4.4)$$

Встановлюється допустима величина зміщень покрівлі та боків виробки $[U_{\text{max}}]$, виходячи з вимог паспорта кріплення, технологічної піддатливості або нормативних документів.

Визначається раціональне значення ширини зони B та довжина нагнітального шпура l_n із урахуванням розповсюдження смоли у масив від кінцевої частини шпура ($k_p = 0,80 - 0,85$):

$$l_n = B \cdot k_p, \text{ м.} \quad (4.5)$$

Ефективна довжина нагнітального шпура визначається з урахуванням довжини герметизатора (пакеру) ($l_z = 0,5 - 0,6$):

$$l_{\text{ef}} = l_n - l_z, \text{ м.} \quad (4.6)$$

3. *Визначення раціональної довжини зони ін'єкційного закріплення вздовж виїмкового штреку в зоні впливу геологічного порушення.* Довжину зони закріплення вздовж виїмкового штреку пропонується розраховувати, виходячи з прогнозної зони впливу геологічного порушення по обидва боки від зміщувача, згідно нормативного документа КД 12.06.204-99:

$$L_3 = \frac{10N}{\sin V}, \text{ м,} \quad (4.7)$$

де N – амплітуда зміщувача, м;

V – кут між площиною зміщувача та напластуванням порід, град.

4. *Визначення теоретичного ефективного радіусу розтікання поліуретанової смоли у нагнітальному шпурі.* Теоретичний радіус розтікання смоли у масиві визначається з урахуванням нормативних рекомендованих значень витрат смоли (на 1 м нагнітального шпура $l_n = 40 - 70$ л) в умовах нестійких порід, коефіцієнту спінювання поліуретанової смоли $k_{cn} = 2$, величини сукупної тріщинної пустотності (враховується у %) та коефіцієнту нерівномірності розповсюдження пустот і тріщин у масиві ($k_n = 1,25 - 1,40$):

$$R_{ef} = \sqrt{\frac{V_{cm} \cdot k_{cn}}{\pi \cdot l_n \cdot J \cdot k_n}}, \text{ м}, \quad (4.8)$$

де V_{cm} – необхідна витрата поліуретанової смоли на 1 м нагнітального шпура при його діаметрі 43 мм:

$$V_{cm} = \pi \cdot (R_{ef}^2 - r_{un}^2) \cdot l_{ef} \cdot J, \text{ л}. \quad (4.9)$$

5. *Визначення кількості нагнітальних шпурів у ряду* здійснюється з урахуванням довжини дуги покрівлі виробки L_n (без вугільного пласта) та теоретичного радіусу розтікання смоли R_{ef} :

$$n = \frac{L_n}{2R_{ef}}, \text{ шт.} \quad (4.10)$$

6. *Визначення відстані між рядами нагнітальних шпурів.* Відстань між рядами нагнітальних шпурів дорівнює подвійному радіусу розтікання поліуретанової смоли між шпурами для їх мінімального перетинання:

$$m = 2R_{ef}, \text{ м}. \quad (4.11)$$

Отже, вдосконалення запропонованої методики полягає у двох основних аспектах. По-перше, в уточненні сукупної тріщинної пустотності масиву, яка розглядається не як статична паспортна величина, а як динамічний параметр, що безпосередньо залежить від геомеханічного стану порід, кількісно вираженого через індекс геологічної міцності GSI, який дозволяє більш об'єктивно

оцінювати необхідний об'єм смоли для заповнення тріщин, що розкриваються під дією гірського тиску. По-друге, в обґрунтуванні раціональної ширини зони закріплення на основі аналізу полів напружень і деформацій, отриманих шляхом чисельного моделювання. На відміну від емпіричних підходів, такий розрахунок прив'язує ширину зміцненої арки над виробкою до фактичної зони розвитку непружних деформацій навколо неї, що запобігає як недостатньому, так і надлишковому зміцненню.

Комплексне врахування зазначених аспектів забезпечує перехід до більш ефективного проєктування параметрів ін'єкційних робіт, підвищуючи їх техніко-економічну ефективність у складних гірничо-геологічних умовах.

4.2 Шахтні дослідження ін'єкційного нагнітання поліуретанових смол на ділянці нестійких порід виїмкового штреку

У рамках дослідження за методикою розрахунку параметрів ін'єкційного закріплення було проведено шахтний натурний експеримент зі зміцнення масиву поліуретановою смолою. Для цього, згідно розробленої методики шахтного експерименту у п. 2.5, було підготовлено відповідне обладнання для здійснення ін'єкційних робіт зі зміцнення приконтурного масиву у випадку входження прохідницького вибою в непрогнозоване геологічне порушення.

Для проведення експерименту обраний прохідницький вибій 2-го північного конвеєрного штреку блоку № 11, який здійснює підготовку запасів 2-ї північної лави блоку № 11, з промисловими запасами вугілля марки К – 895 тис. тонн. Виїмковий штрек проводився площею перерізу 20,3 м² і закріплювався металевим арочним кріпленням КШПУ-20,3 з кроком встановлення 0,5 м. Темпи просування штреку коливались в діапазоні 7 – 9 м/добу.

У районі ПК 127 прохідницька бригада помітила зміну геологічної обстановки приконтурного масиву, зокрема значно підвищилась його тріщинуватість та ширина розкриття тріщин, при цьому після встановлення рамного кріплення спостерігалось відшарування порід у закріпному просторі. При подальшому посуванні вибою було перетнуто зміщувач геологічного

порушення амплітудою 0,5 м і кутом падіння 45° , однак ознак серйозних вивалоутворень не спостерігалось. Було відібрано 2 кернові зразки в зоні впливу геологічного порушення довжиною 3 м.

Результати вивчення кернів показали, що у покрівлі пласта залягає алевроліт ($f=4-5$), який під дією геологічного порушення з амплітудою зміщення 0,5 м зазнав значної структурної деградації. Порода характеризується як інтенсивно тектонічно деформована, роздрібнена та дезінтегрована. Тріщинуватість вкрай висока і досягає 15 тріщин на погонний метр, що призводить до утворення дрібноблочної, хаотичної структури. Тріщини різноспрямовані, під кутами $15-40^\circ$, з розкриттям до 2,5 см. Поверхні розривів шорсткі, хвилясті, зі слідами зсуву (дзеркалами ковзання) та часто покриті тонким шаром глинистого заповнювача. За цим пластом алевроліту розташований вугільний пласт d_4 потужністю 1,15 м, у підшві якого залягає інший пласт алевроліту потужністю 2,5 м. Згідно класифікації Хюека, така інтенсивно деформована структура відповідає категорії D та F, а якість поверхонь з глинистим заповнювачем – категорії «погана»/«дуже погана», що на перетині дає значення GSI в діапазоні 20 – 30. Прийняте значення $GSI = 25$, у свою чергу, повністю узгоджується зі встановленою кореляційною залежністю, згідно з якою така якість масиву алевроліту відповідає сукупній (тріщинній та міжфракційній) пустотності 14%. За розробленою методикою були розраховані параметри ін'єкційного закріплення масиву поліуретановою смолою:

- усереднений індекс геологічної міцності масиву – $GSI = 25$;
- тріщинна та міжфракційна пустотність алевроліту – 14%;
- розмір зони впливу геологічного порушення (у в/б, у л/б) – 12 м;
- довжина нагнітальних шпурів – 3,0 м;
- теоретичний ефективний радіус розтікання смоли – 1,0 м;
- кількість нагнітальних шпурів у ряду – 4;
- відстань між рядами нагнітальних шпурів – 2,0 м;
- рекомендований об'єм смоли на 1 шпур – 165 л;
- прийнятий тиск нагнітання – 6 МПа.

Здійснено оперативний монтаж нагнітального обладнання та пробурено нагнітальні шпури. Схема буріння шпурів наведена на рисунках 4.1 і 4.2.

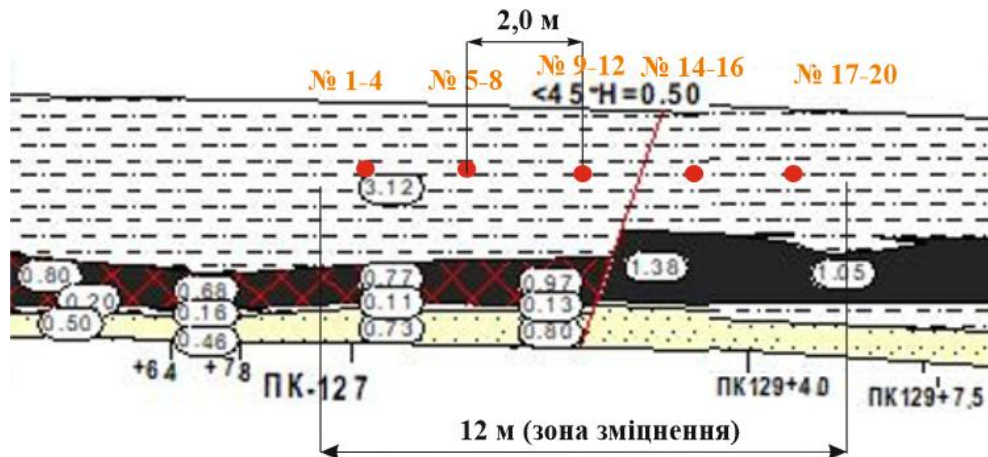


Рисунок 4.1 – Схема розташування рядів нагнітальних шпурів (повздовжній розріз)

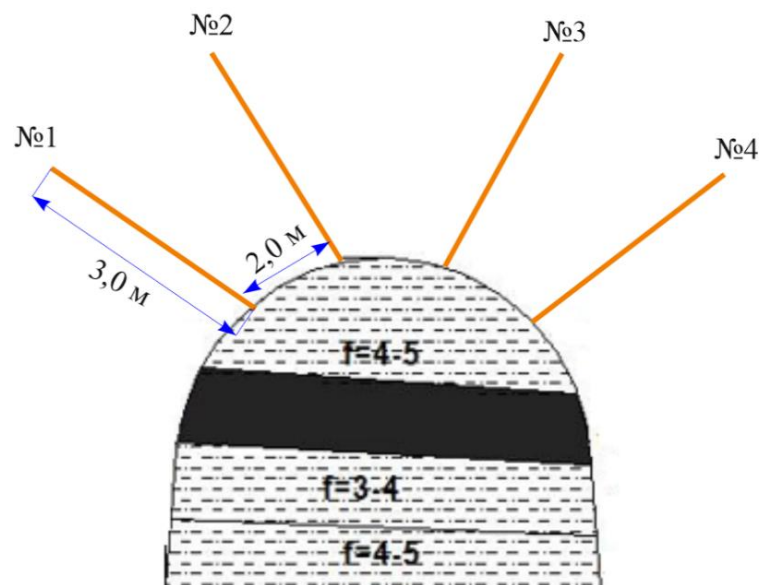


Рисунок 4.2 – Схема розташування шпурів у ряду (поперечний розріз)

У ході експерименту було пробурено та виконано нагнітання поліуретанової смоли у 20 шпурів загальною довжиною 60 м і закріплено ділянку штреку довжиною 12 м (рис. 4.3). Результати нагнітання наведено в таблиці 4.1. Встановлено, що фактична витрата смоли склала 3734 л, що на 12% перевищило плановий показник у 3300 л, та свідчить про збіжність результатів у 88%.



Рисунок 4.3 – Ілюстрація процесів нагнітання поліуретанової смоли в боки та покрівлю виїмкової виробки

Більший рівень витрати смоли пов'язаний з неоднорідністю тріщинуватості та дезінтегрованості масиву в зоні випробувань. Шпури № 9 – 12 потрапили у зону зміщувача порушення, де, ймовірно, існують більш розкриті тріщини, адже об'єм витрат збільшився у 1,5 – 2,0 рази.

Після виконання ін'єкційних робіт було здійснено відбір кернавого зразку довжиною 4 м у лівому борті виробки в районі 5 і 6 нагнітальних шпурів. Слід зазначити, що структура масиву була представлена не лише алевролітом (безпосередня покрівля), але також частково пісковиком (основна покрівля). Кернова структура виявилася наступною: 78% алевроліту, 22% пісковика.

Аналіз кернавих зразків, відібраних після виконання ін'єкційних робіт, візуально підтверджує високу ефективність застосованої технології та формування якісного композитного матеріалу «порода – полімер».

Таблиця 4.1 – Моніторинг і контроль параметрів нагнітання
поліуретанової смоли Marithan®

Нагні- тальний шпур	Відстань між рядами шпурів, м	$L_{ш}$, м	Кут нахилу шпура, °	Кут розвороту шпура, °	Час нагні- тання, хв	$P_{наг}$, МПа	$V_{см}$, л (реко- мен- дації)	$V_{см}$, л (факт)
№ 1	2,0	3,0	35	10 – 15	14,5	6	165	180
№ 2		3,0	35	10 – 15	12	6	165	140
№ 3		3,0	35	10 – 15	19	6	165	145
№ 4		3,0	35	10 – 15	15	6	165	160
№ 5	2,0	3,0	35	10 – 15	14	6	165	180
№ 6		3,0	35	10 – 15	18	6	165	228
№ 7		3,0	35	10 – 15	12	6	165	144
№ 8		3,0	35	10 – 15	16	6	165	195
№ 9	2,0	3,0	35	10 – 15	8,5	6	165	230
№ 10		3,0	35	10 – 15	7,5	6	165	335
№ 11		3,0	35	10 – 15	8,5	6	165	264
№ 12		3,0	35	10 – 15	8	6	165	290
№ 13	2,0	3,0	35	10 – 15	14	6	165	218
№ 14		3,0	35	10 – 15	13	6	165	180
№ 15		3,0	35	10 – 15	12	6	165	245
№ 16		3,0	35	10 – 15	13	6	165	200
№ 17	2,0	3,0	35	10 – 15	12	6	165	144
№ 18		3,0	35	10 – 15	11	6	165	216
№ 19		3,0	35	10 – 15	7	6	165	175
№ 20		3,0	35	10 – 15	10	6	165	165
Разом							3300	3734
Збіжність							88%	

На зразках, що представляють роздрібнений конгломерат алевроліту (рис. 4.4а, б), чітко видно як поліуретанова смола здійснила глибоке проникнення у міжфракційну пустотність і виступила як цементуюча матриця, що зв'язала окремі гострокутні уламки породи, утворивши міцний та монолітний композит. На зразках пісковика (рис. 4.4 в, г) продемонстровано повне заповнення макротріщин і високу адгезію полімеру до стінок розривів, що забезпечило відновлення структурної цілісності та створення міцного структурного зв'язку.



Рисунок 4.4 – Кернові зразки скріпленого поліуретановою смолою масиву гірських порід: (а), (б) конгломерат алевроліту безпосередньої покрівлі; (в), (г) пісковик основної покрівлі

Таким чином, візуальний аналіз підтверджує, що ін'єкційне нагнітання успішно перетворило початково тріщинуватий та ослаблений масив у єдину консолідовану структуру, здатну нести навантаження.

Спостереження після ін'єкційного зміцнення приконтурного масиву 2-го північного конвеєрного штреку блоку № 11 на визначеній ділянці полягають в

наступному. За результатами візуальних спостережень за станом приконтурного масиву після проведення ін'єкційного зміцнення, виконаних робітниками прохідницької бригади, було зафіксовано однозначний позитивний ефект, що підтверджує високу ефективність технології. Відзначено, що поліуретанова смола вдало проникала в існуючу мережу видимих тріщин на поверхні масиву, а також у внутрішні пустоти. Після полімеризації складу відбулася повна консолідація та монолітизація приконтурного шару: смола заповнила та міцно зацементувала тріщини, зв'язавши розрізнені дрібні фракції та уламки зруйнованої породи в єдину, щільну та стійку структуру. Як наслідок, було повністю припинено процес відшарування та осипання дрібної породної маси з борта виробки. Візуально зафіксовано, що стінка масиву стабілізована, сповзання окремих фрагментів зупинено, щов свою чергу забезпечило надійне утримання контуру виробки та безпечні умови праці. При проведенні промислових досліджень із закріплення масиву полімерними складами закордонні вчені візуально спостерігали стабілізацію деформаційних процесів та якісне скріплення тріщинуватого масиву [1-3].

4.3 Економічна оцінка ефективності ін'єкційного закріплення приконтурного масиву при веденні підготовчих та очисних робіт

Застосування попереджувальних заходів, що спрямовані на підвищення стійкості масиву гірських порід навколо гірничих виробок, безумовно належить до витратної частини виробничого процесу. Проте, в умовах ускладненої геологічної будови або підвищеної тріщинуватості такі заходи можуть мати вирішальне значення для забезпечення безперервності та безпеки гірничих робіт. Якщо реалізація превентивного зміцнення, зокрема за допомогою ін'єкційних технологій, дозволяє уникнути аварійних ситуацій, скоротити обсяги перекріплення, зменшити втрати видобутку та мінімізувати простої, тоді ці витрати стають економічно виправданими. Вартість попереджувальних заходів у такому випадку компенсується запобіганням значно більшим збиткам, які

можуть виникнути у разі руйнування масиву або зниження продуктивності через техногенні порушення.

Якщо в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське» розглядати ін'єкційне закріплення за пропонованою технологією комплексно, а саме при підготовці та відпрацюванні запасів вугілля виїмкового стовпа, слід виділити два напрями досягнення економічної ефективності:

- попередження вивалоутворень приконтурних порід при проведенні виїмкового штреку для підготовки запасів визначеного виїмкового стовпа;
- попередження вивалоутворень порід на сполученнях «лава – штрек» при веденні вже очисних робіт у межах визначеного виїмкового стовпа.

Перший напрям економічної ефективності полягає у мінімізації аварійності, обсягів перекріплення та додаткових робіт у процесі проходки гірничих виробок в умовах геологічно ослабленого масиву. За відсутності попереднього ін'єкційного зміцнення тріщинуватих зон, особливо в області геологічних порушень, значно підвищується ризик розвитку вивалів порід, деформації кріплення та втрати стійкості купольної частини виробки. Як наслідок, виникає необхідність у викладці клітей у зонах вивалів, аварійному перекріпленні з використанням додаткових металевих чи дерев'яних елементів, залученні додаткових трудових ресурсів і техніки, а також неминучих простоїв. Проведення ін'єкційного закріплення поліуретановими смолами на стадії проходки забезпечує підвищення структурної цілісності порід, зниження тріщинуватості, покращення їх деформаційної стійкості та значне зменшення ймовірності формування вторинних пустот. З економічної точки зору ефект досягається за рахунок зниження витрат на аварійні роботи, зменшення використання матеріалів для перекріплення, скорочення тривалості проходки та оптимізації трудовитрат. Для обґрунтування цього напрямку доцільно здійснити порівняльний аналіз двох сценаріїв: без ін'єкційного зміцнення – з урахуванням витрат на перекріплення, викладку клітей, ліквідацію вивалів та втрат часу; з ін'єкційним закріпленням – із розрахунком вартості поліуретанових смол, буріння шпурів та витрат на ін'єкційні роботи.

Другий напрям економічної доцільності пов'язаний із забезпеченням стабільної та безперервної роботи очисного вибою під час наближення до зон геологічних порушень, які були попередньо ін'єкційно зміцнені. У гірничій практиці саме ці зони найчастіше є місцем локального руйнування масиву, вивалів порід, деформацій кріплення, зупинок технологічного циклу та необхідності аварійного перекріплення з повним або частковим демонтажем обладнання. Якщо ж під час підготовчих робіт заздалегідь виконано ін'єкційне закріплення слабких ділянок порід у межах геологічних порушень, структура масиву зберігає стійкість при наближенні лави, а кріплення працює в стабільному напружено-деформованому стані. Своєчасне закріплення дозволяє уникнути непланових простоїв, попередити втрати видобутку та знизити техногенне навантаження на гірничу інфраструктуру. З економічної точки зору, ефективність полягає у запобіганні витратам, пов'язаним з аварійною ліквідацією наслідків вивалів, простоем очисного комплексу, а також втратами вуглевидобутку. Схожі підходи та статті витрат використовували також і інші закордонні вчені при економічній оцінці ін'єкційного закріплення масиву гірничих виробок, про що свідчать їх наукові роботи [4-7].

Для кількісного обґрунтування доцільно провести зіставлення вартості ін'єкційного закріплення (матеріали, буріння, нагнітання) з потенційними збитками у разі відсутності попереднього зміцнення, включаючи втрачений видобуток, ремонт кріплення та зниження продуктивності лави.

Загальна економічна ефективність доцільності застосування ін'єкційного закріплення тріщинуватого масиву гірських порід може бути визначена за наступною формулою:

$$E = C_1 - C_2, \text{ грн}, \quad (4.12)$$

де C_1 – величина економічних збитків, які нанесено від вивалоутворення приконтурних порід протягом відпрацювання виїмкового стовпа (проходка + очисні роботи), грн;

C_2 – витрати на технологію ін'єкційного закріплення приконтурних порід протягом відпрацювання виїмкового стовпа, грн.

Вихідні дані для оцінки ефективності пропонованих технологічних рішень щодо застосування ін'єкційного закріплення масиву при наявності геологічного порушення наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Комплекс вихідних даних для оцінки ефективності ін'єкційного закріплення порід у розрахунку на виїмковий стовп

Параметр	Значення
Кількість геологічних порушень	3
Довжина зони ін'єкційного зміцнення 1 геологічного порушення (висячий бік + лежачий бік порушення), м	10
Довжина нагнітального шпура, м	3
Відстань між шпурами, м	2
Кількість нагнітальних шпурів на зону 1 геологічного порушення (4 шпура в ряду, 5 рядів	20
Розхід смоли на шпур, л	200
Вартість 1 кг смоли (компонент А), грн	299
Вартість 1 кг каталізатора (компонент В), грн	299
Втрати вугілля при проходженні 3-х геологічних порушень очисним вибоєм, т	6000
Вартість нагнітального обладнання, грн:	
Насос	300000
РВД Ф 25 мм, 688 грн/шт	688
РВД Ф 12 мм, 317 грн/шт	317
Комплект фітінгів, грн/комплект	402
Герметизатор Taugus (затвор гідравлічний), грн/шт	6330
Вартість перекріплення 1 м виїмкового штреку, грн	148000
Вартість 1 т коксівного вугілля, грн	10800

Очікуваний економічний ефект від застосування ін'єкційного закріплення приконтурного масиву розраховано за умов перетинання 3-х небезпечних геологічних порушень з низьким індексом геологічної міцності при підготовці та подальшому веденні очисних робіт згідно таблиці комплексу вихідних даних. Тобто розглядалась ситуація, коли завчасно та попередньо при проведенні виїмкової виробки закріплюється поліуретановою смолою ділянка 30 м (на 3 геологічні порушення). Результати розрахунку наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунку очікуваного економічного ефекту від запровадження технології ін'єкційного зміцнення масиву

Показник	Сума, грн
Загальні збитки без зміцнення (C_1), в т.ч.:	69240000
– вартість перекріплення	4440000
– вартість втрат видобутку	64800000
Загальні витрати на зміцнення (C_2), в т.ч.:	3815457
– розхідні матеріали	3514050
– обладнання багаторазового використання	301407
Чистий економічний ефект ($E = C_1 - C_2$)	6424543

За результатами розрахунків очікуваний економічний ефект складе 64,2 млн грн на весь виїмковий стовп у порівнянні з традиційною схемою кріплення виїмкових виробок. Отримані результати, незважаючи на дороговизну застосування поліуретанових смол, демонструють високу ефективність та вагомий економічний ефект.

Безпосередньо економічний ефект отримано за рахунок уникнення витрат на дороговартісне перекріплення гірничих виробок, металеве кріплення яких зазнає суттєвих руйнувань при вивалоутвореннях. У досліджуваних умовах площа перерізу виїмкових виробок складає 20,3 м², а вартість перекріплення 1 погонного метру виробки сягає 3,5 тис. доларів, що зазнає виїмкова виробка у зоні впливу геологічних порушень. Також ефект досягається за рахунок уникнення зменшення навантаження на очисний вибій при аварійних ситуаціях, пов'язаних з вивалами порід на сполученнях «лава – штрек». Втрати навантаження можуть сягати 20 – 30% від запланованого бізнес-планом навантаження в 4000 т/добу. Вартість 1 т коксівного вугілля складає близько 260 доларів за тонну. Отже, за рахунок уникнення вивалів при ін'єкційному закріпленні ми не втрачаємо навантаження на очисний вибій, що в свою чергу позитивно впливає на економічну ефективність.

Як показали результати розрахунків, в умовах ПрАТ «ШУ «Покровське» ін'єкційний спосіб завчасного зміцнення приконтурного масиву є вельми ефективним та економічно доцільним.

4.4 Висновки до розділу 4

1. Розроблено комплексну методику розрахунку параметрів попереднього ін'єкційного зміцнення, яка базується на результатах лабораторних досліджень, чисельного моделювання та шахтних спостережень. Вдосконалення методики полягає в уточненні двох ключових, взаємопов'язаних параметрів: сукупної тріщинної пустотності масиву та ширини зони його закріплення. По-перше, за рахунок встановлення кореляційної залежності між індексом GSI та пустотністю, вдалося більш точно визначати цей параметр, що дозволяє перейти від усереднених значень до обґрунтованого розрахунку необхідного об'єму смоли. По-друге, шляхом чисельного моделювання обґрунтовано оптимальну ширину зони зміцнення, що дозволяє уникнути як недостатнього зміцнення (що не гарантує стійкості), так і надлишкового (яке призводить до невиправданої перевитрати матеріалів). Методика визначення раціональних параметрів зміцнення містить визначення довжини нагнітальних шпурів, ефективного радіуса розтікання смоли у шпурі, оптимальної відстані між нагнітальними шпурами в ряду, відстані між рядами нагнітальних шпурів та необхідного об'єму смоли на шпур.

2. Для підтвердження ефективності розробленої методики було проведено повномасштабний шахтний експеримент у приконтурному масиві 2-го північного конвеєрного штреку блоку № 11 в зоні впливу геологічного порушення, що характеризувалася критичними показниками ($GSI = 25$, сукупна пустотність – 14%). В ході експерименту було пробурено 20 нагнітальних шпурів загальною довжиною 60 м. Моніторинг процесу нагнітання показав, що збіжність між рекомендованим (розрахунковим) та фактичним об'ємом витраченої смоли склала 88%. Такий високий показник збіжності підтверджує високу точність та адекватність розробленої методики розрахунку параметрів, доводячи її практичну придатність. Результати підтвердили високу технологічну ефективність процесу ін'єкційного зміцнення: візуальні спостереження зафіксували повну стабілізацію контуру виробки та припинення

вивалів, а аналіз після ін'єкційних кернів показав формування міцного монолітного композиту «порода – полімер».

3. Визначено економічну ефективність запропонованої технології ін'єкційного зміцнення приконтурного масиву поліуретановою смолою. Згідно проведених розрахунків, впровадження попереднього ін'єкційного зміцнення дозволяє отримати загальний економічний ефект у розмірі 64,2 млн грн на 1 виїмковий стовп. Ефект досягається переважно за рахунок попередження аварійних ситуацій, виключення витрат на ліквідацію наслідків вивалів (розбирання породи, повторне кріплення) та уникнення тривалих простоїв видобувного комплексу.

4.5 Список використаних джерел до розділу 4

1. Liu, H., Chen, Y., Han, Z., Liu, Q., Luo, Z., Cheng, W., Zhang, H., Qiu, S., & Wang, H. (2022). Coal wall spalling mechanism and grouting reinforcement technology in large mining height working face. *Sensors*, 22(22), 12731. <https://doi.org/10.3390/s22228675>

2. Han, Z., Liu, H., Liu, Q., Liang, J., Guo, X., Chen, Y., Hao, Z., & Yao, Q. (2025). Mechanical properties and damage evolution mechanisms of polyurethane grouting materials for roadway reinforcement. *Case Studies in Construction Materials*, 23, e05137. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05137>

3. Zhou, X., Zhang, Y., Bian, W., & Rong, Y. (2022). Mechanical properties and morphology of polyurethane composite grouting materials. *2022 International Conference on Optoelectronic Information and Functional Materials (OIFM 2022)*, 12. <https://doi.org/10.1117/12.2638643>

4. Molinda, G. (2008). Reinforcing coal mine roof with polyurethane injection: 4 case studies. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(5), 553-566. <https://doi.org/10.1007/s10706-008-9189-0>

5. Hayman, L.J. (2014). Economic and productivity comparison of ground support for rockburst-prone and squeezing ground conditions. *Proceedings of the*

Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining, 329-342.

https://doi.org/10.36487/acg_rep/1410_22_hayman

6. Wang, J., Tai, L., Li, C., Qu, Q., Yu, X., Liu, Y., & Yao, W. (2024). Research on high-strength economic support technology for soft rock roadway with roof drenching under thin bedrock irregular surface. *Applied Sciences*, 14(20), 9428.

<https://doi.org/10.3390/app14209428>

7. Zyen, A.M., & Mulyono, N.B. (2024). Decision-making analysis of ground support selection in a critical mine infrastructure tunnel. *European Journal of Business and Management Research*, 9(6), 76-85. <https://doi.org/10.24018/ejbmr.2024.9.6.2297>

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою в галузі підземної розробки родовищ, зокрема, підвищення стійкості виїмкових виробок, у якій вирішена актуальна наукова задача обґрунтування раціональних параметрів ін'єкційного закріплення порід приконтурного масиву на основі дослідження його геомеханічного стану в зоні впливу геологічних порушень з урахуванням структури масиву та геологічного індексу міцності й трансформації фізико-механічних властивостей порід, зміцнених поліуретановими смолами, для забезпечення стійкості підготовчих та у подальшому очисних виробок.

1. Проведений критичний аналіз наукових праць і встановлено, що питанням ін'єкційного зміцнення тріщинуватих гірських порід присвячено значну кількість досліджень вітчизняних і закордонних вчених. Однак, недостатньо вивченим залишається питання застосування саме випереджального ін'єктування поліуретанових смол безпосередньо у вугільні пласти для забезпечення ефективності їх виймання як у підготовчих, так і очисних вибоях, що визначає актуальність подальших досліджень у цьому напрямку.

2. Розроблено детальну комплексну методику лабораторних досліджень визначення властивостей композитного масиву з фракцій порід та смоли, чисельного моделювання геомеханічного стану масиву з урахуванням ін'єкційного зміцнення при проведенні виїмкових виробок та подальшому веденні очисних робіт і шахтних кернових випробувань для визначення індексу геологічної міцності GSI та досліджень нагнітання поліуретанових смол у зоні геологічного порушення.

3. Встановлені залежності зміни фізико-механічних властивостей композитного матеріалу з різними співвідношеннями жорсткого породного скелету та полімерної матриці з поліуретанової смоли, зокрема, поліноміальний зв'язок з міцністю на стиск і розтяг, експоненційний зв'язок з модулем пружності та лінійний зв'язок зі зчепленням.

4. Досліджено геомеханічний стан масиву зі зниженням геологічного індексу міцності у діапазоні $GSI = 50 - 20$, що імітує входження прохідницького

вибою у зону геологічного порушення, та встановлено порогове значення $GSI \leq 35$, за якого необхідним є термінове застосування ін'єкційного зміцнення масиву поліуретановою смолою.

5. Виявлено стійкий експоненційний кореляційний зв'язок ступеня тріщинної та міжфракційної пустотності для різних літотипів (алевроліт, пісковик) з індексом його геологічної міцності масиву в зонах впливу дрібноамплітудних геологічних порушень для умов розробки запасів шахтного поля ПрАТ «ШУ «Покровське».

6. Встановлено поліноміальні залежності зміни зміщень покрівлі та боків виїмкового штреку залежно від ширини зміцнення приконтурної зони поліуретановою смолою, що дозволяє за технологічними особливостями піддатливості кріплення прогнозувати оптимальну ширину зміцнення.

7. Надано кількісно-якісну геомеханічну оцінку стану приконтурного масиву, зміцненого поліуретановою смолою: при проведенні виїмкового штреку зміцнення боків знижуються у 5 разів, покрівлі – у 2 рази, а в подальшому на сполученні «лава – штрек» – у 2,6 і 3,75 разів відповідно.

8. Обґрунтовано технологічні параметри ін'єкційного закріплення масиву поліуретановим смолами з урахуванням стадії підготовчих та очисних робіт. Очікуваний економічний ефект від застосування ін'єкційного закріплення приконтурного масиву поліуретановою смолою за умов перетинання 3-х небезпечних геологічних порушень з низьким індексом геологічної міцності при підготовці та подальшому веденні очисних робіт склав 64,25 млн грн на 1 виїмковий стовп у порівнянні з традиційною схемою кріплення виїмкових виробок.

Міністерство освіти і науки України
Міністерство енергетики України
НТУ «Дніпровська політехніка»

ПОГОДЖЕНО:

Проректор з наукової роботи,
доктор геологічних наук, професор

_____ І.С. Нікітенко

_____ 2025 р.



ЗАТВЕРДЖЕНО:

Головний виконавчий директор
ПРАТ «ДТЕК Павлоградвугілля»

_____ С.А. Воронін

_____ 2025 р.



**КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ Й
ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОПЕРЕДНЬОГО
ІН'ЄКЦІЙНОГО ЗАКРІПЛЕННЯ ПРИКОНТУРНОГО МАСИВУ
ВИЇМКОВИХ ВИРОБОК ПОЛІУРЕТАНОВИМИ СМОЛАМИ
В УМОВАХ ЗНИЖЕНОЇ СТІЙКОСТІ ТА ТРІЩИНУВАТОСТІ**

Дніпро-2025

УДК 622.841

Комплексна методика розрахунку параметрів й обґрунтування ефективності попереднього ін'єкційного закріплення приконтурного масиву виїмкових виробок поліуретановими смолами в умовах зниженої стійкості та тріщинуватості / Бондаренко В.І., Яковенко В.Г., Сачко Р.М. – Д.: НТУ «ДП», 2025 – 17 с.

Методика є доповненням до чинних нормативних документів і рекомендується до використання при ін'єкційному закріпленні приконтурного масиву виїмкових виробок поліуретановими смолами.

Методика може бути використана науковими співробітниками проєктних і науково-дослідних інститутів гірничодобувної галузі, інженерно-технічними працівниками виробничих об'єднань, а також студентами гірничих ЗВО, інститутів і факультетів.

Друкується за авторською редакцією.

© Бондаренко В.І., Яковенко В.Г., Сачко Р.М.

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Методика розрахунку параметрів завчасного ін'єкційного нагнітання тріщинуватих порід.....	6
2 Методика шахтного експерименту ефективності ін'єкційного закріплення тріщинуватих порід у зоні впливу геологічного порушення.....	9
3 Економічна оцінка ефективності ін'єкційного закріплення приконтурного масиву при веденні підготовчих та очисних робіт.....	12
Висновки.....	16
Перелік використаних джерел.....	17