

ISSN 2415 - 7902

Міністерство освіти і науки України



НАУКОВИЙ ВІСНИК

ДОНЕЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

№ 1(10) 2023

Луцьк, 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ДОНЕЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Всеукраїнський науковий збірник

Виходить 2 рази на рік

Заснований у квітні 2016 року

1(10)'2023

Луцьк - 2023

УДК 62+5+33](045/046)

Друкується за рішенням Вченої ради державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (протокол № 6 від 29.06.2023).

Збірник внесений до “[Переліку наукових фахових видань України](#)“, в яких можуть публікуватися [результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії по спеціальностям: 121 Інженерія програмного забезпечення, 151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології, 184 Гірництво, 263 Цивільна безпека.](#)

Збірник містить наукові статті співробітників ДонНТУ та інших навчальних і наукових закладів України, які є науковими партнерами ДонНТУ. Публікації висвітлюють результати наукових досліджень і розробок в галузях технічних та природничих наук.

Матеріали збірника призначені для наукових співробітників, викладачів, інженерно-технічних працівників, аспірантів та студентів.

Засновник та видавець – Донецький національний технічний університет

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР: *Ляшок Я.О.*, д-р екон. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна).

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА: *Новікова Ю.В.*, канд. фіз.-мат. наук, доц. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна).

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР: *Богомаз О.П.*, д-р. філос.(PhD), доц. каф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна).

АНГЛОМОВНИЙ РЕДАКТОР: *Золотарьова О.В.*, канд. пед. наук, доц.каф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна).

МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Heinrich Stefan, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. (Hamburg University of Technology, Germany);

Kienle Achim, Prof. Dr.- Ing. habil.,Dr. h.c. (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Germany);

Parchański Józef, Prof. Dr.-Ing., Dr.h.c. (Politechnika Śląska, Gliwice, Poland);

Rothermel Kurt, Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. (Universität Stuttgart, Germany).

Tyanev D., Prof., DSc, PhD, Engineer, (Technical University of Varna, Bulgaria);

Wesner Stefan, Prof. Dr.- Ing., Dr. h.c. (Universität Ulm, Germany);

НАЦІОНАЛЬНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Башков Є.О., д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна);

Бачурін Л.Л., канд. техн. наук, доц. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна);

Богомаз О.П., д-р. філос.(PhD), доц. каф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна);

Болібрux Б.В., д-р техн. наук, проф. (Національний університет «Львівська політехніка», Україна);

Вовна О.В., д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна);

Глива В.А., д-р техн. наук, проф. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна);

Гого В.Б., д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна);

Дмитрієва О.А., д-р техн. наук, проф. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна);

Єфремов І.О., д-р техн. наук, доц. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна);

Зорі А.А., д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна);

Ісаєнков О.О., канд. техн. наук, доц. каф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна);

Кіпко О.Е., д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна);

Костенко Т.В., д-р техн. наук, доц. («Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України», Україна);

Кучерук В.Ю., д-р техн. наук, проф. («Вінницький національний технічний університет», Україна);

Негрій С.Г., канд. техн. наук, доц. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна);

Негрій Т.О., канд. техн. наук, доц. (ДВНЗ «Київський національний університет будівництва і архітектури», Україна);

Погорілий С.Д., д-р техн. наук, проф. («Національний університет України ім. Т. Шевченка», Україна);

Подкопась С.В., д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна);
Сагайда П.І., д-р техн. наук, доц. («Донбаська державна машинобудівна академія», Україна);
Сахно І.Г., д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна);
Святний В.А., д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Україна);
Швачич Г.Г., д-р техн. наук, проф. («Національна металургійна академія України», Україна);
Ямненко Ю.С., д-р техн. наук, проф. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна).

Адреса редакції: м. Покровськ, пл. Шибанкова, 2, Україна, 85300.

Збірник зареєстрований в Державному комітеті інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України. Свідоцтво: КВ 21399-11199Р від 09.06.2015.

ЗМІСТ

Беліков А.С., Колесник І.О., Железняков Є.О., Рагімов С.Ю., Крекнін К.А. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ УМОВ МІКРОКЛІМАТУ ПРИ АВАРІЙНИХ ВІДКЛЮЧЕННЯХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З УРАХУВАННЯМ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ БУДИНКІВ	8
Бородіна Н.А., Чеберячко С.І., Дерюгін О.В., Алексєєв А.А. РОЗРОБКА ПРОЦЕДУРИ КЕРУВАННЯ ПСИХОСОЦІАЛЬНИМИ РИЗИКАМИ НА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ	16
Воропаєва В.Я., Лабузова А.М., Жуковська Д.О., А.О.Воропаєва РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ АЛГОРИТМУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО КРИТИЧНОГО СТАНУ ЗДОРОВ'Я ПІДЗЕМНИХ ПРАЦІВНИКІВ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ	28
Гого В.Б., Подкопаєв С.В., Черних Н.С. ОБҐРУНТУВАННЯ КОМПЛЕКСНИХ ЗАХОДІВ ОХОРОНИ ПРАЦІ ШАХТАРІВ ЗА ФАКТОРАМИ ЯКОСТІ РУДНИКОВОГО ПОВІТРЯ	40
Дмитрієва О.А., Гуськова В.Г. ПАРАЛЕЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРУ СИМЕТРИЧНИХ ТЕПЛИЦЕВИХ МАТРИЦЬ З ПЕРЕТВОРЕННЯМИ ЛЕВІНСОНА-ДАРБІНА	53
Журавська Н.Е., Стефанович І.С., Стефанович П.І., Негрій Т.О. ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА У НАФТОГАЗОВІЙ ГАЛУЗІ	63
Заміховський Л.М., Стрілецький Ю.Й., Левицький І.Т., Николайчук М.Я. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОГО БЛОКУ ПІДСИСТЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У СИРОВИНІ НА КОНВЕЄРНІЙ СТРИЦІ З АВТОМАТИЧНИМ ВИЗНАЧЕННЯМ ЇХ КООРДИНАТ	69
Каюн О.П. ВДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБІВ ЗБЕРЕЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБОК З УРАХУВАННЯМ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОХОРОННИХ СПОРУД	81
Косенко А.В., Хорольський А.О., Хоменко О.Є., Кононенко М.М. ГЕОМЕХАНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ ПОТУЖНИХ ТА ВЕЛЬМИ ПОТУЖНИХ ПОКЛАДІВ БАГАТИХ ЗАЛІЗНИХ РУД В УМОВАХ ЗНАЧНИХ ГЛИБИН	91
Мінєєв С.П., Прусова А.А., Янжула О.С., Мінєєв О.С. ДИНАМІКА ЗМІН КОЕФІЦІЄНТА ФОЛЬМЕРІВСЬКОЇ ДИФУЗІЇ МЕТАНУ, АДСОРБОВАНОГО У МІКРОСОРБЦІЙНІЙ СТРУКТУРІ ПРУЖНОЇ ЗОНИ ОПОРНОГО ТИСКУ ВУГІЛЬНОГО ПЛАСТА	105

Петльований М.В., Сай К.С., Борисовська О.О., Хорольський А.А. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ЗАКЛАДНИХ МАСИВІВ У ТЕХНОГЕННИХ ПУСТОТАХ	115
Савченко А.М., Стефанович І.С., Стефанович П.І. ЕКСПЕРТНА ОЦІНКА ВИРОБНИЧОГО ТА ПРОФЕСІЙНОГО РИЗИКУ	127
Сергієнко О.І., Сергієнко Л.В. ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ВИЗНАЧЕННЯ КУТІВ НАХИЛУ ПЛОЩАДКИ РУЙНУВАННЯ ПРИ ОБ'ЄМНОМУ НЕРІВНО- КОМПОНЕНТНОМУ НАВАНТАЖЕННІ	134
Ступак М.В., Поцєпаєв В.В., Григоренко Д.І. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ З ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПІДСТАНЦІЇ 35/10 КВ	144
Ткачук О.М., Гнатюк В.В. ЗІСТАВЛЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОХОРОННИХ СПОРУД ПІДГОТОВЧИХ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК	152
Чепіга Д.А., Левіт В.В., Кіпко О.Е., Гого В.Б., Кружилко О.Є. ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ ЩОДО БЕЗПЕЧНОЇ РОЗРОБКИ КРУТИХ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ	166

CONTENTS

Belikov A., Kolesnyk I., Zhelezniakov Ye., Rahimov S., Kreknin K. THEORETICAL STUDIES OF DETERMINING CRITICAL MICROCLIMATE CONDITIONS IN CASE OF EMERGENCY SHUTDOWN IN HEAT SUPPLY SYSTEMS, TAKING INTO ACCOUNT THE STRUCTURAL FEATURES OF BUILDINGS	8
Borodina N., Cheberiachko S., Deriuhin O., Aleksieiev A. DEVELOPMENT OF PSYCHOSOCIAL RISKS MANAGEMENT PROCEDURE AT INDUSTRIAL ENTERPRISES	16
Voropaieva V., Labuzova A., Zhukovska D., Voropaieva A. DEVELOPMENT AND SIMULATION OF A DECISION-MAKING ALGORITHM REGARDING THE CRITICAL STATE OF HEALTH OF UNDERGROUND COAL MINE WORKERS	28
Gogo V., Podkopaiev S., Chernykh N. JUSTIFICATION OF COMPLEX LABOR PROTECTION MEASURES FOR MINERS BY MINE AIR QUALITY FACTORS	40
Dmytriieva O., Huskova V. PARALLEL DETERMINATION OF THE SPECTRUM OF SYMMETRIC TOEPLITZ MATRIXES WITH LEVINSON-DARBIN TRANSFORMATIONS	53
Zhuravska N., Stefanovych I., Stefanovych P., Nehrii T. ENVIRONMENTAL SAFETY IN THE OIL AND GAS INDUSTRY	63
Zamikhovskiy L., Striletskyi Yu., Nykolaichuk M., Levytskyi I. DEVELOPMENT THE ELECTRONIC UNIT FOR METAL INCLUSIONS IDENTIFICATION SUBSYSTEM IN RAW MATERIALS ON CONVEYOR BELT WITH AUTOMATIC DETERMINATION OF THEIR COORDINATES	69
KAIUN O. IMPROVEMENT OF METHODS OF KEEPING THE STABILITY OF PREPARATORY WORKS TAKING INTO ACCOUNT THE DEFORMATION PROPERTIES OF PROTECTIVE CONSTRUCTIONS	81
Kosenko A., Khorolskyi A., Khomenko O., Kononenko M. GEOMECHANICAL SUBSTANTIATION OF DEVELOPMENT OF THICK AND VERY THICK DEPOSITS OF RICH IRON ORE IN CONDITIONS OF SIGNIFICANT DEPTHS	91
Minieiev S., Prusova A., Yanzhula O., Minieiev O. DYNAMICS OF CHANGES IN THE VOLMER DIFFUSION COEFFICIENT OF METHANE ADSORBED IN THE MICROSORPTION STRUCTURE OF THE RESISTANT PRESSURE ELASTIC ZONE OF A COAL LAYER	105

Petlovanyi M., Sai K., Borysovska O., Khorolskyi A. ANALYSIS OF THE USE OF INDUSTRIAL WASTE FOR THE FORMATION OF BACKFILL MASS IN MAN-MADE VOIDS	115
Savchenko A., Stefanovych I., Stefanovych P. EXPERT ASSESSMENT OF PRODUCTION AND PROFESSIONAL RISK	127
Serhiienko A., Serhiienko L. JUSTIFICATION OF THE METHOD FOR DETERMINING THE ANGLES OF INCLINE OF A DESTRUCTION AREA UNDER A VOLUME UNEQUAL- COMPONENT LOAD	134
M. Stupak, V. Potsepaiev, D. Hryhorenko HARDWARE IMPLEMENTATION OF THE AUTOMATED INFORMATION COLLECTION SYSTEM FROM THE ELECTRICAL SUBSTATION 35/10 KV	144
Tkachuk O., Hnatiuk V. COMPARISON OF DEFORMATION PROPERTIES OF PROTECTIVE STRUCTURES OF PREPARATORY MINING ROADWAYS ON EXPERIMENTAL SAMPLES	152
Chepiga D., Levit V., Kipko O., Gogo V., Kruzhylo O. JUSTIFICATION OF MEASURES REGARDING THE SAFE DEVELOPMENT OF SOLID COAL LAYERS	166

УДК 697.1:621.178:697.34

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-8-15>

А.С. Беліков, І.О. Колесник, Є.О. Железняков, С. Ю. Рагімов, К.А. Крекнін

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ УМОВ МІКРОКЛІМАТУ ПРИ АВАРІЙНИХ ВІДКЛЮЧЕННЯХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З УРАХУВАННЯМ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ БУДИНКІВ

Мета. Аналіз та дослідження визначення критичних умов мікроклімату при аварійних ситуаціях у системах теплопостачання з урахуванням зовнішніх кліматичних умов та конструктивних особливостей будівель, котрі викликані прискоренням та здешевленням процесів будівництва, через впровадження новітніх технологій.

Методика. Теоретичні та експериментальні дослідження на основі фундаментальних знань у галузі теплових процесів та методик вирішення завдань теплообміну, моделювання динамічних процесів, методу та аналізу випадкових процесів, методів математичної статистики та прогнозу.

Результати. На основі проведених досліджень встановлено закономірності впливу навколишнього середовища на підтримання умов мікроклімату приміщень в залежності від конструктивних особливостей будівель та споруд при аварійних ситуаціях в системах теплопостачання. Визначені граничні умови досягнення критичних умов мікроклімату в приміщенні внаслідок аварій в системах теплопостачання, що дозволяє прогнозувати граничні умови ліквідації наслідків аварійних ситуацій і оптимізувати діяльність ремонтно-рятувальних служб, що є особливо важливим у зв'язку із виходом з ладу застарілих систем теплопостачання та бойовими діями на території країни.

Наукова новизна. Визначення закономірностей впливу навколишнього середовища на підтримання умов мікроклімату приміщень в залежності від конструктивних особливостей будівель та споруд при аварійних ситуаціях в системах теплопостачання, що дозволяє керувати режимом теплопостачання для забезпечення необхідних умов мікроклімату в приміщеннях.

Практичне значення. Вдосконалення прогнозування граничних умов ліквідації наслідків аварійних ситуацій в системах теплопостачання дозволить оптимізувати діяльність ремонтно-рятувальних служб, що є особливо важливим у зв'язку із виходом з ладу застарілих систем теплопостачання та бойовими діями на території країни.

Ключові слова: аварійні відключення; мікроклімат; зовнішні кліматичні умови; конструктивні особливості, критичні умови мікроклімату.

Вступ. Встановлено, що умови мікроклімату є основою забезпечення безпеки життєдіяльності в будівлях та спорудах. Головною тенденцією сучасної будівельної галузі є впровадження новітніх технологій, котрі забезпечують прискорення та здешевлення процесів зведення будівель та споруд, внаслідок чого великого поширення отримали нові їх серії [1,5-7,9]. Але цей процес ускладнюється ігноруванням проблеми старіння інфраструктури систем теплопостачання.

Проведений нами аналіз свідчить, що на сьогоднішній день стан систем теплопостачання України є критичним: в більшій частині вони відпрацювали граничний ресурс, частка теплових мереж із строком експлуатації більше 20 років складає 50%, а частка, які відпрацювали нормативний термін 60%. Додатково ситуація ускладнюється через пошкодження інфраструктури систем теплопостачання внаслідок військових дій та введенням режимів регулювання подачі електроенергії в Україні. Це призводить до виникнення аварійних ситуацій та значних порушень теплового режиму в приміщеннях і будівлях, що на невизначений час погіршують умови мікроклімату, аж до досягнення його параметрами екстремальних, небезпечних для життєдіяльності людини значень.

Таким чином питання дослідження критичних умов мікроклімату приміщень при аварійних ситуаціях у системах теплопостачання із урахуванням конструктивних особливостей будинків є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес дослідження умов мікроклімату приміщень потребує врахування, як значного комплексу зовнішніх кліматичних факторів, котрі через огорожувальні конструкції забезпечують взаємодію між замкнутим простором приміщення та навколишнім середовищем, так і архітектурно-планувальних рішень та призначення приміщень.

Як відомо із експлуатаційної практики кутові приміщення та приміщення із великою площею зовнішніх огорожувальних конструкцій, відрізняються значними температурними коливаннями на внутрішній поверхні огорожувальних конструкцій та внутрішнього повітря. Значні температурні коливання створюють несприятливий вплив на самопочуття людей [16-19]. Тому проведення досліджень та визначення коливань $t, ^\circ\text{C}$ температури внутрішньої поверхні огорожувальних конструкцій і $t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$ температури внутрішнього повітряного середовища стало проблемою сьогодення [1-3].

Мета дослідження. Провести теоретичні дослідження визначення критичних умов мікроклімату при аварійних ситуаціях у системах теплопостачання з урахуванням конструктивних особливостей будівель та зовнішніх кліматичних умов.

Методи дослідження. Теоретичні та експериментальні дослідження на основі фундаментальних знань у галузі теплових процесів та методик вирішення завдань теплообміну, моделювання динамічних процесів, методу та аналізу випадкових процесів, методів математичної статистики та прогнозу.

Викладення основного матеріалу. Мікрокліматом приміщення називають стан внутрішнього середовища певного обмеженого простору, що впливає на відчуття комфорту, здоров'я та продуктивність людини й може бути охарактеризований із використанням наступних параметрів: температури повітря та огорожувальних конструкцій, вологості і рухливості повітря [13-15].

Протягом періоду експлуатації приміщення параметри мікроклімату в залежності від впливу зовнішніх кліматичних факторів, теплофізичних характеристик огорожувальних конструкцій та особливостей просторового розташування можуть сягати оптимальних, допустимих та критичних значень. Якщо параметри зовнішнього середовища та теплоакумулювальна здатність огорожувальних конструкцій є відомими, то виникає можливість оптимізувати кількість і якість теплової енергії, необхідної для підтримки всередині будівлі оптимальних параметрів мікроклімату [4-6].

Загалом можна виділити три основні зовнішні кліматичні фактори, що забезпечують основний вплив навколишнього середовища на замкнутий простір приміщень і будівель: фактор температури навколишнього середовища (протягом опалювального періоду), фактор вітрового впливу (з урахуванням розташування будівлі щодо сторін світла) та фактор впливу сонячної радіації (з урахуванням азимуту падіння сонячних променів та орієнтації зовнішніх огорожувальних конструкцій).

При цьому фактор температури навколишнього середовища є єдиним фактором постійної дії, тобто таким фактором чий впливом не можливо знехтувати.

Таким чином при проведенні дослідження визначення критичних умов мікроклімату необхідно враховувати існування чотирьох можливих ситуацій впливу навколишнього середовища на замкнутий простір приміщень і будівель:

Виключний вплив фактору температури навколишнього середовища;

Сумісний вплив фактору температури навколишнього середовища та фактору впливу сонячної радіації;

Сумісний вплив фактору температури навколишнього середовища та фактору вітрового впливу;

Сумісний вплив фактору температури навколишнього середовища, фактору впливу сонячної радіації та фактору вітрового впливу;

Оскільки фактор температури навколишнього середовища є фактором постійної дії і є базовим фактором для всіх вищенаведених ситуацій впливу навколишнього середовища на мікроклімат приміщень, то ми можемо зробити припущення та прийняти першу ситуацію, як базову і в подальшому позначати її як «Б-випадок». Оскільки визначальним фактором, що вирізняє другу ситуацію впливу навколишнього середовища на мікроклімат приміщень від інших є дія фактору сонячної радіації, то і в подальшому будемо позначати її як «С-випадок». Аналогічним чином позначаємо третю ситуацію, як «В-випадок», а четверту – «СВ-випадок».

В результаті досліджень [2,3,11] встановлено, що при забезпеченні нормативного значення повітрообміну приміщень за рахунок зовнішнього повітря в будівлях підтримуються такі вологість і рухливість внутрішнього повітря, які не змінюють визначального впливу температурних показників на теплові умови. Тому при розрахунках забезпеченості теплового режиму можна враховувати тільки температурний фактор мікроклімату.

Таким чином дослідження змін параметрів мікроклімату приміщень житлових будівель, викликаних аварійними ситуаціями та відключеннями систем теплопостачання, при урахуванні конструктивних особливостей будівель та дії зовнішніх кліматичних факторів, складається із наступних кроків:

Визначення та дослідження зміни $t, ^\circ\text{C}$ температури внутрішньої поверхні огорожувальних конструкцій під час аварійних ситуацій та відключень систем теплопостачання протягом опалювального періоду;

Визначення β , год коефіцієнту акумуляції теплової енергії для новітніх та несерійних огорожувальних конструкцій;

Визначення та дослідження зміни $t_b(Z), ^\circ\text{C}$ очікуваної температури внутрішнього повітря приміщень під час аварійних ситуацій та відключень систем теплопостачання протягом опалювального періоду;

Визначення $\Delta t_{\text{пр}}, ^\circ\text{C}$ різниці між $t_b(Z), ^\circ\text{C}$ очікуваною температурою внутрішнього повітря приміщень і $\tau(Z), ^\circ\text{C}$ очікуваною температурою внутрішньої поверхні огорожувальних конструкцій.

Залежність температури $\tau, ^\circ\text{C}$ від заданого часу Z , год [5].

$$\tau(Z) = \frac{v}{v_0} (t_{\text{поч}} - t_{\text{зс}}) + t_{\text{зс}} \quad (1)$$

При цьому під час проведення розрахунків за формулою (1) були зроблені наступні допущення:

для «Б-випадку» температура зовнішньої середи приймається рівною середній місячній температурі опалювального періоду;

для «СВ-випадку» температура зовнішньої середи є сумарною дією середньої місячної температури опалювального періоду, середньомісячної добавки тепла за рахунок сонячної радіації та середньомісячної втрати тепла від вітру;

для «С-випадку» температура зовнішньої середи є сумарною дією середньої місячної температури опалювального періоду та середньомісячної добавки тепла за рахунок сонячної радіації;

для «В-випадку» температура зовнішньої середи визначається є сумарною дією середньої місячної температури опалювального періоду та середньомісячної втрати тепла від вітру.

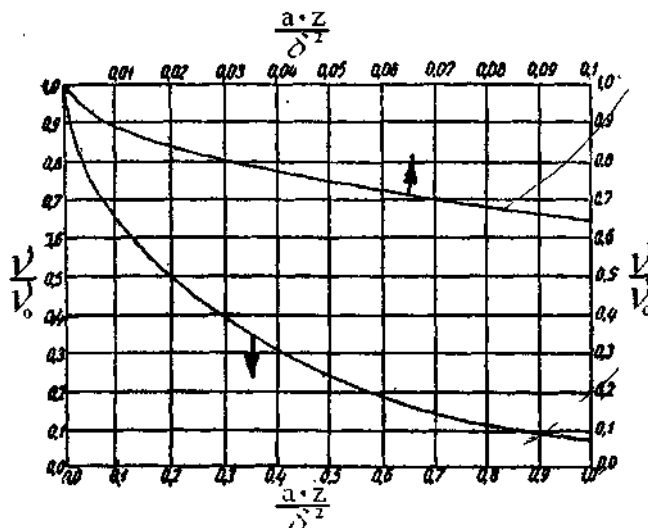


Рисунок 1 – Значення v/v_0 для внутрішньої поверхні стінки при постійній температурі середовища з моменту $Z = 0$.

При дослідженні охолодження внутрішньої поверхні огорожувальних конструкцій значення $t_{\text{поч}}, ^\circ\text{C}$ її температури в момент часу $Z = 0$ визначається за формулою:

$$t_{\text{поч}} = t_g - \frac{(t_g - t_{\text{зс}})}{R_{\Sigma\text{пр}}} R_g \quad (2)$$

Як показав проведений нами аналіз значення коефіцієнту акумуляції теплової енергії $\beta, \text{год}$ є визначеними [9,10, 16] для типових серій житлових будинків, однак ці значення є непридатними для застосування при визначенні зміни параметрів мікроклімату із урахуванням конструктивних особливостей сучасних будівель і споруди, побудованих із використанням новітніх технологій. Тому виникає необхідність визначення нових значень коефіцієнту акумуляції теплової енергії $\beta, \text{год}$ для будівель та споруд, побудованих із використанням новітніх технологій. При чому особливу увагу необхідно приділити конструктивним їх конструктивним особливостям, врахувавши просторове розташування досліджуваних приміщень.

При повному припиненні опалення та відсутності внутрішніх тепловиділень для визначення очікуваної температури внутрішнього повітря, яка встановиться в приміщенні через час Z після порушення нормального теплового режиму визначається за формулою [5]:

$$t_g(Z) = t_{\text{зс}} + (t_g - t_{\text{зс}}) \times e^{-Z/\beta} \quad (3)$$

де $t_{\text{зс}}$ – температура зовнішньої середовища, $^\circ\text{C}$;

t_g – температура внутрішнього повітря до моменту порушення нормального теплового режиму, $^\circ\text{C}$;

Z – кількість часу, що пройшла з моменту порушення нормального теплового режиму, год;

β – коефіцієнт акумуляції теплової енергії, год.

При цьому під час проведення розрахунків за формулою (2) були зроблені наступні допущення:

для «Б-випадку» температура зовнішньої середовища приймається рівною середній місячній температурі опалювального періоду;

для «СВ-випадку» температура зовнішньої середи є сумарною дією середньої місячної температури опалювального періоду, середньомісячної добавки тепла за рахунок сонячної радіації та середньомісячної втрати тепла від вітру;

для «С-випадку» температура зовнішньої середи є сумарною дією середньої місячної температури опалювального періоду та середньомісячної добавки тепла за рахунок сонячної радіації;

для «В-випадку» температура зовнішньої середи визначається є сумарною дією середньої місячної температури опалювального періоду та середньомісячної втрати тепла від вітру.

Висновки. На основі проведених досліджень встановлено закономірності впливу навколишнього середовища на підтримання умов мікроклімату приміщень в залежності від конструктивних особливостей будівель та споруд при аварійних ситуаціях в системах теплопостачання. Визначені граничні умови досягнення критичних умов мікроклімату в приміщенні внаслідок аварій в системах теплопостачання, що дозволяє прогнозувати граничні умови ліквідації наслідків аварійних ситуацій і оптимізувати діяльність ремонтно-рятувальних служб, що є особливо важливим у зв'язку із виходом з ладу застарілих систем теплопостачання та бойовими діями на території країни.

Список літератури

1. Беликов, А. С. Охрана труда на предприятиях строительной индустрии / А. С. Беликов, А. П. Кожушко, В. В. Сафонов. Днепропетровск : ЧП Федоренко А. А., 2010. 528 с.
2. Грудзинский, М. М. Отопительно-вентиляционные системы зданий повышенной этажности / М. М. Грудзинский, В. Н. Ливчак, М. Я. Поз. Москва : Стройиздат, 1982. 256 с.
3. Губернский, Е. Д. Гигиенические основы кондиционирования микроклимата жилых и общественных зданий / Е. Д. Губернский, Е. И. Кореневская. Москва : Медицина, 1978. 192 с.
4. Данилов М. П. Теплоустойчивость зданий в экосистеме «Окружающая среда-здание-человек» (аварийно-дефицитные тепловые режимы, гелио- и ветровые аспекты) / Данилов М. П., Ветвицкий И. Л., Чесанов Л. Г., Колесник И. А. Днепропетровск: «Поліграфіст», 2005 263 с.
5. Исследование влияния теплопроводных включений на параметры микроклимата помещений при отключении системы отопления / И. Л. Ветвицкий, В. Ю. Каспийцева, И. А. Колесник, А. А. Шевченко // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднпр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2013. Вып. 70. С. 65-69.
6. Беликов, А. С. Исследование влияния теплопроводных включений на микроклимат помещений при аварийных ситуациях в системах теплоснабжения/ А. С. Беликов, И. А. Колесник, С. Ю. Рагимов, И. Г. Маладыка, Д. В. Вовк // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднпр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2017. Вып. 98. С. 20-24.
7. Стрежекуров Э. Е. Исследование терморadiационной напряженности в горячих цехах металлургического производства / Э. Е. Стрежекуров, С. В. Гашко // Гигиена и санитария. 1980. Вып. 9. С. 62-64.
8. Табунщиков Ю. А. Строительные концепции зданий XXI века в области теплоснабжения и климатизации / Ю. А. Табунщиков // АВОК. 2005. № 4. С. 4-7.
9. Борхерт Р. Техника инфракрасного нагрева / Р. Борхерт, В. Юбиц. Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. 278 с.
10. Шкловер А. М. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий / А. М. Шкловер, В. Ф. Васильев, Ф. В. Ушаков. Москва : Стройиздат, 1982. 256 с.
11. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Общие требования : стандарт / ГОСТ 12.1.005-88 ; . - Введ.01.01.89 // Система стандартов безопасности труда. М. Ч.1.С.165-239. М.,1996. Изм.1 (ИУС.2000.N9).
12. ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» Вид. офіц. Київ : Міністерство України, 2013. (Державні будівельні норми України). URL : <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1018>
13. ДСТУ Б EN ISO 7730 «Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту» Вид. офіц. Київ : Міністерство України, 2012. (Державні будівельні норми України). URL : http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=28002

14. ДСТУ Б EN 15251 «Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенні до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики». Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2012. (Державні будівельні норми України). URL : http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=28004
15. Кононович Ю. В. Тепловой режим зданий массовой застройки / Ю. В. Кононович. – Москва : Стройиздат, 1986. 158 с.
16. Veronica Lucia Castaldo, Ilaria Pigliautile, Federica Rosso, Anna Laura Pisello, Franco Cotana. Investigation of the impact of subjective and physical parameters on the indoor comfort of occupants: a case study in central Italy. ScienceDirect: web-site. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217336184> (Accessed : 01 September 2020).
17. Kostantinos Gobakis, Dionysia Kolokotsa. Coupling building energy simulation software with microclimatic simulation for the evaluation of the impact of urban outdoor conditions on the energy consumption and indoor environmental quality. ScienceDirect: web-site. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817304735> (Accessed : 01 September 2020).
18. Braian M Beker, Camila Cervellera, Antonella De Vito, Carlos G Musso. Human Physiology in Extreme Heat and Cold. ClinMed International Library: web-site. URL : <https://clinmedjournals.org/articles/iacph/international-archives-of-clinical-physiology-iacph-1-001.php>

References

1. Belikov A.S., Kozhushko A.P., Safonov V.V. *Okhrana truda na predpriyatiyakh stroitel'noy industriyi* [Protection of labour on the enterprises of build industry], 2010, Dnepropetrovsk, UA. (in Russian)
2. Grudzynsky, M. M., Livchak, V.N. and Poz, M. Ya (1982) *Otopstelvo-ventilyatsionnye sistemy zdaniy povyshennoy etazhnosti* [Heating-ventilation systems of buildings of the promoted floor], Stroyizdat, Moscow, SU. (in Russian)
3. Gubernsky Ye.D., Korenevskaya Ye. I. *Gigiyenicheskiye osnovy konditsionirovaniya mikroklimata zhilykh i obshchestvennykh zdaniy* [Hygienic bases of conditioning of microclimate of dwelling and public buildings], 1978, Medicine, Moscow, SU. (in Russian)
4. I. L. Vetvitskiy, V. Y. U. Kaspiytseva, I. A. Kolesnik, A. A. Shevchenko. *Issledovanie vliyaniya teploprovodnykh vkhlyuchenii na parametry mikroklimata pomeshchenii pri otklyuchenii sistemy otopleniya* [Investigation of the influence of heat-conducting inclusions on the parameters of the microclimate of premises when the heating system is turned off]. *Sbornik nauchnykh rabot (Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye)* [Academic Journal (Construction, Materials science, Mechanical Engineering)]. 2013, iss. 70 65–69. (in Russian).
5. Danilov M. P., Vetvitskiy I. L., Chesanov L. G., Kolesnik I. A. Данилов М. П. *Teplovaya ustoychivost' zdaniy v ekosisteme «Sreda-zdaniye-chelovek» (avariyno-defitsitnyye teplovyye rezhimy, solnechnyy i vetrovoy aspekty)* [Thermal stability of buildings in the ecosystem "Environment-building-man" (emergency-deficient thermal regimes, solar and wind aspects)] 2005, Dnipro, 263. (in Russian). (in Russian).
6. Belikov A.S., Kolesnik I. A., Ragimov S. YU., Maladyka I. G., Vovk D. V. *Issledovaniye vliyaniya teploprovodnykh vkhlyucheniy na mikroklimat pomeshcheniy pri avariynnykh situatsiyakh v sistemakh teplosnabzheniya* [Study of the influence of heat-conducting inclusions on the microclimate of premises in emergency situations in heat supply systems.]. *Sbornik nauchnykh rabot (Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye)* [Academic Journal (Construction, Materials science, Mechanical Engineering)]. 2017, iss. 98 20–24. (in Russian).
7. Strezhekurov E. Ye., Gashko S. V. *Issledovaniye termoradiatsionnoy napryazhennosti v goryachikh tsekhakh metallurgicheskogo proizvodstva* [Investigation of thermo-radiation stress in hot shops of metallurgical production]. *Sbornik nauchnykh rabot (Gigiyena i sanitariya)* [Academic Journal (Hygiene and sanitation)]. 1980, iss. 9 62–64. (in Russian).
8. Tabunshchikov YU. A. *Stroitel'nyye kontseptsii zdaniy KHKH' veka v oblasti teplosnabzheniya i klimatizatsii* [Construction concepts for buildings of the XXI century in the field of heat supply and air conditioning]. *Sbornik nauchnykh rabot (ABOK)* [Academic Journal (ABOK)]. 2005, iss. 4 4–7. (in Russian).
9. Borkhert R., Yubits V. *Tekhnika infrakrasnogo nagreva* [Infrared heating technique]. 1963, Gosenergoizdat, Moscow, SU. (in Russian)
10. Shklover A. M., Vasil'yev V. F., Ushakov F. V. *Osnovy stroitel'noy teplotekhniki zhilykh i obshchestvennykh zdaniy* [Fundamentals of building heat engineering for residential and public buildings]. 1982, Stroyizdat, Moscow, SU. (in Russian)
11. GOST 12.1.005-88 *Obshchiye sanitarno-gigiyenicheskiye trebovaniya k vozdukhу rabochey zony*. [GOST 12.1.005-88. General sanitary and hygienic requirements for the air in the working area]. [Valid from 1989-01-01]. Official edition. Moscow. Soviet Union (in Russian).

12. DBN V.2.5-67:2013 *Opalennya, ventylyatsiya ta kondytsionuvannya* [SCN V.2.5-67:2013. Heating, ventilation, air conditioning]. [Valid from 2013-01-01]. Official edition. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2013. (State Building Codes of Ukraine). (in Ukrainian).
13. DSTU B EN ISO 7730 *Erhonomika teplovoho seredovyscha. Analitychne vyznachennya ta interpretatsiya teplovoho komfortu na osnovi rozrakhunkiv pokaznykiv PMV i PPD i kryteriyiv lokal'noho teplovoho komfortu* [DSTU B EN ISO 7730. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria]. [Valid from 2012-01-01]. Official edition. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2012. (State Building Codes of Ukraine). (in Ukrainian).
14. DSTU B EN 15251 *Rozrakhunkovi parametry mikroklimatu prymishchen' dlya proektuvannya ta otsinky enerhetychnykh kharakterystyk budivel' po vidnoshenni do yakosti povitrya, teplovoho komfortu, osviltennya ta akustyky* [DSTU B EN 15251. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics]. [Valid from 2012-01-01]. Official edition. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2012. (State Building Codes of Ukraine). (in Ukrainian).
15. Kononovich YU. V. *Teplovoy rezhim zdaniy massovoy zastroyki* [Infrared heating technique]. 1986, Stroyizdat, Moscow, SU. (in Russian)
16. Veronica Lucia Castaldo, Ilaria Pigliautile, Federica Rosso, Anna Laura Pisello, Franco Cotana. Investigation of the impact of subjective and physical parameters on the indoor comfort of occupants: a case study in central Italy. ScienceDirect: web-site. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217336184> (Accessed : 01 September 2020).
17. Kostantinos Gobakis, Dionysia Kolokotsa. Coupling building energy simulation software with microclimatic simulation for the evaluation of the impact of urban outdoor conditions on the energy consumption and indoor environmental quality. ScienceDirect: web-site. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817304735> (Accessed : 01 September 2020).
18. Braian M Beker, Camila Cervellera, Antonella De Vito, Carlos G Musso. Human Physiology in Extreme Heat and Cold. ClinMed International Library: web-site. URL : <https://clinmedjournals.org/articles/iacph/international-archives-of-clinical-physiology-iacph-1-001.php>

Надійшла до редакції 27..05.2023

A.S. Belikov, I.O. Kolesnyk, Ye.O. Zhelezniakov, S.Yu. Rahimov, K.A. Kreknin

THEORETICAL STUDIES OF DETERMINING CRITICAL MICROCLIMATE CONDITIONS IN CASE OF EMERGENCY SHUTDOWN IN HEAT SUPPLY SYSTEMS, TAKING INTO ACCOUNT THE STRUCTURAL FEATURES OF BUILDINGS

Purpose. Analysis and research of determining critical microclimate conditions in emergency situations in heat supply systems, taking into account external climatic conditions and structural features of buildings, which are caused by the acceleration and cheapening of construction processes thanks to the introduction of the latest technologies.

Methodology. Theoretical and experimental research based on fundamental knowledge in the field of thermal processes and methods of solving heat exchange problems, modelling of dynamic processes, methods and analysis of random processes, methods of mathematical statistics and forecasting.

Results. On the basis of the conducted research, the regularities of the influence of the environment on the maintenance of the microclimate conditions of the premises, depending on the structural features of buildings and structures in emergency situations in heat supply systems, have been established. The limit conditions for achieving critical conditions of the microclimate of premises as a result of accidents in heat supply systems have been determined, which makes it possible to predict the limit conditions for eliminating the consequences of emergency situations and to optimize the activities of repair and rescue services, which are especially relevant in connection with the failure of outdated heat supply systems and combat operations on territory of the country.

Scientific novelty. Determining the patterns of environmental influence on the maintenance of indoor microclimate conditions in connection with the structural features of buildings and structures in emergency situations in heat supply systems, which allows controlling the heat supply mode to ensure certain indoor microclimate conditions.

Practical significance. Improving the forecasting of the limit conditions for liquidation of the consequences of emergency situations in heat supply systems allows optimizing the activities of repair and rescue services, especially in connection with the failure of outdated heat supply systems and combat operations on the territory of the country.

Keywords: emergency shutdown, microclimate, external climatic conditions, structural features, critical microclimate conditions.

Відомості про авторів

Беліков А.С., д.т.н., проф., завідувач кафедри безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. архітектора Олега Петрова, 24-а, м. Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua

Колесник І.О., к.т.н., доц., Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. архітектора Олега Петрова, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: kolesnik.inna@pgasa.dp.ua

Железняков Є.О., аспірант, кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. архітектора Олега Петрова, 24-а, м. Дніпро, Україна, 49005, тел. +380500455122, e-mail: e.zheleznyakov1996@gmail.com

Рагімов С.Ю., к.т.н., доц., кафедра організації і технічного забезпечення аварійно-рятувальних робіт, Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023, тел. +38 (057) 370-50-52, e-mail: sergragimov@ukr.net

Крекнін К.А., к.т.н., асс., кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. архітектора Олега Петрова, 24-а, м. Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua

Belikov A. S., Dr. Sc. (Tech.), Prof., Head of the Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture; 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49600, Ukraine, phone +38 (056) 756-34-73, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua

Kolesnyk I. O., Cand. Sc. (Tech.), Associate Prof., Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning and Heat and Gas Supply, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture; 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: kolesnik.inna@pgasa.dp.ua

Zhelezniakov Ye. O., graduate student, Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture; 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49600, Ukraine, phone +380500455122, e-mail: e.zheleznyakov1996@gmail.com

Ragimov S. Yu., Cand. Sc. (Tech), Assoc. Prof., Department of organization and technical support rescue operations, National University of Civil Defence of Ukraine; Chernyshevskiy Str., 94, Kharkiv, 61023, Ukraine, phone +38 (057) 370-50-52, e-mail: sergragimov@ukr.net

Kreknin K. A., Cand. Sc. (Tech), Assist., Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture; 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49600, Ukraine, phone +38 (056) 756-34-73, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua

УДК 658:382.3: 005.52

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-16-27>

Н.А. Бородіна, С.І. Чеберячко, О.В. Дерюгін, А.А. Алексєєв

РОЗРОБКА ПРОЦЕДУРИ КЕРУВАННЯ ПСИХОСОЦІАЛЬНИМИ РИЗИКАМИ НА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Мета. Розробка процесу керування психосоціальними ризиками в умовах промислового підприємства на основі стандарту ISO 45003:2021 в системі управління охорони здоров'я і безпеки праці.

Методика. Використовуючи системний підхід, який являється формою накладення теорії пізнання і діалектики, для дослідження процесів, що відбуваються в системах управління безпекою праці та здоров'ям працівників, був розроблений метод з оцінки психосоціального ризику, який включає три основні етапи: підготовку (вибір, уточнення опитувальних листів, що враховують особливості конкретної організації), збір інформації про взаємозв'язок між роботою та психічним здоров'ям та аналіз даних щодо психосоціальних ризиків і благополуччя.

Результати. Удосконалено метод "Краватка-метелик" для оцінки психосоціальних ризиків, який відрізняється від відомого - врахуванням сукупності взаємозв'язаних елементів, які представляють вихід (заходи щодо зменшення важкості наслідків та покращення стану здоров'я працівника), вхід (небезпеки) та пов'язані із внутрішнім зовнішнім середовищем (небезпечні психосоціальні чинники, які збільшують вірогідність настання небезпечної події – переживання стресу), зворотний зв'язок (стан здоров'я працівника). Запропонований метод керування психосоціальними ризиками, який передбачає вісім основних кроків: дослідження зовнішнього і внутрішнього середовища, складання анкети-опитувальника визначення впливових небезпечних психосоціальних чинників, проведення оцінювання психосоціальних ризиків, уточнення оцінок, виходячи з рівня індивідуального здоров'я працівників, розробки запобіжних заходів щодо зменшення важкості наслідків та відновлення здоров'я працівників, документування оцінки ризиків та перевірки рівня ризику після запровадження запобіжних заходів. Проведено оцінку психосоціальних ризиків оператора компресорної установки, визначені тринадцять стресорів, які впливають на роботу працівників та запропоновані запобіжні заходи для зменшення рівня стресу.

Наукова новизна. Показано взаємозв'язок між стресогенними чинниками та реакцією працівників з урахуванням індивідуальних особливостей, який враховується при оцінці рівня стресу на четвертому кроці для уточнення оціночних показників.

Практичне значення. Розроблено опитувальник-анкета в якій представлено п'ять груп небезпечних чинників: аспекти організації роботи, соціальні чинники робоче середовище, обладнання, небезпечні завдання з пропозиціями конкретних факторів, які притаманні виробничому процесу.

Ключові слова: психосоціальний ризик, стрес, небезпека виробничого середовища, управлінські рішення

Вступ. У рамках досягнення низки цілей зі сталого розвитку країни та її регіонів, а саме міцне здоров'я та благополуччя, гідна праця та економічне зростання, промисловість, інновації та інфраструктура, відповідальне споживання та виробництво [1], важливу роль за даними Всесвітньої Організації Охорони Здоров'я (далі - ВООЗ), відіграють психосоціальні ризики (далі - ПСР) виробничого процесу. Зокрема ВООЗ відмічає, що наявність занадто великого навантаження і жорстких часових рамок виконання роботи, відсутності підтримки супервайзерів або колег, занадто мала або занадто велика відповідальність, дискримінації або обмеження прав, відсутності поваги по відношенню до працівників і виконуваної ними роботи та інших небезпечних чинників призводить до розвитку психосоматичних хвороб [2]. ВООЗ стверджує, що ПСР найбільше провокують виникнення та розвиток стресу у працівників, знижуючи рівень добробуту останніх. При чому, їх тривалий вплив призводить також до виникнення серйозних психічних захворювань, зокрема депресії. В той же час Міжнародна організація праці (МОП) вказує, що на сучасному етапі розвитку суспільства, стрес є фундаментальною глобальною проблемою, яка впливає на всі аспекти життєдіяльності та благополуччя людини [3]. Крім того, його вплив на індивідів відображається й на фінансово-економічній складовій держав, зокрема через втрати

загальної продуктивності праці. Так, стрес провокує загострення низки хронічних захворювань систем органів людини та призводить до передчасної втрати працездатності [4].

Збільшення інтересу до впливу ПСР в на здоров'я працівників проявилось з появою COVID-19 [5, 6], що спонукало до пришвидження випуску міжнародного стандарту ISO 45003:2021 "Управління охороною здоров'я та безпекою праці. Психологічне здоров'я та безпека на виробництві. Настанови з керування психосоціальними ризиками" ("Occupational health and safety management - Psychological health and safety at work - Guidelines for managing psychosocial risks") в якому зібрані найкращі напрацювання фахівців за останні декілька десятиліть [7]. Зокрема в стандарті показано взаємозв'язок розвитку стресу від організації праці, соціальних факторів, аспектами виробничого середовища, робот технологічного обладнання та небезпечними завданнями, які виконують працівники. Важливим його надбанням являється розуміння, що психологічні небезпеки можуть виникати як самостійно, так і в поєднанні одна з одною. Крім того, найбільші втрати робочого часу відбувається через стан зміни психічного здоров'я, а саме, внаслідок збільшення психофізичного навантаження та відсутності управлінської підтримки від керівництва промислового підприємства. Зараз існує певна кількість інструментів для оцінки рівня ПСР, які здебільшого передбачають використання опитувальників. У цьому вважається, що найефективніший спосіб захисту психічного здоров'я працівників - це як безпосередньо співробітників, і на організаційні чинники (керівництво, клімат у колективі та інших). Однак до їх розробки, визначення кількісних показників впливу ПСР залишається багато питань, тому актуальність даної задачі не викликає сумнівів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для ідентифікації ПСР малі та середні підприємства Великобританії, у яких кількість працівників не перевищує 20 осіб, використовують опитувальник Інституту роботи, здоров'я та організацій (I-WHO) - він спрямований на діагностику "психологічного здоров'я" організації [8]. В Іспанії використовують Метод Istas 21 (CoPsoQ) – опитувальник для оцінки ПСР робітників. Він оцінює взаємозв'язок психосоціальних чинників із задоволеністю роботою, фізичним та психологічним здоров'ям [9]. В даний час для моніторингу працівників широко застосовується Скандинавський опитувальник у Данії, Фінляндії, Ісландії, Норвегії та Швеції. Опитувальник створено з метою оцінки психологічних, соціальних та організаційних умов праці [10]. Він включає психологічні та соціальні фактори робочого процесу: вимоги до посади та контроль з боку керівництва, задоволення роботою, визначеність роботи та відповідність компетенцій для її виконання, соціальні взаємодії з колегами та клієнтами, лідерство, організаційний клімат, межі між роботою та особистим життям, пріоритет роботи, мотивація в роботі. У 2017 р. англійськими дослідниками було запропоновано Керівництво з управління ПСР [11], в якому міститься пам'ятка про права та обов'язки двох сторін - працівника та адміністрації. На відміну від інших методик у цьому посібнику мається на увазі, що ініціатором оцінки соціально-психологічної складової має бути не адміністрація, а працівник. Автори дотримуються думки, що співробітник може самостійно проаналізувати рівень ризиками і вибрати спосіб його мінімізації чи усунення, тобто. самостійно управляти ПСР на робочому місці. Варто зазначити, що дане керівництво має певну перевагу: працівники конкретної галузі краще обізнані про робочі процеси, знають свою індивідуальну межу перенапруги. Однак воно виявиться марним для працівника, який звик до ненормованого і важкого робочого ритму, т.я. він зможе правильно оцінити небезпеку ризику. У такому разі необхідне втручання та перевірка з боку керівництва. Одна з останніх зарубіжних методика управління ПСР пропонує виявляти ризики за допомогою спеціальних кейсів: в експерименті респондентам було запропоновано поміркувати і повідомити про

вирішення конкретної проблеми. Результати експерименту показали, що завдяки кейсам можна розробляти та реалізовувати більш точні заходи щодо управління ПСР [12]. В результаті проведено аналізу різних наукових розробок встановлено особливості побудови та застосування різних опитувальників для визначення впливу ПСР, які призводять до прояву стресу у працівників. Відповідно до прийнятої моделі для оцінки професійного ризику за їх допомогою експерти визначають вірогідність настання небезпечної події та важкість наслідків [13]. Однак зазначені підходи не передбачають можливість відновлення людини після припинення дії стресового чинника, що є необхідним елементом при обрахунку продуктивності праці, виконання планувальних дій з розвитку організації та інше.

Мета статті (постановка завдання). Розробка процесу керування ПСР в умовах промислового підприємства на основі стандарту ISO 45003:2021 в системі управління охорони здоров'я і безпеки праці.

Методи дослідження. В представленому дослідженні було використано аналіз міжнародних прикладів з ідентифікації ПСР на робочих місцях, які проводилися у вигляді побудови відповідних опитувальних листів для визначення найбільш впливових аспектів виробничої діяльності на розвиток стресу у працівників. Також для удосконалення моделі "краватка-метелик" для оцінки ПСР з урахуванням впливу різноманітних психосоціальних чинників використали і системний та ітераційний поетапні підходи. Це дозволило розглядати систему керування ПСР одночасно як єдине ціле, і як підсистему загального порядку управління безпекою праці в організації. Причому с структурування небезпек психосоціального характеру (табл. 1), дозволила проаналізувати взаємозв'язки між стресогеними чинниками та реакцією працівників з урахуванням індивідуальних особливостей в рамках конкретної організаційної структури.

Таблиця 1 – Небезпеки психосоціального характеру

Групи ПСР	Складові психосоціальних небезпек
Аспекти організації роботи	Функції та очікування. Контроль роботи або автономія.
Соціальні чинники	Міжособистісні стосунки. Лідерство. Організаційна культура
Робоче середовище	Умови на робочому місці. Інструменти на робочому місці. Ресурси.
Обладнання	Непридатність обладнання. Надійність обладнання. Ремонт і обслуговування.
Небезпечні завдання	Екстремальні умови. Нестабільна ситуація

Враховуючи, що термін "психосоціальний ризик" визначається, як поєднання ймовірності виникнення пов'язаної з роботою небезпеки психосоціального характеру та тяжкості травми й погіршення здоров'я (ISO 45003:2021), модель "краватка-метелик" можна розглянути як сукупність взаємозв'язаних елементів, які представляють вихід (заходи щодо зменшення важкості наслідків та покращення стану здоров'я працівника), вхід (небезпеки) та пов'язані із внутрішнім зовнішнім середовищем (небезпечні психосоціальні чинники, які збільшують вірогідність настання небезпечної події – переживання стресу), зворотний зв'язок (стан здоров'я працівника) (рис. 1). В свою чергу використовуючи системний підхід, який являється формою накладення теорії пізнання і діалектики, для дослідження процесів, що відбуваються в системах управління безпекою праці та здоров'ям працівників був розроблений метод з оцінки ПСР, який включає три основні етапи: підготовку (вибір, уточнення опитувальних листів, що враховують

особливості конкретної організації), збір інформації про взаємозв'язок між роботою та психічним здоров'ям та аналіз даних щодо ПСР і благополуччя.



Рисунок 1 – Удосконалена модель керування ПСР згідно ISO 45003:2021

Відмінністю запропонованого алгоритму являється оцінка ПСР по наслідкам та по стану здоров'я як суму добутків вірогідності настання небезпечної події та тяжкості наслідків за кожним психосоціальним стресором окремо [14]:

$$R = \sum B_i \times T_i,$$

де R – психосоціальний по наслідкам (по стану здоров'я);

B_i – вірогідність настання небезпечної події під впливом небезпечного психосоціального чинника – i ;

T_i – ступінь тяжкості наслідків під впливом небезпечного чинника – i (чи стан здоров'я працівника).

Виклад основного матеріалу. Запропонований метод керування ПСР передбачає використання алгоритму з восьми основних кроків.

На першому - передбачено дослідження зовнішнього і внутрішнього середовища організації для визначення груп стресогенних чинників, які вривають на психічне здоров'я працівників. Проводимо збір об'єктивної інформації щодо психосоціальних чинників для розробки опитувальника для конкретної організації на основі рекомендації стандарту ISO 45003:2021, з урахуванням особливостей технологічних процедур, наявності шкідливих чинників на виробництві, обліку нещасних випадків та професійних захворювань.

Суб'єктивну інформацію для виявлення джерел ПСР отримуємо під час спостереження за робочим середовищем, виконанням виробничих операцій працівниками, дослідженням організаційної культури, взаємодії між співробітниками, виявленням цінностей в організації та інше. Особливу увагу будемо приділяти групам працівників, які можуть піддаватися підвищеному ризику, наприклад, працівників з обмеженими можливостями, молоді чи працівників у віці. Існуючі дані, зібрані в організації, такі як відсутність хвороби, опитування персоналу, плинність кадрів, направлення з питань гігієни праці та дані про повернення до роботи, можуть допомогти виявити «гарячі точки» або проблемні області.

В результаті проведення даного кроку важливо з'ясувати в яких випадках люди піддаються впливу стресорів на роботі. Це може включати психосоціальні та/або фізичні небезпеки та може мати емоційний, когнітивний, поведінковий та/або фізіологічний характер. Все більше доказів свідчить про те, що коли стресові реакції тривають

протягом тривалого періоду часу, це може призвести до більш стійких, менш оборотних наслідків для здоров'я, таких як: хронічна втома, виснаження, проблеми з опорно-руховим апаратом або серцево-судинні захворювання. Індивідуальні характеристики, такі як особистість, цінності, цілі, вік, стать, рівень освіти та сімейна ситуація, можуть впливати на здатність людини справлятися. Ці характеристики можуть або посилити, або пом'якшити дію факторів ризику на роботі та, у свою чергу, переживання стресу.

На другому кроці формуємо опитувальні анкети в яких зазначаємо групи небезпечних чинників з конкретними психосоціальними факторами, які можуть вплинути на психічне здоров'я працівника. Результатом виконання даного кроку є формування анкети-опитувальника для проведення оцінки ПСР. Приклад опитувальника для ідентифікації ПСР наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Опитувальник для ідентифікації ПСР (фрагмент)

№.	Небезпечні чинники	Так	Іноді	Ні
I.	Аспекти організації роботи	Психосоціальні чинники		
1	Чи надана працівникам вся необхідна інформація щодо виконання роботи та робочих процедур?	☐	☐	☐
2	Чи не забагато інформації надається працівнику, яку він не може осягнути чи запам'ятати?	☐	☐	☐
3	Чи відомі працівникам їх ролі та обов'язки?	☐	☐	☐
4	Чи можуть при виконанні роботи часто виникати непередбачувані чи не заплановані ситуації?	☐	☐	☐
5	Чи існують суперечливі вимоги до працівників?	☐	☐	☐
6	Чи зрозуміла працівникам специфікація роботи?	☐	☐	☐
7	Чи можуть співробітники впливати на методи, за допомогою яких вони виконують свої робочі завдання?	☐	☐	☐
9	Чи існує жорсткий контроль над робочим навантаженням?	☐	☐	☐
10	Чи часто працівників відволікають від виконання їх основних обов'язків?	☐	☐	☐

На третьому кроці проводимо аналіз ПСР від впливу всіх небезпечних чинників, за прийнятною шкалою (див. таблиці 3). Розглядаємо дві ситуації ризик по тяжкості наслідків від дії стресогенних чинників й ризик по відновленню здоров'я. Під час оцінювання намагаємось знайти відповіді на такі питання: наскільки ймовірно, що небезпека завдає шкоди (наприклад, кількість людей, які повідомляють про велике робоче навантаження, відсутність підготовки для виконання роботи тощо); наскільки серйозною може бути ця шкода (наприклад, чи існує зв'язок між великим навантаженням на роботі та відсутністю хвороби чи скаргами на здоров'я); як часто (і скільки) працівників піддаються ПСР.

Таблиця 3 – Матриця для оцінки ПСР

Матриця ризиків для оцінки розумового навантаження			Значення рівня ризику:
1	2	3	< 60 - прийнятний
1	2	3	60-90 - прийнятний з перевіркою
2	4	6	
3	6	9	> 90 - неприйнятний

На четвертому кроці проводимо інтерпретацію отриманих даних для виявлення взаємозв'язку між ПСР – психосоціальними чинниками й рівнем індивідуального здоров'я, мотивацією, можливостями, досвідом, що дозволяє визначити рівень психічного напруження (коротко строкове, довгострокове) та провести уточнення оціночних показників ПСР.

На п'ятому і шостому кроці проводимо розробку запобіжних заходів, які стосуються зменшенню тяжкості наслідків і відновленню здоров'я працівника. Загалом виділяють три рівні заходів, щодо захисту від стресу працівника (табл. 4, 5). В якості прикладів, до них включають: навчання стресу з метою допомогти працівникам розпізнати симптоми та зменшити стигматизацію, або навчання управлінню стресом.

Заходи третього рівня описують як реактивні заходи, оскільки вони розглядаються як лікувальний підхід до управління стресом для тих осіб, які страждають від слабкого здоров'я внаслідок стресу. Цей підхід спрямований на мінімізацію наслідків проблем, пов'язаних зі стресом, після того, як вони виникли, через управління та лікування симптомів професійного захворювання чи хвороби. У разі неприйняттого рівня ПСР повертаємось на етап аналізу ризику з пропозиціями запобіжних заходів щодо його зменшення і далі знову працюємо відповідно до алгоритму. **На сьомому кроці** проводимо документування рівнів ПСР. На останньому кроці перевіряємо дієвість розроблених запобіжних заходів, в тому числі можлива повторна оцінка ПСР.

Таблиця 4 – Рекомендації з визначення імовірності небезпечної події та наслідків щодо здоров'я працівників

Вірогідність небезпечної події (B_i)			
Малоймовірно, але небезпечна подія може відбутися протягом певного строку	Імовірно, небезпечна подія відбувається кілька разів протягом певного строку		Висока, небезпечна подія відбувається часто протягом певного строку
Наслідки			Тип наслідків
Виникнення помилок при виконанні роботи, які призводять до роздратування, напруження, нарікання керівництва, підвищення напруги в організмі без шкоди для здоров'я (майже випадковість)	Виникнення помилок, до стресового навантаження, яке характеризується підвищенням артеріального тиску, частоти серцевих скорочень призводять, нервування Агресія, можливі прояви болю в деяких органів тіла (лікарняний лист понад до 10 днів)	Високий рівень помилок, які призводять до значних стресового навантаження, яке викликає соматичні захворювання, гіпертонічну хворобу, виразку шлунку та можуть закінчитись інвалідністю (лікарняний лист більше місяця, або інвалідність, або смерть). Депресія, важкі стани психічного здоров'я, можливі довгострокові проблеми зі здоров'єм. Значна шкода здоров'ю, яке складно відновлюється.	Тяжкість психологічної травми (TH_i)
Стан здоров'я працівника після лікування			
Швидке відновлення психічного здоров'я без наслідків на фізичному рівні	Поступове відновлення психічного здоров'я із використанням седативних.	Повільне відновлення психічного здоров'я, з остаточними наслідками на фізичному рівні, виникнення	Ступінь відновлення здоров'я ($B3_i$)

	консультацій у психотерапевта, профільних лікарів, без наслідків.	соматичних хвороби, які потребують довготривалого відновлення	
--	---	---	--

Наведемо приклад, оцінки ПСР машиніста компресорної установки при різному характеру. До особливостей його роботи слід віднести керування технологічним обладнанням на основі моніторингу за основними параметрами компресору з можливістю мінімізації енергетичних витрат. Оператор також повинен забезпечити контроль за робочою зоною для перевірки й регулювання продуктивності, для розвантаження при пуску і зупинці, функціонування аварійного захисту для забезпечення безпеки роботи. До компетенцій оператора слід віднести розуміння графічної сигналізації на панелі компресора із забезпечення раціонального режиму функціонування та швидке реагування на аварійні ситуації. До вимог оператора компресорної установки відносять здатність до використання основних методів та засобів управління, зв'язку за результатами моніторингу технологічних параметрів компресора і виробничого завдання, а також здатність до оцінювання ПСР виникнення та впливу надзвичайних ситуацій та ризиків при функціонуванні компресорних установок. Необхідно відмітити, що оператор компресорної установки повинен знати кінематичні схеми обслуговуваних компресорів, способи запобігання та усунення неполадок у роботі компресорів і двигунів. Відмітимо, що фізичними стресорами в компресорних приміщеннях слід віднести шум, наявність електромагнітних полів, частинок масляного аерозолі та недостатній рівень освітлення. В результаті проведеного дослідження внутрішнього і зовнішнього середовища, виявлення змісту роботи, навантаження, розкладу, рівня контролю, між особистих стосунків був сформований опитувальник-анкета з тринадцяти небезпечних чинників (табл. 6), які характерні виконанню виробничого завдання машиніста компресорної установки.

Таблиця 5 – Визначення та опис захисних дій для боротьби зі стресом

Рівень захисних заходів	Цілі заходів	Приклади запобіжних заходів
1 рівень: Профілактичні заходи - зі зниження вірогідності настання небезпечної події	Стресори (їх джерело): вимоги до працівника, компетенції, стосунки між колегами, рівень контролю за виробничими операціями	Зниження вірогідності настання небезпечної події: перепланування роботи, зменшення навантаження, покращення спілкування, розвиток навичок управління конфліктами та ін.
2 рівень: Заходи зі зниження ступеня тяжкості настання небезпечної події	Реакція співробітників на стресори (уявний стрес або напруга), підтримка керівництва, колег.	Зниження ступеня тяжкості настання небезпечної події: когнітивно-поведінкова терапія, курси подолання та управління гнівом та ін.
3 рівень: реактивні заходи - Заходи з відновлення фізичного чи психологічного стану працівника.	Короткочасний і тривалий несприятливий вплив роботи на здоров'я	Відновлення фізичного чи психологічного стану працівника: програми повернення до роботи, трудотерапія, медичне втручання у стрес.

Розроблені анкети були надані п'яти працівникам, які задіяні обслугованим компостерної установкою для визначення важливості зазначених чинників на їх психічне здоров'я. За результатами анкетування та виявленими стресорами, які показали найбільшу кількість позитивних відповідей провели оцінку визначення рівня стресу, а також рівня відновлення здоров'я (табл. 7) з подальшим аналізом результативності запобіжних заходів.

Таблиця 6 – Результати дослідження робочого місця машиніста компресорної установки

№	Небезпечні психосоціальні чинники	Відсоток позитивних відповідей, %		
		Так	Іноді	Ні
I.	Аспекти організації роботи			
1.1	Наскільки складні вимоги до працівників?	20	70	10
1.2	Важливість компетенцій працівника?	50	40	10
1.3	Чи існує підтримка з боку керівництва?	30	40	30
II	Особливості соціального клімату			
2.1	Чи доброзичливі стосунки між колегами?	40	40	20
2.2	Наявність несприятливих факторів	60	20	20
III.	Робоче середовище			
3.1	Чи існує контроль за виробничими показниками?	80	20	0
3.2	Чи заважають фізичні чинники?	70	20	10
3.3	Чи відповідна ергономіка робочого місця?	40	30	40
V.	Обладнання			
4.1	Чи часто відбуваються зміни на виробництві?	50	30	20
4.2	Чи присутні наявні захисні засоби?	70	20	10
4.3	Наявне аварійне відключення обладнання?	80	10	10

Таблиця 7 – Результати оцінки ПСР

Небезпе	Небезпечний чинник	Тяжкість психологічної травми			Ступінь відновлення здоров'я			Рівень ризику	Заходи
		В	Н	Р	В	Н	Р		
Виникнення стресової ситуації	Вимоги до працівників	3	3	9	2	3	6	не прийнятний	Переглянути кількість годин необхідних для безпечного виконання складних завдань.
	Компетенції працівника	3	3	9	3	3	9	не прийнятний	Збільшити кількість занять із стресостійкості
	Підтримка з боку керівництва	3	3	9	2	3	6	не прийнятний	Запровадити комітети з безпеки для обговорення ініціатив працівників щодо підвищення безпеки
	Стосунки між колегами	2	3	6	3	3	9	не прийнятний	Створення коворкінг-центрів для зустрічей і обговорення поточних проблем з працівниками
	Наявність несприятливих факторів	2	3	6	3	3	9	не прийнятний	Проведення корпоративних навчань щодо командної роботи, особистої відповідальності.
	Контроль за виробничими показниками	2	3	6	3	3	9	не прийнятний	Застосувати ІТ-системи для збору важливої інформації
	Фізичні чинники	3	3	9	2	3	6	не прийнятний	Проводити періодично атестацію робочих місць.
	Ергономіка робочого місця	3	3	9	3	3	9	не прийнятний	Проводити аналіз ергономіки робочого місця.
	Зміни на виробництві	2	3	6	3	3	9	не прийнятний	Розробити інструкцію (настанову) щодо дій при змінах
	Наявні захисні засоби	2	3	6	3	3	9	не прийнятний	Провести аналіз адекватності існуючих захисних засобів обладнання
	Аварійне відключення обладнання	3	3	9	2	3	6	не прийнятний	Провести аналіз наявності кнопки аварійного відключення кожної одиниці обладнання.
Всього балів:		96			116			не прийнятний	

Все більше доказів свідчить про те, що коли стресові реакції тривають протягом тривалого періоду часу, це може призвести до більш стійких, менш оборотних наслідків для здоров'я.

Таких як хронічна втома, виснаження, проблеми з опорно-руховим апаратом або серцево-судинні захворювання. Індивідуальні характеристики, такі як особистість, цінності, цілі, вік, стать, рівень освіти та сімейна ситуація, можуть впливати на здатність людини справлятися. Ці характеристики можуть або посилити, або пом'якшити дію факторів ПСР на роботі та, у свою чергу, переживання стресу.

Висновки.

1. Удосконалено метод краватка-метелик для оцінки психосоціальних ризиків, який відрізняється від відомого врахуванням сукупності взаємозв'язаних елементів, які представляють вихід (заходи щодо зменшення важкості наслідків та покращення стану здоров'я працівника), вхід (небезпеки) та пов'язані із внутрішнім зовнішнім середовищем (небезпечні психосоціальні чинники, які збільшують вірогідність настання небезпечної події – переживання стресу), зворотний зв'язок (стан здоров'я працівника).

2. Запропонований метод керування психосоціальними ризиками, який передбачає вісім основних кроків: дослідження зовнішнього і внутрішнього середовища, складання анкети-опитувальника визначення впливових небезпечних психосоціальних чинників, проведення оцінювання психосоціальних ризиків, уточнення оцінок, виходячи з рівня індивідуального здоров'я працівників, розробки запобіжних заходів щодо зменшення важкості наслідків та відновлення здоров'я працівників, документування оцінки ризиків та перевірки рівня ризику після запровадження запобіжних заходів.

3. Розробний опитувальник-анкета в якій представлено п'ять груп небезпечних чинників: аспекти організації роботи, соціальні чинники робоче середовище, обладнання, небезпечні завдання з пропозиціями конкретних факторів, які притаманні виробничому процесу.

4. Проведено оцінку психосоціальних ризиків оператора компресорної установки, визначені тринадцять стресорів, які впливають на роботу працівників та запропоновані запобіжні заходи для зменшення рівня стресу.

5. Показано взаємозв'язок між стресогеними чинниками та реакцією працівників з урахуванням індивідуальних особливостей, який враховується при оцінці рівня стресу на четвертому кроці для уточнення оціночних показників.

Список літератури

1. Указ Президента України "Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року" від 30.09.2019 №722/2019. Режим доступу: <https://ips.ligazakon.net/document/MN022183>.
2. Tsopa, V.A., Cheberichko, S.I., Yavorska, O.O., Deryugin, O.V. & Aleksieiev, A.A. (2022). Improvement of the safe work system. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 104-111. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/104>.
3. Tsopa V., Cheberichko S., Yavorska O., Deryugin O., Bas I. (2022). Increasing the safety of the transport process by minimizing the professional risk of a dump truck driver. *Mining of mineral deposits*, 16(3), 101-108. <https://doi.org/10.33271/mining16.03.101>.
4. Іванцев, Л., & Іванишин, Т. (2019). Психологічні чинники виникнення особистісної тривожності у студентської молоді. *Філософські і психологічні науки. Серія "Психологія"*, 22, 76-82. <https://doi.org/10.15330/vpufpn.22.76-82>.
5. Workplace Stress: A collective challenge, Geneva, 2016. Режим доступу: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_protect/---protrav/-safework/documents/publication/wcms_466547.pdf.
6. Weinberg, A., Sutherland, V.J., & Cooper, C. (2010). Organizational Stress Management. A Strategic Approach. *Palgrave Macmillan London*, 309 p. ISBN 978-0-230-20393-8. <https://doi.org/10.1057/9780230203938>.

7. Mahmood, A., Khan, S.H., & Bano, S. (2021). Predictors of Occupational Stress in Manufacturing Industries. *Journal of Management Practices, Humanities and Social Sciences*, 5(3), 35-42. <https://doi.org/10.33152/jmphss-5.3.4>.
8. Guillemin, M.P. (2021). New Avenues for Prevention of Work-Related Diseases Linked to Psychosocial Risks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21), 11354. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111354>.
9. Loo, M.K., Amin, S.M., & Abd Rahman, N.S. (2015). The sources and the impacts of occupational stress among manufacturing workers. *International Journal of Current Research and Academic Review*, 2, 166-173. Режим доступу: <http://www.ijcrar.com/special/2/M.K.Loo,%20et%20al.pdf>.
10. Girma, B., Nigussie, J., Molla, A., & Mareg, M. (2021). Occupational stress and associated factors among health care professionals in Ethiopia: a systematic review and meta-analysis. *BMC Public Health*, 21, 539. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-10579-1>.
11. Antony, J., Brar, R., Khan, P.A., Ghassemi, M., Nincic, V., Sharpe, J.P., Straus, S.E., & Tricco, A.C. (2020). Interventions for the prevention and management of occupational stress injury in first responders: a rapid overview of reviews. *Systematic Reviews*, 9, 121. <https://doi.org/10.1186/s13643-020-01367-w>.
12. Bernal, D., Campos-Serna, J., Tobias, A., Vargas-Prada, S., Benavides, F.G., & Serra, C. (2015). Work-related psychosocial risk factors and musculoskeletal disorders in hospital nurses and nursing aides: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Nursing Studies*, 52, 635-48. <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2014.11.003>.
13. Murat, M., Köse, S., & Savaşer, S. (2021). Determination of stress, depression and burnout levels of front-line nurses during the COVID-19 pandemic. *International Journal of Mental Health Nursing*, 30, 533-43. <https://doi.org/10.1111/inm.12818>.
14. Labrague, L.J., & De Los Santos, J.A.A. (2020). COVID-19 anxiety among front-line nurses: Predictive role of organisational support, personal resilience and social support. *Journal of Nursing Management*, 28, 1653-1661. <https://doi.org/10.1111/jonm.13121>.

References

1. Decree of the President of Ukraine "On the Sustainable Development Goals of Ukraine for the period until 2030" dated September 30, 2019 No. 722/2019. Retrieved from: <https://ips.ligazakon.net/document/MN022183>. (In Ukrainian)
2. Tsopa, V.A., Cheberiyachko, S.I., Yavorska, O.O., Deryugin, O.V. & Aleksieiev, A.A. (2022). Improvement of the safe work system. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 104-111. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/104>.
3. Tsopa V., Cheberiyachko S., Yavorska O., Deryugin O., Bas I. (2022). Increasing the safety of the transport process by minimizing the professional risk of a dump truck driver. *Mining of mineral deposits*, 16(3), 101-108. DOI: 10.33271/mining16.03.101..
4. Ivantsev, L., & Ivanyshyn, T. (2019). Psychological factors of emergence of personal anxiety of students. *Philosophy and Psychology. Series Psychology*, 22, 76-82. <https://doi.org/10.15330/vpufpn.22.76-82>. (In Ukrainian)
5. Workplace Stress: A collective challenge, Geneva, 2016. Режим доступу: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_protect/---protrav/---safework/documents/publication/wcms_466547.pdf.
6. Weinberg, A., Sutherland, V.J., & Cooper, C. (2010). Organizational Stress Management. A Strategic Approach. *Palgrave Macmillan London*, 309 p. ISBN 978-0-230-20393-8. <https://doi.org/10.1057/9780230203938>.
7. Mahmood, A., Khan, S.H., & Bano, S. (2021). Predictors of Occupational Stress in Manufacturing Industries. *Journal of Management Practices, Humanities and Social Sciences*, 5(3), 35-42. <https://doi.org/10.33152/jmphss-5.3.4>.
8. Guillemin, M.P. (2021). New Avenues for Prevention of Work-Related Diseases Linked to Psychosocial Risks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21), 11354. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111354>.
9. Loo, M.K., Amin, S.M., & Abd Rahman, N.S. (2015). The sources and the impacts of occupational stress among manufacturing workers. *International Journal of Current Research and Academic Review*, 2, 166-173. Режим доступу: <http://www.ijcrar.com/special/2/M.K.Loo,%20et%20al.pdf>.
10. Girma, B., Nigussie, J., Molla, A., & Mareg, M. (2021). Occupational stress and associated factors among health care professionals in Ethiopia: a systematic review and meta-analysis. *BMC Public Health*, 21, 539. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-10579-1>.

11. Antony, J., Brar, R., Khan, P.A., Ghassemi, M., Nincic, V., Sharpe, J.P., Straus, S.E., & Tricco, A.C. (2020). Interventions for the prevention and management of occupational stress injury in first responders: a rapid overview of reviews. *Systematic Reviews*, 9, 121. <https://doi.org/10.1186/s13643-020-01367-w>.
12. Bernal, D., Campos-Serna, J., Tobias, A., Vargas-Prada, S., Benavides, F.G., & Serra, C. (2015). Work-related psychosocial risk factors and musculoskeletal disorders in hospital nurses and nursing aides: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Nursing Studies*, 52, 635-48. <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2014.11.003>.
13. Murat, M., Köse, S., & Savaşer, S. (2021). Determination of stress, depression and burnout levels of front-line nurses during the COVID-19 pandemic. *International Journal of Mental Health Nursing*, 30, 533-43. <https://doi.org/10.1111/inm.12818>.
14. Labrague, L.J., & De Los Santos, J.A.A. (2020). COVID-19 anxiety among front-line nurses: Predictive role of organisational support, personal resilience and social support. *Journal of Nursing Management*, 28, 1653-1661. <https://doi.org/10.1111/jonm.13121>.

Надійшла до редакції 04.04.2023

N. Borodina, S. Cheberiyachko, O. Deriuhin, A. Aleksiev

DEVELOPMENT OF PSYCHOSOCIAL RISKS MANAGEMENT PROCEDURE AT INDUSTRIAL ENTERPRISES

Purpose. Development of the process of managing psychosocial risks in the conditions of an industrial enterprise based on the ISO 45003:2021 standard in the occupational health and safety management system.

Methodology. Using a systematic approach, which is a form of superimposition of the theory of cognition and dialectics, to study the processes taking place in the management systems of occupational safety and health of employees, a method for assessing psychosocial risk has been developed, which includes three main stages: preparation (selection, clarification of questionnaires letters that take into account the specifics of a specific organization), collection of information on the relationship between work and mental health and analysis of data on psychosocial risks and well-being.

Research results. The "Bowtie" method for assessing psychosocial risks has been improved, which differs from the known one by taking into account the set of interconnected elements that represent the output (measures to reduce the severity of the consequences and improve the health of the employee), input (dangers) and related with the internal and external environment (dangerous psychosocial factors that increase the probability of the occurrence of a dangerous event - experiencing stress), feedback (employee's state of health). The proposed method of managing psychosocial risks, which involves eight main steps: researching the external and internal environment, drawing up a questionnaire to determine the influential dangerous psychosocial factors, conducting an assessment of psychosocial risks, clarifying assessments based on the level of individual health of employees, developing preventive measures to reduce the severity of the consequences and the recovery of workers' health, documenting the risk assessment and verifying the level of risk after the introduction of preventive measures. An assessment of the psychosocial risks of the compressor plant operator has been carried out, thirteen stressors that affect the activity of workers have been identified, and the preventive measures to reduce the stress level have also been proposed.

Scientific novelty. The relationship between stressful factors and the reaction of employees, taking into account individual characteristics, is shown, which is taken into account when assessing the level of stress in the fourth step to refine the evaluation indicators.

Practical significance. A questionnaire which presents five groups of dangerous factors, namely: aspects of work organization, social factors, working environment, equipment, dangerous tasks with suggestions of specific factors inherent in the workflow, has been developed.

Keywords: psychosocial risk, stress, danger of the production environment, management decisions.

Відомості про авторів.

Бородіна Наталія Анатоліївна, доктор технічних наук, професор кафедри державного управління у сфері цивільного захисту, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, м. Київ, Україна; ignsborodina@gmail.com.

Чеберячко Сергій Іванович, доктор технічних наук, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна; sicheb@ukr.net.

Дерюгін Олег Валентинович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління на транспорті, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна; deryugin_o@ukr.net.

Алексєєв Анатолій Анатолійович, аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна; anatoliialeksieiev@gmail.com.

Borodina Nataliia, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Public Administration in the Field of Civil Protection, Institute of Public Administration and Scientific Research in Civil Protection, Kyiv, Ukraine; ignsborodina@gmail.com.

Cheberiachko Serhii, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Labor Safety and Civil Security, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine; sicheb@ukr.net.

Deriuhin Oleh, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Transport Management, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine; deryugin_o@ukr.net.

Aleksieiev Anatolii, Postgraduate student, Department of Labor Safety and Civil Security, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine; anatoliialeksieiev@gmail.com.

УДК 001.53 + 681.5.017

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-28-39>**В.Я. Воропаєва, А.М. Лабузова, Д.О. Жуковська, А.О. Воропаєва****РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ АЛГОРИТМУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО КРИТИЧНОГО СТАНУ ЗДОРОВ'Я ПІДЗЕМНИХ ПРАЦІВНИКІВ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ**

Актуальність. На сьогоднішній день відсутність оперативного контролю за здоров'ям та місцезнаходженням гірників унеможливує прийняття відповідних управлінських рішень у разі критичних ситуацій. Запропонований алгоритм дозволить у режимі реального часу відстежувати розташування гірників та надавати індивідуальну інформацію про показники їх фізичного стану, такі як температура тіла, пульс та тиск. Це надає можливість оперативно реагувати на потенційні небезпечні ситуації та здійснювати відповідні заходи.

Мета. Підвищення ефективності управлінських рішень щодо безпеки підземних робітників вугільних шахт шляхом розробки алгоритму прийняття рішень про критичний стан здоров'я шахтаря.

Результати. В роботі вирішено комплексну задачу розробки та моделювання алгоритму прийняття рішень про стан здоров'я та індивідуальні показники життєдіяльності гірників у режимі реального часу: обґрунтовано перелік показників для моніторингу та виконано ранжування їх рівнів; обрано технічні засоби моніторингу; розроблено правила нечіткої логіки та алгоритм прийняття рішення про критичність стану здоров'я підземного робітника; виконано моделювання алгоритму.

Наукова новизна. Новизна роботи полягає у розробці алгоритму, що поєднує у собі моніторинг місцезнаходження та індивідуальних показників життєдіяльності шахтарів та прийняття рішень про їх фізичний стан.

Практична значимість. Запропоновані в роботі підходи можуть бути впроваджені в існуючі системи оперативно-диспетчерського управління вугільних підприємств та дозволяють відслідковувати виникнення критичних станів здоров'я робітників.

Ключові слова. Вугільна шахта, прийняття рішень, автоматизоване керування, моніторинг, показники життєдіяльності, шахтар, диспетчер, передача даних.

Вступ. Питання безпеки підземних робітників вугільних шахт є одним з основних при організації діяльності вуглевидобувних підприємств [1]. Робота гірників відноситься до вкрай небезпечних професій, адже підземний працівник кожен день стикається з потенційними ризиками для життя та здоров'я. Згідно з офіційними даними Фонду соціального страхування України [2], у 2022 році зареєстровано 4 877 (з них 437 - смертельно) потерпілих від нещасних випадків/гострих професійних захворювань на виробництві, на яких складено акти за формою Н-1/П. При чому значна кількість страхових нещасних випадків, по яких складено акти за формою Н-1/П, пов'язані з виробництвом, сталась на підприємстві ПАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» (132 страхові нещасні випадки). Добувна промисловість і розроблення кар'єрів відносяться до основних травмонебезпечних галузей економіки – кількість травмованих складає 12,1% від загальної кількості травмованих по Україні, а вугільні шахти залишаються підприємствами з найбільшим рівнем травматизму.

«Створення системи заходів щодо безпечної діяльності» є однією з основних вимог до проведення гірничих робіт згідно ст. 18 Гірничого закону України [3]. Тому сучасні вугільні підприємства впроваджують передові технології з використанням автоматизації та ІТ на усіх етапах виробництва, приділяючи значну увагу питанням оперативно-диспетчерського управління [4]. Зокрема, широко впроваджуються в Україні та світі автоматизовані підсистеми моніторингу та контролю технологічних показників видобувних забоїв вугільних шахт, які дозволяють точно визначити місцеположення працівника в тривимірному просторі, що є важливою складовою для безпеки та управління ризиками у випадку надзвичайних ситуацій або швидкого реагування на

зміни у середовищі [5]. Проте проблема моніторингу та контролю в реальному часі за показниками життєдіяльності гірників залишається невирішеною. На сьогоднішній день основним засобом контролю за станом здоров'я гірників є проходження щорічного медичного огляду та перевірка окремих показників перед спуском у шахту [6]. Однак цей метод не забезпечує оперативного моніторингу та контролю і не надає достатньо повної інформації про стан здоров'я підземного робітника, що досить важливо як при штатному режимі роботи вугільного підприємства, так і під час аварійних ситуацій. Крім того, місцезнаходження шахтарів не завжди визначається в режимі реального часу та з потрібною точністю. Отже, відсутність оперативного контролю за здоров'ям та місцезнаходженням гірників унеможливорює прийняття відповідних управлінських рішень у разі критичних ситуацій.

Таким чином, розробка та моделювання алгоритму прийняття рішень щодо критичного стану здоров'я підземних працівників вугільних шахт сприятиме зменшенню наслідків аварійних ситуацій та покращенню безпеки праці в шахті.

Постановка задачі дослідження. У сучасних шахтах, де працюють тисячі гірників, важливо мати змогу оперативно відслідковувати місцезнаходження та показники життєдіяльності кожного окремого робітника. Моніторинг в реальному часі таких параметрів, як температура тіла, пульс та тиск, може свідчити про стан здоров'я гірника і допомогти виявити і відповідно відреагувати на потенційно небезпечні ситуації, як при штатному режимі роботи вугільного підприємства, так і під час аварій.

Метою дослідження є підвищення ефективності управлінських рішень щодо безпеки підземних робітників вугільних шахт шляхом розробки алгоритму прийняття рішень про критичний стан здоров'я шахтаря.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- вибрати та обґрунтувати перелік показників для моніторингу;
- визначитися з нормальними, допустимими та критичними рівнями показників;
- запропонувати технічні засоби моніторингу;
- розробити правила нечіткої логіки та алгоритм прийняття рішення про критичність стану здоров'я;
- виконати моделювання алгоритму.

Показники стану здоров'я підземного робітника. До об'єктивних показників фізичного стану людини прийнято відносити [7]: температуру тіла (ТТ), пульс або частоту серцевих скорочень (ЧСС), артеріальний тиск систолічний (АТС) та діастолічний (АТД), частоту дихання, життєву ємність легенів та ін. Для подальших досліджень вибрані показники, які доступні для автономного моніторингу в режимі реального часу за допомогою індивідуального браслету, а саме: ТТ, ЧСС, САТ і ДАТ. Всі ці показники контролюються в ході регулярних профілактичних медичних оглядів шахтарів, а також майже всі перевіряються перед спуском у виробку.

Медичними дослідженнями та рекомендаціями всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) визначені також нормальні значення цих показників та їх коливання, залежно від статі, віку, фізичної активності [8].

Так, ЧСС дорослого нетренованого чоловіка в спокійному стані коливається в межах 50 - 90 уд/хв. залежно від віку, у жінок ЧСС на 7 - 10 уд/хв. більша, ніж у чоловіків того ж віку. ЧСС при фізичних навантаженнях збільшується, допустимі значення також залежать від віку. Аналіз відповідних джерел дозволив сформулювати нормальні – у стані спокою (ЧСС_н), допустимі – при фізичних навантаженнях на робочому місці

(ЧСС_д) та критичні – такі, що вимагають реагування (ЧСС_{кр}) рівні пульса шахтарів різного віку (табл. 1).

Таблиця 1 – Нормальні, допустимі та критичні рівні ЧСС шахтарів

Вік, років	ЧСС _н , уд/хв.	ЧСС _д , уд/хв.	ЧСС _{кр} , уд/хв.
До 30	50-90	90-162	<50 або > 163
30 – 39	60-90	90-155	<60 або >156
40 – 49	60-80	80-150	<60 або >151
50 – 59	65-85	85-140	<60 або >141

Показники артеріального тиску також змінюються протягом життя. Відповідно до стандартів ВООЗ нормальними показниками АТ вважають: 139/89 мм рт.ст. — нормальний високий, 120/80 мм рт.ст. — оптимальний. Проте, є рекомендації до розрахунку нормативних величини АТ дорослої людини (20-80 років):

$$АТС=0,4 \times \text{вік(років)}+109 \text{ мм рт. ст.}$$

$$АТД=0,3 \times \text{вік(років)}+67 \text{ мм рт. ст.}$$

Норма знаходиться в межах ± 15 мм рт. ст. для АТС і ± 10 мм рт. ст. для АТД.

Такий підхід дає змогу розрахувати відповідні нормальні, допустимі та критичні значення показників АТС (табл.2) та АТД (табл.3).

Таблиця 2 – Нормальні, допустимі та критичні рівні АТС шахтарів

Вік, років	АТС _н , мм рт.ст.	АТС _д , мм рт.ст.	АТС _{кр} , мм рт.ст.
До 30	115-120	100-135	<100 або > 135
30 – 39	120-123	105-138	<105 або > 138
40 – 49	123-128	108-143	<108 або > 143
50 – 59	130-136	115-151	<115 або > 151

Таблиця 3 – Нормальні, допустимі та критичні рівні АТД шахтарів

Вік, років	АТД _н , мм рт.ст.	АТД _д , мм рт.ст.	АТД _{кр} , мм рт.ст.
До 30	72-76	62-86	<62 або > 86
30 – 39	75-80	65-90	<65 або > 90
40 – 49	80-83	70-93	<70 або > 93
50 – 59	80-86	74-96	<74 або > 96

Важливо зазначити, що рівень виміру показників температури не залежить від віку гірника. За загальноприйнятою класифікацією, нормальною температурою тіла людини вважається діапазон від 36°C до 37,2°C. Цей діапазон є стандартом для оцінки температурного режиму людського організму. В межах цього діапазону температура вважається фізіологічною і вказує на належне функціонування організму. Враховуючи, що температура тіла може змінюватись під впливом різних факторів, зокрема оточуючого середовища, то слід враховувати індивідуальні особливості людини. Залежно від цих факторів, температура тіла може варіювати на величину від ± 3 °C. Наявність діапазону варіації в температурних показниках дозволяє враховувати індивідуальні особливості організму та оточуючого середовища при оцінці температурного стану людини. При вимірюванні температури тіла важливо враховувати цей діапазон і порівнювати отримані результати зі стандартними нормами для оцінки стану здоров'я людини.

Граничні межі показників температури, пульсу, систолічного та діастолічного тиску (рис.1), були визначені для трьох зон: зелена, жовта та червона. Моніторинг показників здійснюється постійно, передача даних показників життєдіяльності відбувається наступним чином:

- Зелена зона вказує на показники, що знаходяться в межах допустимого стану для безпечної роботи. У цій зоні передача даних здійснюється кожні 30 хвилин.
- Жовта зона вказує на показники в діапазоні від нормального до допустимого стану, що може свідчити про потенціальну загрозу. У такому випадку, дані передаються кожні 15 хвилин.
- Червона зона сигналізує про критичний стан певного показника. У цій зоні передача відбувається через кожні 5 хвилин. Це дозволяє забезпечити оперативну реакцію на критичні зміни та вжити невідкладних заходів.

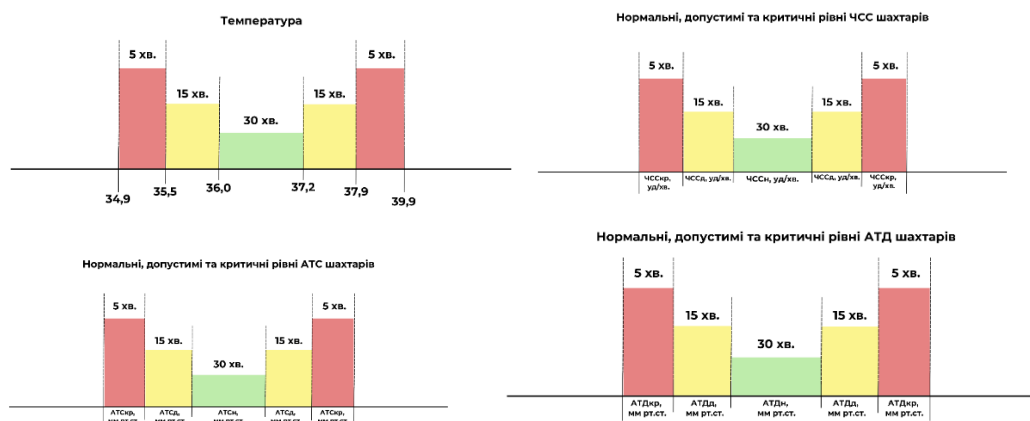


Рисунок 1 – Граничні межі показників

Для забезпечення описаної процедури необхідно запропонувати відповідні технічні засоби реалізації моніторингу, індикації та передачі даних про індивідуальні показники життєдіяльності.

Технічні засоби моніторингу показників. Необхідність постійного моніторингу об'єктивних показників фізичного стану працівників у шахті потребує розробки та впровадження відповідних технічних засобів, які б дозволяли фіксувати такі показники в автономному режимі, передавати інформацію за підтримуваними телекомунікаційними протоколами на поверхню та сигналізувати шахтарю про небезпечний стан його здоров'я. Одним із таких інноваційних рішень є використання браслету з вбудованими датчиками, що дозволяють вимірювати зазначені показники відповідно до вимог охорони праці у гірничій галузі. Браслет пропонується оснастити датчиками пульсу, тиску та температури тіла, а також світлодіодним індикатором, який буде використовуватися для візуального відображення стану шахтаря. Запропонована модель браслета включатиме два кольори індикатору - жовтий та червоний, які будуть активуватися у випадку перевищення заданих індивідуальних параметрів гірника. При допустимих значеннях всіх показників індикатор не буде відображати жодного кольору; коли один з показників перевищує норму, але лишається в межах допустимого, індикатор загоряється постійним жовтим кольором. Це слугуватиме сигналом для шахтаря про потенційну проблему. У разі переходу двох або більше показників у жовту зону, індикатор блиматиме жовтим, що свідчить про більш серйозну ситуацію та необхідність зміни умов праці (короткий відпочинок, тощо). Коли один з показників виходить за межі критичного рівня, індикатор загоряється постійним червоним кольором. Найвищий

рівень тривоги буде відображено при критичному стані двох або більше показників. Тоді індикатор блиматиме червоним, що є ознакою критичного стану шахтаря. Така система світлодіодного індикатора на браслеті надасть інформацію самому шахтарю про його стан та паралельно відобразиться на пульті диспетчера. Шахтар матиме можливість в реальному часі контролювати показники свого здоров'я та своєчасно реагувати на будь-які зміни.

Завдяки точному позиціонуванню, диспетчер отримує змогу відслідковувати місцезнаходження гірників у реальному часі. Ця інформація відображається на моніторі у вигляді тривимірної карти шахти (рис. 5). Завдяки запропонованому алгоритму на карті додатково відображатимуться різнокольорові позначки, що вказують на стан здоров'я кожного гірника. За допомогою цих позначок, диспетчер може спостерігати за кожним гірником окремо на карті. Різні кольори вказують на те, які індивідуальні показники життєдіяльності гірника перевищують норму або потребують особливої уваги. Такий сигнал дозволяє диспетчеру вчасно вжити необхідні заходи для запобігання ускладнень.

При виявленні відхилення як мінімум двох показників життєдіяльності від норми та перетину жовтої зони (що вказує на потенційну небезпеку), диспетчер проводить аналіз ситуації. Для підтвердження вимірювань він чекає та аналізує повторний замір. Якщо показники залишаються відхилені від норми після повторного заміру, диспетчер інформує підземний медичний пункт та начальника зміни, які відповідають за надання медичної допомоги та безпеку гірника. Ця інформація передається з метою організації негайного реагування та надання допомоги. Працівники підземного медичного пункту та начальник зміни, відповідно до протоколів, здійснюють додаткову оцінку стану шахтаря та вживають необхідних заходів для надання допомоги.

При виникненні аварійної ситуації така інформація дозволяє оптимально скоригувати рятувальні операції та надати першочергову допомогу ти, хто найбільш її потребує.

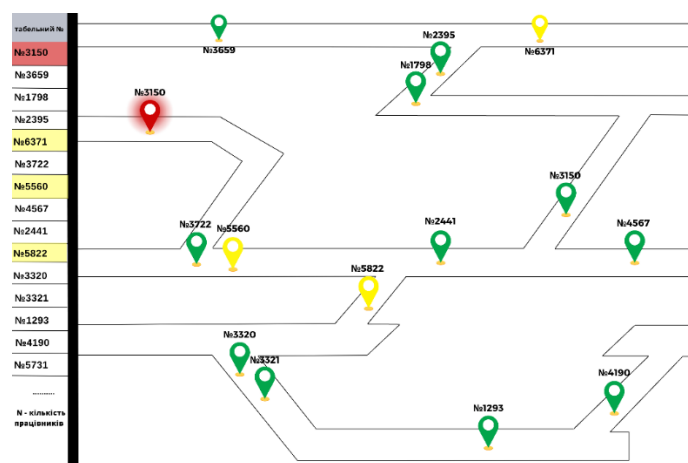


Рисунок 5 – Макет монітору пульта диспетчера

Застосування нечіткої логіки: Прийняття рішень при класифікації стану кожного робітника у здійснюється в умовах стохастичної природи зовнішніх впливів, відсутності адекватної математичної моделі функціонування, нечіткістю, людським фактором та ін. Невизначеність системи призводить до зростання ризиків від прийняття неефективних рішень. В такій ситуації доцільно застосовувати методи на основі правил нечіткої логіки, в основі якої лежить нечітка база знань – сукупність нечітких правил “Якщо – то”, що

визначають взаємозв'язок між входами і виходами досліджуваного об'єкта. В роботі пропонується використання правил нечіткої бази знань Мамдані [9], які складені з урахуванням ієрархії пріоритетів вхідних змінних, встановленої МАО Сааті (метод аналізу ієрархій Сааті) [9] за узгодженою матрицею парних порівнянь. Виходячи з особливостей об'єкта та показників, складені правила бази знань для кожного показника життєдіяльності робітників. Нижче наведено правила для визначення показників тиску:

1. If (ATC is red) or (АТД is red) or (ATC-АТД is red) then (mmHg is red).
2. If (ATC is green) or (АТД is green) or (ATC-АТД is yellow) then (mmHg is yellow).
3. If (ATC is green) and (АТД is green) and (ATC-АТД is green) then (mmHg is green).
4. If (ATC is yellow) or (АТД is yellow) or (ATC-АТД is yellow) then (mmHg is yellow).
5. If (ATC is red) or (АТД is red) or (ATC-АТД is yellow) then (mmHg is red).

Бажано, щоб база знань була компактною, тобто містила близьку до мінімальної кількість правил, необхідних для адекватного моделювання досліджуваної залежності. При великій кількості вхідних змінних компактність бази знань забезпечує ієрархічне представлення правил.

Моделювання алгоритму моніторингу показників життєдіяльності. Для отримання точних даних про індивідуальні показники життєдіяльності кожного робітника в роботі застосоване моделювання алгоритму по трьох показниках: температура тіла, пульс та тиск (систолічний та діастолічний) за допомогою моделювання в середовищі MATLAB з використанням методів логічних операцій.

Структуру моделі нечіткої логіки для кожного з параметрів, що беруть участь у визначенні стану робітника в режимі реального часу представлено на рисунку 2 (приклад для визначення тиску).

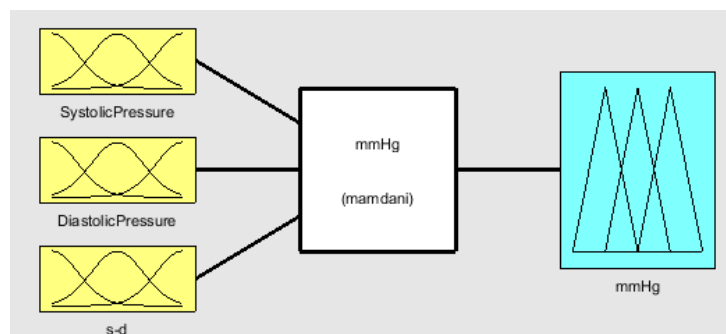


Рисунок 2 – Структура моделі нечіткої логіки, що відображає тиск робітника

Структура моделі, що наведена на рис. 2, відповідає структурі нечіткого логічного висновку. У блоках SystolicPressure, DiastolicPressure, s-d (різниця між систолічним та діастолічним значенням тиску) відбуваються процеси фазифікації, тобто перетворення чітких значень змінних входу у нечітку форму шляхом визначення ступеня належності значення вхідної величини її термам. Результат розрахунку блоку mmHg підлягає дефазифікації. Аналогічно створено моделі для показників температури тіла та пульсу.

Терми моделі нечіткої логіки представлено на рисунку 3.

Початковий багатовимірний масив – це елементи для навчання моделі визначення стану робітника в режимі реального часу, що залежить від його показників життєдіяльності, представлено на рисунку 5.

На рис. 5 по осі абсцис розташовані номери впорядкованих елементів багатовимірного масиву, яких містить у собі значення параметрів моделі:

- T – температура;

- SystolicPressure – систолічний тиск (millimeters of mercury – міліметри ртутного стовпчика);
- DiastolicPressure – діастолічний тиск (millimeters of mercury – міліметри ртутного стовпчика);
- Pulse – пульс (beats per minute – удари на хвилину);
- s-d – різниця між значенням систолічного тиску та діастолічного (millimeters of mercury – міліметри ртутного стовпчика).

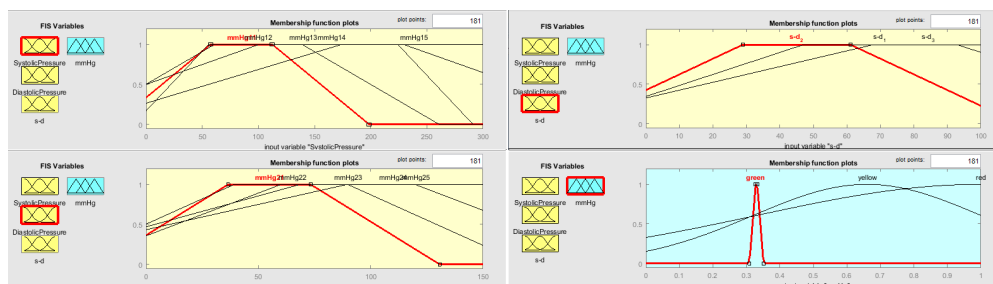


Рисунок 3– Графічне подання термів моделі, що відображає тиск робітника

На рисунку 4 представлена загальна структура підсумкової моделі визначення стану підземних робітників в режимі реального часу.

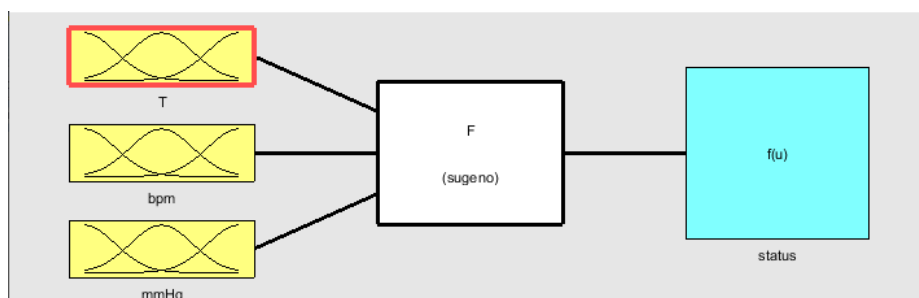


Рисунок 4 – Структура підсумкової моделі визначення стану підземного робітника

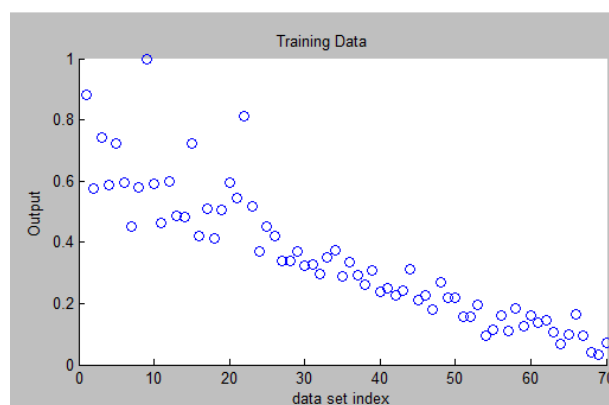


Рисунок 5 – Початкові дані

Значення вихідної змінної F віднормовано і знаходяться в межах від 0 до 1, де кожному коефіцієнту відповідає певний колір: зелений колір – нормальний стан робітника – значення F [0;0,2), жовтий колір – відхилення від нормального стану

робітника – значення $F(0,2;0,6)$, червоний колір – ознаки критичного стану робітника – значення $F(0,6;1]$.

Навчання нечіткої моделі проведено за методом субтрактивної кластеризації [10]. Даний метод використовується в тому випадку, коли заздалегідь неможливо визначити число кластерів. Основу алгоритму становлять ідеї гірського методу кластерного аналізу, який був запропонований Рональдом Ягером (Ronald Yager) і Дімітаром Фільов (Dimitar Filev). Особливістю методу є відсутність необхідності завдання кількості кластерів до початку роботи алгоритму [11]. На першому кроці гірської кластеризації визначають точки, які можуть бути центрами кластерів. На другому кроці для кожної такої точки розраховується значення потенціалу, що показує можливість формування кластера в її околиці. Чим щільніше розташовані об'єкти в околиці потенційного центру кластера, тим вище значення його потенціалу. Після цього ітераційно вибираються центри кластерів серед точок з максимальними потенціалами.

Графік помилок навчання представлений на рис. 6.

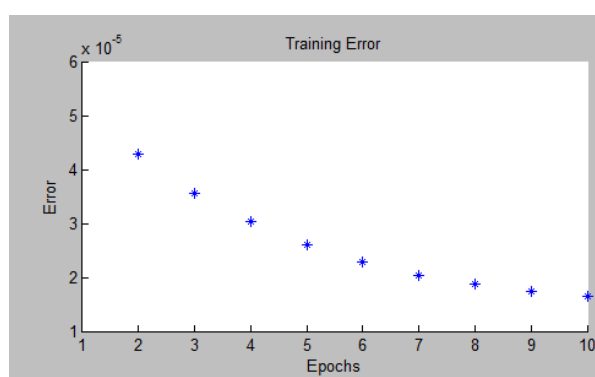


Рисунок 6 – Динаміка помилки в процесі навчання моделі F

Дані, що представлено на рис. 6, свідчать про те, що у процесі навчання помилка моделі було знижено з 0,00006 до 0,00002. Отже, можна зробити висновок, що на початку мали 6 хибних результатів на 100000 значень, а після навчання цей показник знизився до 2 хибних результатів на 100000 значень.

З використанням статистичних даних багатовимірному масиву порогові значення автоматично коригуються з метою мінімізувати помилку моделі. По суті цей процес являє собою підгонку моделі, яка реалізується алгоритмами, що використовуються, до наявних навчальних даних. Помилка для конкретної конфігурації моделі визначається шляхом ітераційного прогону через модель всіх наявних спостережень і порівнянню вихідних значень, що розраховано за допомогою моделі з бажаними (цільовими) значеннями. Всі такі різниці підсумовуються в так звану функцію помилок, значення якої і є помилка моделі.

Перевірка працездатності синтезованої моделі нечіткої логіки (модель F) за вихідними даними представлено на рис. 7.

Результати тестування моделі F після її навчання, що представлено на рис. 11 свідчать, що отримані за допомогою моделі розрахункові значення результуючого показника співпадають з його фактичними значеннями, тобто початкові значення відповідають отриманим значенням після навчання.

На рис. 8 наведена внутрішня логіка моделі F верхнього рівня, де відповідними кольорами показано зони виходу показників за межі норми, критичні зони та зона нормального стану.



Рисунок 7 – Результати тестування моделі F після її навчання

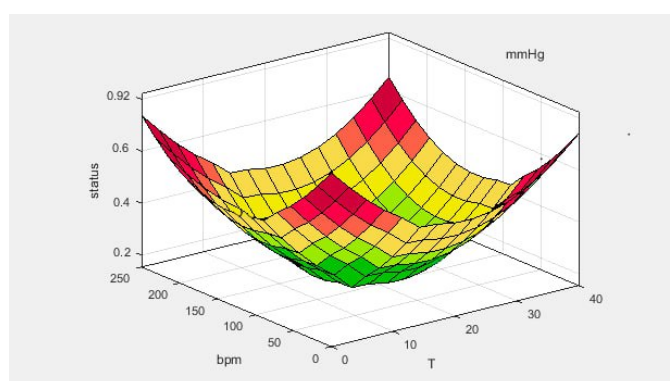


Рисунок 8 – Графічне подання поверхонь, що відображають залежність змінних

На рис. 8 наведено схему внутрішньої логіки моделі. Графік поверхні, що наведено на рисунку, вказує на наявність нелінійного зв'язку між змінними входу та змінною виходу у моделі.

Розроблена комплексна система моделей визначення стану робітника отримала реалізацію в Simulink, який є одним з обчислювальних модулів Matlab. Комплекс моделей складається з:

1. Модель T - модель нечіткої логіки визначення температури у загальній структурі комплексу.
2. Модель bpm - модель нечіткої логіки визначення пульсу у загальній структурі комплексу.
3. Модель mmHg - модель нечіткої логіки визначення тиску у загальній структурі комплексу. Варто зазначити, що окремим входом тут є різниця значень між систолічним та діастолічним значенням тиску для більш детального аналізу стану окремого робітника
4. Модель F – модель нечіткої логіки визначення поточного стану кожного робітника в режимі реального часу. Модель F використовує результати розрахунків моделей T, bpm та mmHg.

На рис. 9 представлена реалізація комплексу моделей в середовищі Simulink на прикладі розрахунку показника F за даними статистичних показників життєдіяльності, коли стан шахтаря у межах норми за всіма показниками – температура, пульс, тиск.

На рис. 9 значення показника $F = 0.1998$ вказує, що дана комбінація значень вхідних параметрів (температура, пульс, тиск) дозволяє зробити висновок, що показник стану робітника знаходиться в нормі (значення дуже близьке до 0,2).

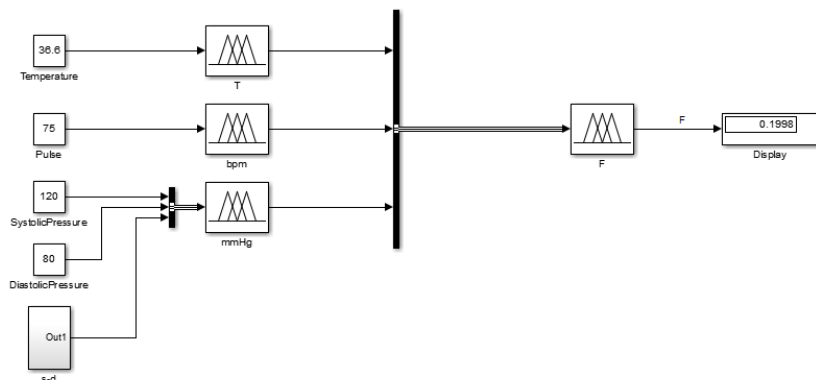


Рисунок 9 – Реалізація комплексу моделей в Simulink при нормальних показниках життєдіяльності

Розрахунок показника F за даними статистичних показників життєдіяльності, коли два з показників перевищує норму, але не виходять за порогові значення. Для прикладу обрано тиск із систолічним значенням – 160mmHg, а діастолічне значення - 100mmHg, отримане значення показника $F = 0.3877$ (близьке до значення 0,4). Такий результат вказує, що показник стану робітника знаходяться в області можливого погіршення здоров'я та загального стану.

Розрахунок показника F за даними статистичних показників життєдіяльності, коли всі три з показників значно перевищують норму. Для прикладу обрано температуру тіла із значенням 35°C, пульс – 40 ударів на хвилину, а тиск із систолічним значенням – 80mmHg і діастолічним значенням - 45mmHg, отримане значення показника $F = 0.9461$ (значення дуже близьке до критичного значення 1) вказує, що дана комбінація значень вхідних параметрів може сигналізувати про значну небезпеку для робітника з такими показниками життєдіяльності і диспетчер має негайно зреагувати по протоколу та прийняти рішення про негайне рятування життя робітника.

Висновки. В роботі розглянуто вирішення комплексної задачі розробки та моделювання алгоритму моніторингу місцезнаходження та індивідуальних показників життєдіяльності гірників у режимі реального часу в шахтній промисловості. Навчання підсумкової моделі F проводилося за спостереженнями, які максимально можливо охоплювали всі статистичні показники, що були отримані при зборі інформації. Результатом навчання стали групи кластерів і правил. Модель F дає точні результати, коли вхідні дані потрапляють в межі знайдених кластерів, про це свідчить те що у процесі навчання помилка моделі знизилася з 0,00006 до 0,00002. Отже, шляхом прядення тестування в модель задавались різні значення показників життєдіяльності робітників, що дало змогу оцінити індивідуальний стан кожного шахтаря та розробити рекомендації щодо забезпечення безпечних умов праці в режимі реального часу. Розроблений алгоритм повністю синхронізується з пультом диспетчера та забезпечує зворотній в'язок для вчасного реагування на можливі ризики для життя робітника. Розрахункові показники дають змогу віднести отриманий з моделі коефіцієнт з рівнями безпеки та сигналізувати про погіршення чи покращення кожного з показників. Відповідна індикація дозволяє вчасно надати рекомендації та допомагає у пошуково-рятувальних операціях під час виникнення позаштатних ситуацій.

Список літератури

1. Правила безпеки у вугільних шахтах. Наказ Державного комітету України з промислової безпеки,

охорони праці та гірничого нагляду 22.03.2010 № 62. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0398-10#Text>

2. Фонд соціального страхування України «Профілактика виробничого травматизму та професійних захворювань за 2022 рік». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.fssu.gov.ua/fse/control/main/uk/publish/article/971983>

3. Гірничий закон України. Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1999, № 50, ст.433. Документ 1127-XIV, чинний, поточна редакція — Редакція від 28.03.2023. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1127-14#Text>

4. Автоматизація процесів диспетчеризації вугільних шахт на основі системи прийняття рішень: монографія / А.В. Малієнко ; М-во освіти і науки України; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2019. 192 с.

5. Лабузова А.М., Воропаєва А.О., Воропаєва В.Я./Структура та функціонал автоматизованої підсистеми моніторингу та контролю технологічних показників видобувних забоїв вугільних шахт // Всеукраїнський науковий збірник Науковий вісник Донецького національного технічного університету. (Луцьк, 2022р.). С. 63-73.

6. Кодекс усталеної практики МОП «Безпека та гігієна праці під час розробки вугільних родовищ підземним способом». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://surl.li/hrujg>

7. Лабузова А.М., Воропаєва В.Я. СУЧАСНІ ЗАСОБИ МОНІТОРИНГУ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ ГІРНИКІВ ПІД ЧАС АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ // «ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології: зб. доповідей VII Всеукр. наук.-практ. конф. молодих вчених, 1-2 грудня 2021 р./ ДВНЗ «ДонНТУ; відп. ред. Г.В. Ступак. Покровськ: ДВНЗ «Дон- НТУ», 2021. С. 30 – 34

8. Теорія і методика фізичного виховання : підруч. для студ. вищ. навч. закладів фіз. виховання і спорту : в 2 т. / під ред. Т. Ю. Круцевич. К. : Олімпійська література, 2008.

9. H. Ikeda, Y. Kawamura, Z. P. L. Tungol, M. A. Moridi, H. Jang / Implementation and Verification of a Wi-Fi Ad Hoc Communication System in an Underground Mine Environment // Journal of Mining Science, 2019. p. 505–514.

10. Karakose M. Block based fuzzy controllers / Mehmet Karakose, Erhan Akin // Department of Computer Engineering, University of Firat , Elazig, Turkey, 2010. N 3(1). P. 100 – 110

11. Rotshtein A. Design and tuning of fuzzy rule-based system for medical diagnosis / A. Rotshtein // Fuzzy and Neuro-Fuzzy Systems in Medicine / Eds.: N.H. Teodoroescu, A. Kandel, L.C. Jain. USA, Boca-Raton : CRC-Press. 1998. P. 243–289.

References

1. State Committee of Ukraine for Industrial Safety, Labor Protection, and Mining Supervision. (2010). Safety rules in coal mines. Order No. 62, March 22, 2010. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0398-10#Text>

2. Social Insurance Fund of Ukraine. (2022). Prevention of occupational injuries and professional illnesses for the year 2022. Retrieved from <http://www.fssu.gov.ua/fse/control/main/uk/publish/article/971983>

3. Verkhovna Rada of Ukraine. (1999). Mining Law of Ukraine. Voice of Ukraine Parliament, No. 50, p. 433. Document 1127-XIV, current version - Revision as of March 28, 2023. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1127-14#Text>

4. Maliyenko, A. V. (2019). Automation of dispatching processes in coal mines based on decision-making system: monograph. Ministry of Education and Science of Ukraine; National Technical University "Dnipro Polytechnic". Dnipro: NTU "DP".

5. Labuzova, A. M., Voropaieva, A. O., & Voropaieva, V. Ya. (2022). Structure and functionality of an automated subsystem for monitoring and control of technological indicators of coal mine workings. Scientific Bulletin of Donetsk National Technical University, Lutsk, 63-73.

6. International Labour Organization. (n.d.). Code of Practice on Safety and Health in Coal Mines. Retrieved from <http://surl.li/hrujg>

7. Labuzova, A. M., & Voropaieva, V. Ya. (2021). Modern means of monitoring miners' location during emergency situations. In "ТАК": Telecommunications, Automation, Computer-Integrated Technologies: Proceedings of the 7th All-Ukrainian Scientific-Practical Conference of Young Scientists, December 1-2, 2021 (pp. 30-34). Pokrovsk: Donetsk National Technical University.

8. Krucevyich, T. Yu. (Ed.). (2008). Theory and methodology of physical education: textbook for students of higher educational institutions of physical education and sports (Vol. 2). Kyiv: Olympic Literature.

9. Ikeda, H., Kawamura, Y., Tungol, Z. P. L., Moridi, M. A., & Jang, H. (2019). Implementation and Verification of a Wi-Fi Ad Hoc Communication System in an Underground Mine Environment. Journal of Mining Science, 505-514.

10. Karakose, M., & Akin, E. (2010). Block-based fuzzy controllers. Department of Computer Engineering, University of Firat, Elazig, Turkey, 3(1), 100-110.

11. Rotshtein, A. (1998). Design and tuning of fuzzy rule-based system for medical diagnosis. In N.H. Teodorescu, A. Kandel, & L.C. Jain (Eds.), Fuzzy and Neuro-Fuzzy Systems in Medicine (243-289). Boca-Raton, USA: CRC Press.

Надійшла до редакції 31.05.2023

V. Voropaieva, A. Labuzova, D. Zhukovska, A. Voropaieva

DEVELOPMENT AND SIMULATION OF A DECISION-MAKING ALGORITHM REGARDING THE CRITICAL STATE OF HEALTH OF UNDERGROUND COAL MINE WORKERS

Purpose. Improving the effectiveness of management decisions regarding the safety of underground coal mine workers by developing an algorithm for making decisions about the critical health condition of a miner.

Results. The work solves the complex task of developing and modeling a decision-making algorithm about the state of health and individual vital indicators of miners in real time: the list of indicators for monitoring is substantiated and their levels have been ranked; technical means of monitoring have been selected; fuzzy logic rules and an algorithm for making a decision about the criticality of an underground worker's health have been developed; simulation of the algorithm has been performed. The proposed algorithm allows real-time tracking of the location of miners and provides individual information on indicators of their physical condition, such as body temperature, pulse and blood pressure. This provides an opportunity to quickly respond to potentially dangerous situations and act appropriately.

Scientific novelty. The novelty of the work consists in the development of an algorithm that combines the monitoring of the location and individual vital signs of miners and decision-making about their physical condition.

Practical importance. The approaches proposed in the work can be implemented in the existing operational and dispatching control systems of coal enterprises and allow monitoring the emergence of critical health conditions of workers.

Keywords: coal mine, decision making, automated control, monitoring, vital signs, miner, dispatcher, data transfer.

Відомості про авторів

Воропаєва Вікторія Яківна, к.т.н., доцент, проректор з науково-педагогічної роботи ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; viktoriya.voropayeva@donntu.edu.ua.

Лабузова Анастасія Миколаївна, аспірант кафедри автоматики та телекомунікацій ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; anastasiia.labuzova@donntu.edu.ua.

Жуковська Дар'я Олександрівна, асистент кафедри автоматики та телекомунікацій ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; daria.zhukovska@donntu.edu.ua.

Воропаєва Анна Олександрівна, к.т.н., доцент, доцент кафедри Інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем, Івано-Франківський національний технічний університет нафти та газу; anna.voropaieva@nung.edu.ua.

Voropaieva Viktoriia, Candidate of Technical Sciences, Ph.D., Associate Professor, Vice-rector for scientific and pedagogical work, SHEE "Donetsk National Technical University"; viktoriya.voropayeva@donntu.edu.ua.

Labuzova Anastasiia, post-graduate student of the Department of Automation and Telecommunications SHEE "Donetsk National Technical University"; anastasiia.labuzova@donntu.edu.ua.

Zhukovska Daria, assistant of the Department of Automation and Telecommunications SHEE "Donetsk National Technical University"; daria.zhukovska@donntu.edu.ua.

Voropaieva Anna, Candidate of Technical Sciences, Ph.D., Associate Professor of the Department of Information and Telecommunication Technologies and Systems, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas; anna.voropaieva@nung.edu.ua.

УДК 622.411.52:532:62-784.4

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-40-52>

В.Б. Гого, С.В. Подкопась, Н.С. Черних

ОБҐРУНТУВАННЯ КОМПЛЕКСНИХ ЗАХОДІВ ОХОРОНИ ПРАЦІ ШАХТАРІВ ЗА ФАКТОРАМИ ЯКОСТІ РУДНИКОВОГО ПОВІТРЯ

Викладено результати аналітично-експериментального дослідження стосовно актуальної задачі обґрунтування комплексних заходів з охорони праці гірників глибоких вугільних шахт за факторами якості рудникового повітря на основі вивчення процесів гідродинамічного кондиціювання повітря, що особливо важливо для розробки автономних та енергоекономічних засобів забезпечення норм охорони праці шахтарів.

Мета – обґрунтувати та аналітично вивчити основні термодинамічні характеристики процесу гідравлічного кондиціювання рудникового повітря для розробки функціональних модулів шахтних кондиціонерів з варіативними показниками раціональних потужностей, що задовольняють специфічним умовам робочих місць гірників в глибоких вугільних шахтах.

Методи дослідження. В основу загальної методології дослідження покладено системний підхід до аналізу гідравлічних і термодинамічних процесів, які включають комплекс аналітичного вивчення суміші повітря з краплинами води з обґрунтуванням і розробкою математичної моделі в робочому об'ємі кондиціонера, аналізу експериментальних лабораторних та промислових даних методами математичної статистики, а також узагальнення стосовно визначення закономірностей основних характеристик термодинамічного процесу гідродинамічного кондиціювання рудникового повітря.

Результати. Аналітично визначено показники ентальпії та вологості рудникового повітря для дослідження енергетичного стану активного компоненту робочого тіла потоку суміші повітря та крапель води; отримано діаграми оцінки сутності зміни термодинаміки робочої суміші в гідродинамічному кондиціонері, а також енергетична характеристика зміни відносної вологості повітря при його охолодженні із зміною тиску і температури робочого суміші в багатокамерному ежекторі гідродинамічного кондиціонера.

Наукова новизна. Вперше аналітично визначено термодинамічні показники стану робочої суміші теплотенційного повітря та крапельної води до та після кондиціювання, а також показники зміни ентальпії, вологості і температури рудникового повітря в гідродинамічному кондиціонері.

Практична значимість результатів викладеного дослідження в тому, що на основі енергетичних характеристик стає можливим розрахувати необхідні початкові температури води (в межах 1,0°C-20°C), що подається у гідродинамічний кондиціонер та початкової температури повітря (для меж 30-50°C), що є технічною умовою розробки ежекторного модуля гідродинамічного кондиціонера для конкретної локальної робочої зони гірничої виробки глибокої вугільної шахти.

Ключові слова: охорони праці, вугільна шахта, рудничне повітря, водяний ежектор, гідродинамічний кондиціонер.

Вступ. Актуальність теми дослідження, результати якого викладаються у статті, зумовлена реальним поточним станом держави та форс-мажорними обставинами, що вимагають збільшення видобутку вугілля для теплових електричних станцій та металургії, а, відповідно, інтенсифікації гірничих робіт, головним чином, у вугільних шахтах Донбасу. В свою чергу, механізовані процеси підземної розробки пластів вугілля швидкісними комбайнами, а також транспортування гірничої маси, утворюють пил та додаткову загазованість рудникового повітря, що є негативними факторами в організації заходів з охорони праці шахтарів.

Наразі основний видобуток вугілля в країні відбувається у глибоких шахтах Західного Донбасу, в яких природно та техногенно створились високій температурі повітря у гірничих виробках, насамперед, в забоях, де вона перевищує 40°C, що за межами санітарної норми 26°C. До того ж, у визначені якості рудникового повітря відповідно до норм охорони праці шахтарів, ще треба враховувати загазованість

атмосфери в гірничих виробках внаслідок виділення метану, оксидів вуглецю, сірки тощо з відбитої маси вугілля.

Отже, негативними факторами у процесі забезпечення якості рудникового повітря є його висока температура, запилення та загазованість.

В даний час зниження температури повітря у виробках вугільних шахт забезпечується комплексами гірничо-технологічних заходів головної вентиляції та місцевого кондиціювання рудничного повітря. Проте зберігаються складові загальної проблеми щодо створення комплексних заходів боротьби з пилом, з тепловим навантаженням та загазованістю у забезпеченні нормальних умов праці гірників в глибоких шахтах України. Актуальним в цьому ключі є формулювання науково-практичного завдання стосовно вирішення задачі з розробки спеціальних портативних кондиціонерів для дотримання норм охорони праці шахтарів за якістю рудникового повітря.

Сутність наукової задачі, що розв'язується, полягає у формуванні умов поєднання наукових узагальнень з інженерними заходами та визначенні термодинамічних процесів, щоб створити шахтний автономний водяний кондиціонер, для забезпечення нормативної якості рудникового повітря у локальному робочому просторі гірничої виробки глибокої шахти.

При цьому має бути розкрито та викладено спосіб створення модуля водяного кондиціонера для створення ефективного сумісного процесу знепилення та охолодження повітря в одній установці з водяним агентом.

Такий спосіб, як засвідчили попередні дослідження, значно відрізняється від окремих означених процесів зрошування, перш за все, високою швидкістю уловлювання пилу та охолодження повітря прямим контактом з крапельною водою, яка, в свою чергу, може контактено охолоджуватися льодом, що важливо у підземних умовах глибоких вугільних шахт для зниження техногенного утворення тепла.

У сумісному охолодженні та очищенні від пилу і газів рудникового повітря має відбуватися комплексний процес в ізольованому спеціальному автономному кондиціонері, що збільшує термодинамічний ефект контактного масообміну між водою та повітрям, а це позитивно відбивається на кінцевих параметрах стану повітря у зниженні його температури та запиленості. Означений спосіб сумісного знепилення і охолодження повітря в автономному водяному кондиціонері має реалізовуватися в модулях, що дає можливість для широкої варіації енергетичної потужності установки, для поліпшення умов праці гірників за фактором якості рудникового повітря відповідно до вимог охорони праці у вугільних шахтах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню закономірностей запилення і нагріву рудникового повітря при його русі мережею гірничих і вентиляційних виробок за рахунок загальної шахтної депресії присвячено значну кількість робіт як вітчизняних, так і зарубіжних авторів. На підставі аналізу цих досліджень і було сформовано певне уявлення стосовно тих проблемних питань, що мають бути вирішені у знесилені та охолодженні рудничного повітря у глибоких шахтах.

Порівняльний аналіз систем кондиціювання рудничного повітря для глибоких вугільних шахт, що провели Климов А.А. [1], Ковальчук А.Б. [2] та інші, визначив напрями щодо класифікації систем кондиціювання рудничного повітря в шахтах. Визначено, що питання про вибір раціональної системи кондиціювання повітря для різних горизонтів має вирішуватися, виходячи з гірничотехнічних та кліматичних умов стосовно конкретної вугільної дільниці. Але більші раціональним для вугільних шахт Донецького басейну з глибинами понад 800 метрів є схеми із штучним охолодженням повітря в штреках, де мають розміщуватися холодильні машини для забезпечення всього робочого горизонту. Такі схеми мають певні переваги у зменшенні або відсутності

вентиляційних трубопроводів із значним тиском повітря, що скорочує загальну протяжність комунікацій та підвищує надійність охолодження повітря.

У дослідженнях, що виконав Мартинов А.А [4-6], рекомендовано максимально наближати охолоджувачі повітря до очисних вибоїв, застосовуючи ступінчасте розташування у конвеєрних штреках холодильних агрегатів та додаткове локальне охолодження повітря в межах очисного вибою. На думку автора це дозволить уникнути різких перепадів температури повітря на робочих місцях, що важливо з санітарно-гігієнічної точки зору, а також призведе до зменшення тепловиділень від гірського масиву, осушення загального вентиляційного струменя, що, в свою чергу, зменшить необхідні витрати енергії на генерацію холоду.

З цього приводу має сенс зазначити, що у більшості проаналізованих наукових робіт закордонних фахівців [7-11] з питань охолодження рудникового повітря вугільних шахт, підкреслюється важлива обставина стосовно енергетичної ефективності охолодження, за якої вона стає тим нижче, чим далі від робочих місць шахтарів розташовані охолоджувачі. В умовах глибоких вугільних шахт витрати енергії на генерацію холоду зменшуються в міру наближення кондиціонерів повітря до робочої зони. При цьому також знижуються і загальні витрати енергії на одиницю виробленого холоду, якщо охолоджується тільки те повітря, що має надходити до конкретного робочого місця гірника.

Отже, розміщення холодильних машин для охолодження повітря головної шахтної вентиляції на поверхні шахти при своїй надійності та безпеці має істотний недолік в наслідок значних втрат холоду на шляху подачі повітря, що створює низьку енергетичну ефективність такої системи. Тому закономірним є висновок, що розміщення установок кондиціювання повітря для його подачі в глибокі шахти на поверхні, є неперспективним [10-11], а треба розробляти схеми для портативного та локального кондиціювання поряд з робочими місцями. Саме такими мають стати автономні ежекторні кондиціонери рудникового повітря, що застосовують в якості охолоджувача воду як у рідкому стані, так і льодяному.

Мета статті. Мета статті, а отже, й кінцевого вирішення наукової задачі, полягає у визначенні характеристик умов, що забезпечують якість рудникового повітря у робочому об'ємі гірничої виробки для обґрунтування комплексного гідродинамічного процесу сумісного знепилення та охолодження повітря в спеціальному кондиціонері з рідинним і твердим водяним агентом.

Обґрунтування основних термодинамічних показників процесу гідродинамічного кондиціювання рудникового повітря необхідне для розробки функціональних ежекторних модулів шахтних кондиціонерів для їх визначеної потужності, що має задовольняти специфічним умовам з якості повітря робочих місць у виробках глибоких вугільних шахтах.

Методи дослідження. Аналіз фактичного стану теплових режимів у гірничих виробках глибоких вугільних шахт Західного Донбасу та визначення перспектив нормалізації якості рудничного повітря в локальних робочих зонах. Прогностичне дослідження якості рудничного повітря у гірничій виробці при температурі 45°C, та його нормалізація із застосуванням шахтного пересувного гідродинамічного кондиціонера.

В основу загальних методів дослідження покладено системний підхід до аналізу термодинамічних процесів у гідродинамічному ежекторному кондиціонері, що поєднують аналітичне вивчення суміші теплого повітря з холодними краплинами води, а також розробку математичної моделі системи «повітря – пилина – краплина» як тіла змінної маси, що рухається у робочому об'ємі кондиціонера, з аналізу лабораторних експериментальних даних методами математичної статистики і теорії стохастичних

процесів, а також узагальнень стосовно визначення закономірностей основних енергетичних характеристик процесу гідродинамічного кондиціювання рудникового повітря.

Виклад основного матеріалу. Способи зниження температури та запиленості рудникового повітря у вугільних шахтах, що застосовуються на практиці, можна розділити на суто гірничотехнічні заходи для спеціального переміщення повітря в гірничих виробках та способи із створенням зон підвищеної швидкості руху повітря. При цьому можливим є застосування процесу адіабатичного зниження температури повітря в локальних об'ємах виробок від місцевих джерел теплових виділень, а також теплоізоляція поверхонь породи гірничих виробок на ділянках інтенсивного теплового притоку. Також продовжуються технічні роботи з удосконалення способів активізації місцевого провітрювання у виробках, де відбуваються значні втрати швидкості рудникового повітря, та загальне зменшення довжин вентиляційних виробок із штучним його охолодженням у локальних зонах гірничих виробок.

З цього приводу важливо зазначити, що при визначенні способів нормалізації теплового режиму у конкретних виробках необхідно виходити з того, що охолоджувальну техніку слід використовувати у тому випадку, коли всі способи поліпшення теплових умов гірничими заходами виявляються недостатніми. Найкращий результат можна досягти при комплексному застосуванні ефективних гірничих та технічних заходів підвищення якості рудничного повітря.

Отже, заходи з підвищення якості рудничного повітря треба розробляти за вимогами санітарних норм охорони праці гірників з максимальним урахуванням локальних умов робочих зон, що визначають загальні енергетичні витрати. До того ж у підземних холодильних машинах мають застосовуватися робочі агенти, що не токсичні, не горючі, не вибухонебезпечні та випробувані в умовах категорійних вугільних шахт.

Враховуючи це, нами проведено класифікацію систем кондиціювання рудничного повітря для вугільних шахт. Дослідженнями встановлено, що найбільш поширеною діючою системою кондиціювання повітря в шахтах Західної частини Донецького басейну на горизонтах 800-1200 метрів є схеми з охолодженням повітря на відкотних штреках із розміщенням холодильних машин на відповідних робочих горизонтах. Такі схеми мають певні переваги, а саме: відсутні значні довжини трубопроводів під високим тиском, а також скорочуються трубопроводи, в яких охолоджувачем застосовується вода, що підвищує надійність експлуатації.

На підставі аналітичних досліджень встановлено, що має рацію максимальне наближення охолоджувачів повітря до очисних вибоїв, застосовуючи схему ступінчастого зниження температури повітря в конвеєрних штреках і далі, незалежно від глибини робочого горизонту, проводити додаткове охолодження повітря вже в зоні очисного вибою. Це дозволить уникнути різких перепадів температури та швидкості повітря на робочих місцях, що важливо із санітарно-гігієнічної точки зору, і зменшить вплив тепловиділень від гірського масиву шляхом скорочення втрат холоду.

Аналізуючи схеми штучного охолодження повітря для глибоких шахт Донбасу, зазначаємо, що охолодження всього вентиляційного повітря шахти на поверхні при слабкому термічному прояві родовища, може ефективно застосовуватися лише у певних межах довжин шахтного поля. Тому найбільш широке застосування у більшості глибоких вугільних шахтах знайдуть місцеві схеми штучного охолодження частини повітря. Місцеві схеми охолодження застосовуються також і на діючих шахтах з централізованим охолодженням, якщо воно не забезпечує нормальних теплових умов у всіх очисних або підготовчих вибоях шахти.

Проведене дослідження з типізації схем локального охолодження повітря для умов багатьох шахт Донбасу, засвідчило, що для певних ділянок допустимих температурних

перепадів повітря в зонах охолодження розроблені конкретні раціональні схеми застосування. Зазначимо, що визначальними критеріями приймалися глибини розробки, довжини крил шахтного поля і ділянок інтенсивного нагрівання повітря, а також технології відпрацювання та виїмки вугільних пластів. В таких схемах часто застосовувалась крапельна вода для охолодження та знепилення повітря на основі теплового та масового обміну при адіабатному термодинамічному процесі. Сутність зазначеного способу полягала у тому, що в потік вентиляційного повітря, яке надходило до вибою тупикового вироблення, подавалася вода спеціальним пристроєм. Утворена суміш крапель води та повітря захоплювалась потоком і переміщувалась в повітропроводі. При змішуванні теплового повітря з краплями води відбувалося випарне охолодження зі зниженням температури рудникового повітря. Для регулювання кінцевої температури і відносної вологості повітря змінювалось співвідношення між витратою вентиляційного повітря і крапельної води у повітропроводі шляхом зміни подачі останньої. В свою чергу, подача води регулювалася також із розрахунку забезпечення потрібної відносної вологості повітря на виході з повітропроводу в межах встановлених норм охорони праці.

Важливо зазначити, що застосування в тупикових виробках великої протяжності для зниження температури повітря потужних вентиляторних установок, викликає інтенсивне нагрівання рудникового повітря теплом від електричних двигунів. При цьому також відбувається підвищення температури повітря при проходженні через саму вентиляторну установку на $5-7^{\circ}\text{C}$. Доцільність адіабатичного охолодження крапельною водою впливає на вибір особливостей регулювання параметрів вологості повітря в тупикових виробках. Відносна вологість рудничного повітря в виробках глибоких шахт без додаткового місцевого охолодження знаходиться в межах 35-45%, що вказує на сухість повітря. Тому різке підвищення температури вентиляційного струменя при проходженні через місцеві вентиляторні установки великої потужності призводить до додаткового зниження відносної вологості до 30-40%, що є неприпустимим за санітарними нормами. Отже, обробка вентиляційного струменя в повітропроводах крапельною водою дозволяє підтримувати температуру і відносну вологість повітря на виході в робочі зони вибою в межах встановлених норм. Пристрої адіабатичного зниження температури повітря у вигляді спеціальних форсунок монтуються у вентиляційних повітропроводах і є ефективними для охолодження рудничного повітря.

Поглиблене вивчення наведеного показало, що істотний недолік цього способу полягає у тому, що вода диспергується прямо у повітропровід, що викликає значне зволоження трубопроводу та створює проблеми його експлуатації, але сам процес охолодження повітря дисперсною водою є ефективним, як для зниження температури рудничного повітря, так і його знепилення.

На шахті «Капітальна» ДП «Мирноградвугілля» було проведено випробування способу зниження температури рудничного повітря крапельною водою, яку створювали спеціальні форсунки, в тупиковій частині забою, довжина якого становила 120 метрів на глибині 938 метрів. Подача свіжого повітря в забій проводилася двома послідовно включеними вентиляторами місцевого провітрювання СВМ-6М. Модуль, що складався з 4 форсунок, був встановлений в повітропровід бремсберга за 40м від вибою. На форсунки подавалася вода під тиском 5 атм. з шахтної водяної магістралі температурою 21°C . Температура вентиляційного повітря на вході у повітропровід становила 31°C із запиленістю 137мг/м^3 , а на виході в забійний простір температура знизилась на 6°C , а запиленість на 83мг/м^3 . Відносна вологість повітря на вході в забій складала в середньому 67%.

Показовим для розуміння термодинаміки та фазових змін компонентів суміші повітря, пилу і крапель води стає діаграма процесу зміни стану рудничного повітря в

монтувався на платформі шахтної вагонетки, що одночасно була зручним засобом для транспортування та компоновки необхідного приладдя.

Для промислового випробування можливого варіанту повітроохолоджувача на шахті «Капітальна», що функціонально стає гідродинамічним кондиціонером, його було розміщено на платформі з рейковим шляхом на відстані 120 метрів від прохідницького вибою. В міру просування вибою платформа мала змогу переміщуватися ближче до нього. Охолоджене повітря подавалося в забій прогумованим повітропроводом. Температура повітря в кондиціонері знижувалась з початкової 32⁰С до вихідної 24⁰С при температурі води 21⁰С, що подавалась під тиском в кожен ежектор. У гідродинамічному кондиціонері створювався більш ефективний теплообмінний процес для зниження температури рудничного повітря ніж у адіабатичному охолоджувачі з форсунками, що зумовлено активним поглинанням сухим та запиленним вентиляційним повітрям дрібних та аерозольних крапель диспергованої ежекторами води. Вступаючи у контакт з краплями води, сухе вентиляційне тепле повітря та пил змінюють свої властивості за рахунок утворення в апараті водяної пари. Джерелом енергії в процесі випаровування водяних крапель ставало тепло рудничного повітря, а охолоджувачем в кондиціонері виступала вода, тому природним утворювалось політропне явище передачі тепла між фазами суміші за рахунок різниці температур між газом і водою, а наслідком ставало охолодження і знепилення рудничного повітря.

Отже, здійснене експериментальне дослідження охолодження і знепилення рудникового повітря крапельною водою в гідравлічному кондиціонері забезпечувало зниження температури повітря від 32⁰С до 24⁰С, а зменшення запиленості на 60%. Відносна вологість повітря при цьому становила 65-75%.

В якості аналогів і прототипів для розробки інноваційних автономних гідравлічних кондиціонерів можуть слугувати повітроохолоджувачі стаціонарних камерних та пересувних типів із зрошувальними форсунками. Холодильна потужність таких сучасних камерних водоохолоджувачів, що розміщуються у виробках головних відкотних горизонтів, значна і становить 1,5-5 МВт. Площа поперечного перерізу камер зрошення сягає 14 м² при довжина зони зрошення до 35 м. Краплі холодної води в таких апаратах прямо стикаються з потоком теплого рудникового повітря, що утворює активний обмін масами та теплом між компонентами. Перевага такої об'ємної конструкції гідравлічних апаратів у практичній відсутності термічного та гідравлічного опору між газовим та рідинним середовищами, що у взаємодіють.

У камерних гідравлічних охолоджувачах повітря встановлюються кілька ступенів диспергування холодної води. Та вода, що збирається в піддон першого ступеня форсунок, подається насосом до форсунок другого ступеня і так далі. При цьому рух крапель холодної води спрямований проти руху повітряного струменя, що забезпечує найсприятливіші умови теплообміну.

Холодильна потужність пересувних форсуноквих охолоджувачів рудникового повітря також значна і становить 300-500 кВт. Зрошувальні форсунки в цих охолоджувачах повітря розміщуються в спеціальному корпусі, що має теплообмінні поверхні. Основним недоліком експлуатації зазначених форсуноквих охолоджувачів є забруднення робочої води рудниковим пилом, що міститься в охолоджуваному повітрі, а це неминуче призводить до зниження холодопродуктивності установки внаслідок забруднення сіток та ребер теплообмінних поверхонь.

Проведені аналітичні та лабораторні дослідження з вивчення сутності гідравлічного кондиціювання повітря дозволили сформулювати ряд наукових положень стосовно комплексних сумісних процесів теплообміну і знепилення, що мають бути враховані для розробки шахтних автономних портативних кондиціонерів рудничного повітря відповідно до норм охорони праці гірників.

З'ясовано фізичну модель основного процесу, що відбувається у контакті крапель води з теплим повітрям, як молекулярного випаровування рідини. Молекули води в краплі мають різні енергії, що визначають їх певні швидкості рухів. Значення середньої енергії молекул оцінюється показником температури. Тому при певній температурі деякі молекули води в краплі, що утворюють її поверхню, долають опір поверхневого шару і переміщуються у повітря як воднева пара. Процес утворення такої пари буде тим інтенсивнішим, чим вище температура крапель води. Разом із рухом молекул води з краплі відбувається зворотний процес повернення молекул із повітря в краплі, а також з'єднання крапель та пари з пилинами. Такий комплексний процес відбувається в кондиціонері, а перерозподіл тепла створюється перенесенням молекулярних складових речовин. Теплота повітря передається краплям води, молекули якої, в свою чергу, випаровуються в повітря, охолоджуючи його. Інтенсивне випаровування крапель відбувається за умов, що їх температура вище температури повітря за сухим термометром і температури точки роси.

На користь означеної моделі свідчить діаграма якісної сторони термодинамічного процесу в координатах $i - d$, що наведено на рис. 2, з врахуванням літніх та зимових температур повітря головної вентиляції шахти.

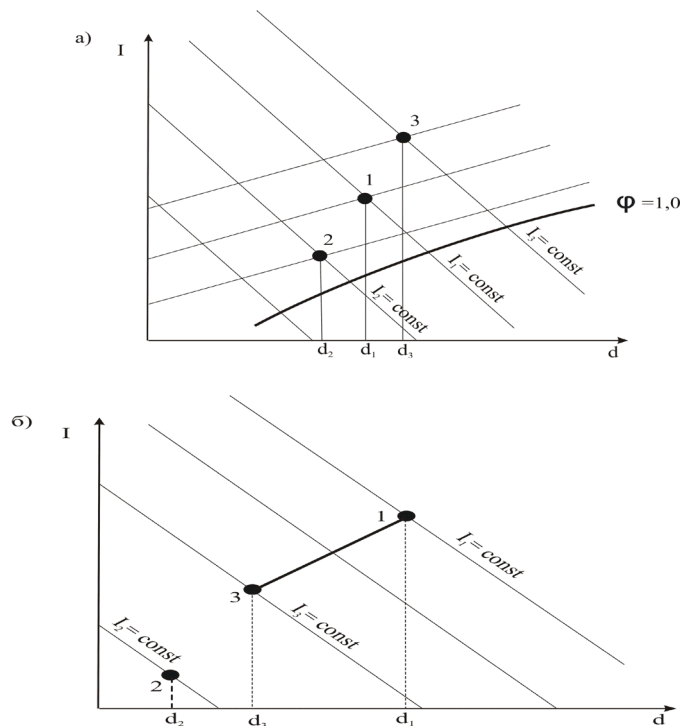


Рисунок 2. – Діаграма $i-d$ для визначення термодинамічних параметрів повітря головної шахтної вентиляції: а) літо; б) зима

Принципову побудову адіабатного процесу охолодження рудникового повітря в літню пору року показано на діаграмі $i-d$ (рис. 3), де точка 1 характеризує стан зовнішнього повітря заданих параметрів температури (t_n) та відносної вологості (ϕ_n), з якими воно надходить в зрошувальну камеру кондиціонера. У зрошувальній камері при змішуванні повітря з краплями води утворюється суміш, температура якої дорівнює температурі мокрого термометра, а процес зміни стану суміші проходить по кривій сталої ентальпії до перетину з кривою відносної вологості $\phi=95\%$. Через крапельну

обробку температура повітря знижується, причому, чим більше φ_n , то тим менше охолодження повітря.

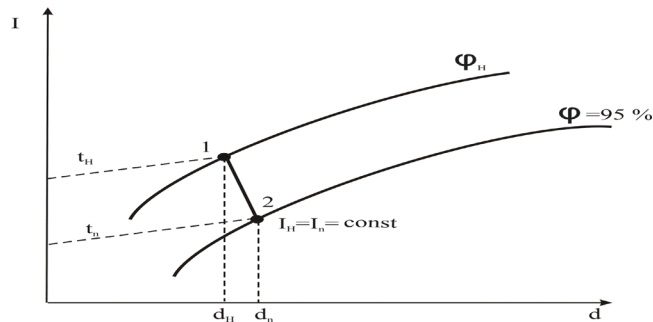


Рисунок 3 – Діаграма i - d обробки рудникового повітря краплями води

Отже, адиабатний процес охолодження рудничного повітря особливо доцільний за низьких значень відносної вологості φ_n зовнішнього атмосферного повітря, що часто і природно має місце в умовах вугільних шахт Донбасу.

Таким чином, відповідно до розробленої моделі вивчення механізму теплообміну в гідравлічному кондиціонері головний процес проходить між поверхнями крапель води та повітрям з домінуючим активним переміщенням крапель води, а інтенсивність відповідних напрямів рухів цих крапель залежить від різниці температур суміші води та повітря, в якому також є молекулярна водяна пара.

На підставі викладених результатів проведемо стисле обґрунтування можливого варіанту конструкції модуля гідравлічного кондиціонера.

Накопичені аналітичні та експериментальні показники процесів, що відбуваються, дозволяють розробити варіант конструкції гідравлічного кондиціонера рудничного повітря на основі модуля з багатокамерними водяними ежекторами (рис. 4).

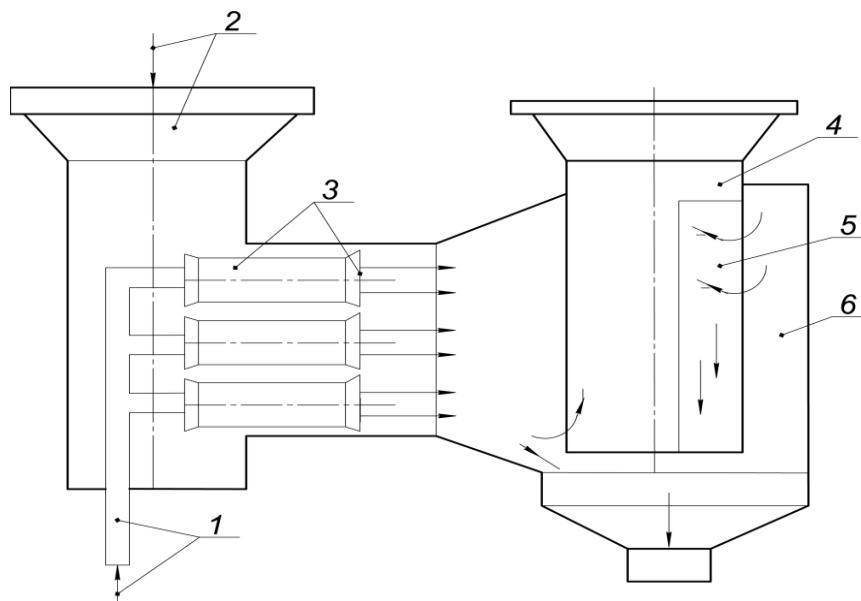


Рисунок 4 – Схема модуля гідравлічного кондиціонера

На рис. 4 показано варіант схеми конструкції модуля гідравлічного кондиціонера рудничного повітря, який має трубу 1, по якій під тиском подається вода на блок

багатокамерних ежекторів 3, а каналом 2 надходить тепле рудничне повітря для охолодження і очищення від пилу. На цій схемі також вказано: 4 – труба виходу охолодженого та очищеного повітря; 5 – канал розділення крапель і повітря; 6 – камера відділення води.

Гідравлічний кондиціонер необхідної потужності має складатися з модулів потужністю 10 кВт генерації холоду, та бути спеціально розрахований для конкретних умов локальної зони вугільної шахти, наприклад, при комбайновому руйнуванні гірських порід, на ділянках вентиляційних штреків, що примикають до лав, можливе розташування кількох послідовних модулів кондиціонерів. У відкотних виробках, в пунктах навантаження гірничої маси, в зонах дії перекидачів і сполучень можливе паралельне розташування означених модулів. У виробках з ухилами, бремсбергами, ділянках підготовчих виробок, конвеєрних, а також у процесах пересування секцій механізованого кріплення гідравлічні кондиціонери можуть бути змонтованими на пересувних рейкових транспортних платформах.

Обговорення результатів. Особливість запропонованого способу гідравлічного кондиціювання рудничного повітря в тому, що холодоагентом та очищувачем є вода, яка може бути підключена до пожежної системи шахти. Проведені випробування показали перевагу гідравлічного кондиціювання рудничного повітря, яке ефективніше за існуючі засоби. Запропонований спосіб кондиціювання повітря може бути використаний при початкових температурах води в діапазоні від 1 до 20°C і температурах повітря не вище 45°C.

Розвиток даного дослідження з розробки гідравлічного кондиціонера рудничного повітря у перспективі можливий у вивченні послідовної та паралельної роботи ежекторних модулів, з яких складаються кондиціонери. Крім цього перспективною є розробка спеціальних конструкцій портативних та автономних установок для локальних робочих зон у глибоких вугільних шахтах з можливим використанням льоду, особливо в зимовий сезон.

Висновок. Виходячи з вищевикладеного, найбільш раціональним є гідродинамічний спосіб охолодження рудничного повітря в локальних зонах гірничих виробок. Аналіз відомих наукових праць і технічних показників установок, які діють на шахтах, показав, що невирішеним питанням для застосування зрошування водою як способу охолодження рудничного повітря, є визначення кінцевої якості повітря за показниками температури, запиленості і вологості. Запропоновані аналітичні та практичні обґрунтування доцільності обробки рудникового повітря дрібнодисперсною холодною водою становлять певне наукове рішення означеної задачі для конкретної розробки ефективного гідродинамічного кондиціонера заданої потужності на основі розроблених модулів багатокамерних водяних ежекторів потужністю 10 кВт.

Виникнення в багатокамерних ежекторах імпульсних та хвилових ефектів підвищує кондиціювання рудникового повітря крапельною водою. Ефективність кондиціювання повітря з хвиловими ефектами в середньому збільшується на 40% порівняно з відсутністю пульсацій потоку в ежекторах. Необхідна частота пульсацій тиску в потоці суміші повітря та крапель створює в кондиціонері емульсію, яка підвищує ефективність охолодження та очищення рудничного повітря, а отже й заходів з охорони праці гірників за факторами якості повітря.

Список літератури

1. Климов А.А. Оценка эффективности системы вентиляции шахт / А. А. Климов. Охрана труда (по отраслям) 2000. №1 С. 145 Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/otsenka-effektivnosti-sistemy-ventilyatsii-shakht-podmoskovnogo-basseina>
2. Ковальчук А.Б. Аэрологический контроль в шахтах / А. Б. Ковальчук // Аэрологический контроль в шахтах 2010. №1 С. 4 Режим доступа: <http://alversch.ru/proizvodstvo-i-texnologii/aerologicheskij-kontrol-v-shaxtax.html>
3. Ковальчук А.Б. Средства нормализации воздуха / А. Б. Ковальчук. Средства нормализации воздуха 2014. №2. С. 4 Режим доступа: <http://studopedia.org/8-49850.html>
4. Мартынов, А.А. Кондиционирование воздуха в действующих глубоких шахтах / А.А. Мартынов, С.Г. Лунев, А.К. Яковенко, В.И. Солдатов, А.С. Розенберг. Уголь Украины. Безопасность труда. № 5. 2002. С. 44.
5. Мартынов, А.А. Предельно допустимая температура воздуха и профилактика тепловых поражений в глубоких шахтах / А.А. Мартынов, Брюханов А.М., В.В. Мухин. Уголь Украины. 2004. №11. С. 39–42.
6. Мартынов А.А. Программное обеспечение тепловых расчетов для проектирования мер борьбы с высокими температурами воздуха в глубоких шахтах / А.А.Мартынов, Н.В.Малеев, А.К.Яковенко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 10. С. 228-237.
7. Курук, А.Ф., 2020. Система кондиционирования воздуха с замкнутым контуром: система на основе возобновляемых источников энергии для глубоких шахт / Али Фахреттин Курук [Сейед Али Горейши-Мадисех](https://www.sciencedirect.com/translate/goog/science/article/pii/S2095268620304468?x_tr_sl=en&x_tr_tl=ru&x_tr_hl=ru&x_tr_pto=nui.sc#) ^аФарамарз П. Хассани. - Джерело: https://www.sciencedirect.com/translate/goog/science/article/pii/S2095268620304468?x_tr_sl=en&x_tr_tl=ru&x_tr_hl=ru&x_tr_pto=nui.sc#
8. Nikodem Szlęzak, Justyna Swolkień. Functioning Efficiency of the Central Air-Conditioning System on the Selected Example.
9. Amin Kamyar (2016), Closed-loop bulk air conditioning: A renewable energy-based system for deep mines in arctic regions. Джерело: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095268620304468> <https://ro.uow.edu.au/coal/615/>
10. [Heat Stress. Mine Safety and Health Administration \(MSHA\).](https://www.msha.gov/heat-stress) – Джерело: <https://www.msha.gov/heat-stress>
11. Ventilation and Cooling in Underground Mines (2011). – Джерело: <https://www.iloencyclopaedia.org/part-xi-36283/mining-and-quarrying/item/604-ventilation-and-cooling-in-underground-mines>
12. Прогнозування та нормалізація теплових умов у вугільних шахтах: СОУ-Н 10.1.00174088.027:2011 [Чинний від 2011-08-12]. К.: Стандарт Міненерговугілля України. 2011. 188 с.
13. Липа, А. И. Кондиционирование воздуха. Основы теории. Современные технологии обработки воздуха [Текст] / Липа Александр Иванович. - Одесса : ОГАХ, изд-во ВМВ, 2010. 607 с. : табл., рис. - Библиогр.: с. 588-601.- ISBN 978-966-413-146-6. Режим доступа: <https://card-file.ontu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/3432/1/Lipa.pdf>
14. Прогнозування та нормалізація теплових умов у вугільних шахтах: СОУ-Н 10.1.00174088.027-2011. Київ: Міненерговугілля України, 2011. 188 с.
15. Кондиционер передвижной шахтный КПШ-130. URL: <http://holodmash.od.ua/ru/kpsh-130-2-0/>.
16. Патент на корисну модель № 80139. Ежекторный пиловловлювач. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 13.05.2013. / Винахідники: Тишин Р.О., Булгаков Ю.Ф., Гого В.Б., Попов О.О., Никифоров М.О.. Власник: Державний вищий навчальний заклад Донецький національний технічний університет.

References

1. Klimov A.A. Evaluation of the effectiveness of the mine ventilation system / A. A. Klymov // Occupational safety (by industry) 2000. No. 1 145 - Access mode: <http://www.dissercat.com/content/otsenka-effektivnosti-sistemy-ventilyatsii-shakht-podmoskovnogo-basseina>
2. Kovalchuk A.B. Aerological control in mines / A. B. Kovalchuk // Aerological control in mines 2010. No. 1 P. 4 Access mode: <http://alversch.ru/proizvodstvo-i-texnologii/aerologicheskij-kontrol-v-shaxtax.html>
3. Kovalchuk A.B. Means of air normalization / A. B. Kovalchuk // Means of air normalization 2014. No. 2 P. 4 Access mode: <http://studopedia.org/8-49850.html>
4. Martynov, A.A. Air conditioning in active deep mines / A.A. Martynov, S.G. Lunev, A.K. Yakovenko, V.I. Soldatov, A.S. Rosenberg // Ugol Ukrainy. Labor safety. No. 5. 2002. 44.

5. Martynov, A.A. Maximum air temperature and prevention of heat damage in deep mines / A.A. Martynov, A.M. Bryukhanov, V.V. Mukhin // *Ugol Ukrainy*. 2004. No. 11. 39–42.
6. Martynov A.A. Thermal calculation software for the design of measures to combat high air temperatures in deep mines / A.A. Martynov, N.V. Maleev, A.K. Yakovenko // *Mountain Information and Analytical Bulletin* (scientific and technical journal). 2015. No. 10. 228–237.
7. Kuyuk, AF, 2020. Air conditioning system with a closed circuit: a system based on renewable energy sources for deep mines / Ali Fahrettin Kuyuk Seyed Ali Goreishi-Madiseh and Faramarz P. Hassany.- Source: https://www.sciencedirect.com.translate.goog/science/article/pii/S2095268620304468?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=nui,sc#
8. Nikodem Szlázak, Justyna Swolkień. Functioning Efficiency of the Central Air-Conditioning System on the Selected Example.
9. Amin Kamyar (2016), Closed-loop bulk air conditioning: A renewable energy-based system for deep mines in arctic regions. – Source: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095268620304468>
<https://ro.uow.edu.au/coal/615/>
10. Heat Stress. Mine Safety and Health Administration (MSHA). – Source: <https://www.msha.gov/heat-stress>
11. Ventilation and Cooling in Underground Mines (2011). Source: <https://www.iloencyclopaedia.org/part-xi-36283/mining-and-quarrying/item/604-ventilation-and-cooling-in-underground-mines>
12. Forecasting and normalization of thermal conditions in coal mines: SOU-H 10.1.00174088.027:2011 [Valid from 2011-08-12]. K.: STANDARD OF MINING COAL OF UKRAINE. 2011. 188.
13. Lypa, A. I. Air conditioning. Fundamentals of the theory. Modern air processing technologies [Text] / Lypa Alexander Ivanovich. - Odessa: OGAH, izd-vo VMV, 2010. - 607 p. : table, fig. - Bibliogr.: p. 588-601.- ISBN 978-966-413-146-6. – Access mode: <https://card-file.ontu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/3432/1/Lipa.pdf>
14. Forecasting and normalization of thermal conditions in coal mines: SOU-N 10.1.00174088.027-2011. Kyiv: Ministry of Energy and Coal of Ukraine, 2011. 188. – Source: <https://www.drs.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/93.pdf>
15. KPSH-130 mobile mine air conditioner. URL: <http://holodmash.od.ua/ru/kpsh-130-2-0/>.
16. Utility model patent No. 80139. Ejector dust collector. Registered in the State Register of Patents of Ukraine for utility models on 05/13/2013. / Inventors: Tyshin R.O., Bulgakov Y.F., Gogo V.B., Popov O.O., Nikiforov M.O. // Owner: State higher educational institution Donetsk national technical university.

Надійшла до редакції 17.05.2023

V. Gogo, S. Podkopaiev, N. Chernykh

JUSTIFICATION OF COMPLEX LABOR PROTECTION MEASURES FOR MINERS BY MINE AIR QUALITY FACTORS

The results of an analytical-experimental study related to the actual task of substantiating comprehensive measures for occupational safety of miners in deep coal mines on the factors of mine air quality based on the study of hydrodynamic air conditioning processes, which is especially important for the development of autonomous and energy-saving means of ensuring miners' occupational safety standards, are presented.

Purpose. *The goal is to substantiate and analytically study the main thermodynamic characteristics of the process of hydraulic mine air conditioning for the development of functional modules of mine air conditioners with variable indicators of rational capacities that satisfy the specific conditions of miners' workplaces in deep coal mines.*

Methodology. *The general research methodology is based on a systematic approach to the analysis of hydraulic and thermodynamic processes, which include a complex of analytical study of the mixture of air with water droplets with substantiation and development of a mathematical model in the working volume of the air conditioner, analysis of experimental laboratory and industrial data by methods of mathematical statistics, as well as generalization regarding the determination of regularities of the main characteristics of the thermodynamic process of hydrodynamic conditioning of mine air.*

The results. *The enthalpy and humidity indicators of the mine air have been analytically determined for the study of the energy state of the active component of the working body of the flow of a mixture of air and water droplets; diagrams of the assessment of the essence of the change in the thermodynamics of the working mixture in the hydrodynamic air conditioner have been obtained, as well as the energy characteristic of the change in the relative humidity of the air during its cooling with a change in the pressure and temperature of the working mixture in the multi-chamber ejector of the hydrodynamic air conditioner.*

Scientific novelty. For the first time, thermodynamic indicators of the state of the working mixture of thermopotential air and droplet water before and after conditioning, as well as indicators of changes in enthalpy, humidity and temperature of the mine air in the hydrodynamic conditioner, have been determined analytically.

The practical significance of the results of the presented research is that, on the basis of energy characteristics, it becomes possible to calculate the necessary initial temperatures of water (in the range of 1.0°C-20°C) supplied to the hydrodynamic air conditioner and the initial air temperature (for limits of 30-50°C), which is a technical condition for the development of an ejector module of a hydrodynamic conditioner for a specific local working area of a deep coal mine.

Keywords: labor protection, coal mine, mine air, water ejector, hydrodynamic conditioner.

Відомості про авторів

Гого Володимир Бейлович, професор, доктор технічних наук, професор кафедри прикладної механіки ДВНЗ ДонНТУ, м. Луцьк; volodymyr.hoho@donntu.edu.ua

Подкопаєв Сергій Вікторович, професор, доктор технічних наук, проректор з наукової роботи ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк; serhii.podkopaiev@donntu.edu.ua

Черних Надія Сергіївна, аспірантка ДВНЗ ДонНТУ, м. Луцьк; nadiia.chernykh@donntu.edu.ua

Gogo Volodymyr Beilovych, Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of applied mechanics of the State Technical University “Donetsk National Technical University”, Lutsk; volodymyr.hoho@donntu.edu.ua

Podkopaiev Serhii Viktorovych, Professor, Doctor of Technical Sciences, Vice-rector for scientific work of the State Technical University “Donetsk National Technical University”, Lutsk; serhii.podkopaiev@donntu.edu.ua

Chernykh Nadiia Serhiivna, graduate student of the State Technical University of DonNTU, Lutsk; nadiia.chernykh@donntu.edu.ua

УДК 004.272.2:519.63

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-53-62>

Дмитрієва О.А., Гуськова В.Г.

ПАРАЛЕЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРУ СИМЕТРИЧНИХ ТЕПЛИЦЕВИХ МАТРИЦЬ З ПЕРЕТВОРЕННЯМИ ЛЕВІНСОНА-ДАРБІНА

У роботі досліджено сучасні підходи до математичного моделювання випадкових полів із застосуванням кореляційних матриць надвисоких розмірностей. Розглянуто прийоми побудови сурогатних моделей, орієнтованих на зменшення високої розмірності стохастичних вхідних просторів. Проведено порівняльний аналіз сучасних числових методів пошуку власних чисел заповнених матриць з оцінюванням можливостей розпаралелювання процесу обчислень. Для визначення діапазону спектру розподілу власних чисел симетричних теплицевих матриць і подальшої локалізації власних чисел запропоновано використання кіл Герцгоріна. Обґрунтовано використання паралельної процедури відокремлення і уточнення всіх власних чисел матриці з застосуванням пріоритетного пошуку найменшого(-ших), найбільшого(-ших) власних чисел. Розроблено програмний застосунок відокремлення і уточнення всіх власних чисел симетричних теплицевих заповнених матриць, що утворюються при математичному моделюванні випадкових полів. В якості тестових матриць в роботі застосовувалося генерування випадкових векторів довільних розмірностей з подальшим формуванням на таких векторах симетричних теплицевих матриць. Дослідження проводилися як для послідовних так і для паралельних реалізацій обчислювальних процесів. При тестуванні основні завдання було спрямовано на проведення порівняльного аналізу точності отриманих розв'язань, оцінювання коефіцієнту відношення загальної кількості завдань розбиття до таких, які приводили до отримання власного числа. Запропонований програмний продукт може використовуватися у числових симуляторах при реалізації математичних моделей потоків підземних вод та фізико-хімічних процесів розчинення речовин у глибоких водоносних горизонтах.

Ключові слова: спектр, власне число, симетричні теплицеві матриці, паралельні обчислення, перетворення Левінсона-Дарбіна, алгоритм Тренча, випадкове поле, висока розмірність

Вступ. При моделюванні випадкових процесів з необхідними характеристиками, які описують поведінку різних об'єктів, виникає потреба у генерації випадкових полів [1]. Одним із основних завдань стохастичного моделювання є ефективне подання невизначеності у випадкових полях [2-6]. Такі невизначеності є визначальними при обробці сигналів, оцінюванні властивостей матеріалів, поведінки будівельних конструкцій та споруд, водоносних горизонтів та оптичних ліній зв'язку з випадковими спотвореннями, при дослідженні фізико-хімічних процесів у пористих середовищах, під час аналізу соціальних та економічних процесів.

Одним із сучасних напрямків використання випадкових полів є числові симулятори для створення та реалізації моделей потоків підземних вод та фізико-хімічних процесів розчинення речовин у глибоких водоносних горизонтах [4]. Складність цих моделей, у яких, зазвичай, використовуються випадкові багатовимірні просторові поля, пов'язані з реалізацією дуже ресурсоємних як за часом, так і за обсягами пам'яті чисельних підходів. Саме тому відзначається зростаючий інтерес до розробки більш швидких та надійних статистичних апроксимацій для дорогих у обчислювальному відношенні симуляторів.

Так в [5] випадкові поля генеруються при створенні моделей потоку підземних вод, включаючи перенесення забруднюючих речовин. В [6] промодельовано процеси геологічного зберігання CO₂ у глибоких солоних водоносних горизонтах, що є потенційним способом обмеження викидів парникових газів в атмосферу при збереженні використання палива. При чисельній реалізації таких типів стохастичних процесів останнім часом активно почали використовувати сурогатні моделі, які, будучи орієнтованими на скорочення дуже високої розмірності вхідних і вихідних просторів в емуляторах гауссівських процесів, тим не менш, забезпечують збереження якісних особливостей вихідних моделей.

Об'єкт дослідження в роботі – процеси розпаралелювання обчислень власних значень симетричних теплицевих матриць, які утворюються при моделюванні стохастичних полів.

Предмет дослідження в роботі – паралельні чисельні методи відокремлення і уточнення власних чисел позитивно визначених симетричних теплицевих матриць великої розмірності.

Мета роботи спрямована на розробку і ефективну паралельну реалізацію чисельних методів визначення спектру симетричних теплицевих матриць із застосуванням алгоритмів Тренча та перетворень Левінсона-Дарбіна.

Завдання роботи полягають у дослідженні сучасних підходів до математичного моделювання випадкових полів із застосуванням кореляційних матриць надвисоких розмірностей; проведенні порівняльного аналізу числових методів пошуку власних чисел позитивно визначених, симетричних теплицевих заповнених матриць; визначенні за допомогою кіл Гершгоріна відрізка, якому належать всі власні числа теплицевої матриці; побудові паралельної процедури відокремлення і уточнення всіх власних чисел матриці з застосуванням пріоритетного пошуку найменшого(-ших), найбільшого(-ших) власних чисел; програмній реалізації і тестуванні розроблених методів.

Методи досліджень в роботі базувалися на основних положеннях обчислювальної математики із залученням апарату лінійної алгебри та теорії матричних обчислень. Аналіз предметної області здійснювався із застосуванням основних підходів теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії інтегральних рівнянь. При математичному моделюванні для оцінювання алгоритмічної складності і трудомісткості реалізації використовувався апарат теорії алгоритмів і теорії обчислювальних систем. Програмна реалізація, тестування і візуалізація отриманих результатів здійснювалися із залученням сучасних обчислювальних технологій.

1. Оцінка сучасного стану порушеної проблеми. При побудові математичних моделей стохастичних процесів виникає необхідність наближених обчислень власних чисел та векторів однорідного інтегрального оператора Фредгольма другого роду, ядром якого є задана кореляційна функція процесу, що моделюється [3]. При цьому збільшення розмірності кореляційної матриці призводить до значного зростання обчислювальної складності завдання на власні значення, оскільки, крім високої розмірності, матриця є заповненою. У той же час утворена матриця є позитивно визначеною, симетричною та теплицевою, що, безумовно, необхідно враховувати у подальших дослідженнях. При цьому зрозуміло, що через високі розмірності кореляційних матриць знаходження власних значень аналітичними методами є неможливим, тому орієнтуються на чисельні методи розв'язання або методи розкладання. Незважаючи на наявність величезної кількості робіт, присвячених проблематиці визначення власних чисел, обліку специфіки видів та розмірностей матриць, а також спрямованості пошуку (найбільші, найменші власні числа, обмежена множина, амплітуда спектру тощо) питання розробки ефективних алгоритмів, у тому числі таких, що допускають паралельну реалізацію, залишаються актуальними та затребуваними.

2. Дослідження існуючих підходів до вирішення порушеної проблеми. Одним з основних методів наближених обчислень власних чисел і векторів кореляційної матриці високої розмірності є швидке перетворення Фур'є [7], яке забезпечує розкладання реальної функції на нескінченну лінійну комбінацію ортогональних, зазвичай, тригонометричних, базисних функцій. Як варіант поширення аналізу Фур'є від детермінованих функцій до випадкових процесів у роботах [8-10] розглядають декомпозицію Карунена-Лоева, яка є розкладанням процесу на ряд ортогональних функцій, а процес знаходження коефіцієнтів, за аналогією зі швидким перетворенням Фур'є, спрямований на мінімізацію середньоквадратичної помилки. Однак ефективність

використання розкладання Карунена-Лоева сильно залежить від кількості випадкових величин, необхідних у усиченому поданні розширення для досягнення заданої точності, є дуже дорогим для завдань великої розмірності з малою кореляційною довжиною [8], що зумовлює застосування таких підходів переважно до завдань, визначених у низькорозмірних вхідних просторах [9]. Саме тому протягом останнього десятиліття було розроблено кілька методів представлення багатовимірних моделей для зменшення високої розмірності стохастичних вхідних просторів [4]. Такі підходи дозволяють розбити вихідну багатовимірну модель на набір підмоделей нижчої розмірності, що призводить до менших обчислювальних зусиль при реалізації підмоделей, які опрацьовують будь-яким чисельним методом(-ами). Одним із кращих методів для використання у багатовимірних моделях є метод стохастичної колокації [6]. Проте для деяких моделей кількість стохастичних ступенів свободи, необхідних для отримання прийнятних результатів, як і раніше, є надто значною. Однією з альтернатив подолання проблеми високої розмірності є розробка підходів, спрямованих на розпаралелювання обчислювального процесу.

Виходячи з величезної різноманітності розв'язуваних проблем, у яких висуваються ті чи інші обмеження, пов'язані з визначенням спектра власних чисел, багато авторів пропонують деякі модифікації відомих алгоритмів [10-13], нові підходи до організації паралельних обчислювальних процесів, оскільки проблема пошуку власних чисел для деяких матриць може виникати не тільки як відокремлене завдання лінійної алгебри, а й як похідне завдання під час аналізу стійкості чисельних схем, розв'язання нормальних диференціальних рівнянь, передавальних функцій систем управління тощо.

Відомо [11], що немає прямих методів, використання яких призводило б до обчислення спектра довільної матриці за кінцеве число операцій, проте це завдання успішно реалізують ітераційні методи, засновані, наприклад, на QR-розкладанні [12-13]. Однак, у разі наявності деяких особливостей матриць, які можуть бути успішно використані для пошуку спектра, можна запропонувати ефективніші методи, ніж QR-алгоритм.

Так у роботі [14] для чисельного моделювання вібраційних процесів запропоновано модифікацію алгоритму Чебишева-Девідсона. Автори заявляють про скорочення часу обчислень з використанням запропонованої модифікації, а також про більшу стабільність, але при цьому йдеться про сильно розріджені стрічкові матриці, а основне завдання полягає у обчисленні кількох найменших власних значень та відповідних власних векторів. У роботах [15-16] розглядаються питання спектральної структури позитивно визначених ермітових теплицевих матриць з використанням перетворень Левінсона-Дарбіна [16], але так само, як і в попередній групі робіт, авторів цікавлять лише проблеми знаходження найменших власних значень.

В [15] було запропоновано ітераційну процедуру обчислення власних значень теплицевих матриць, яка при незначних модифікаціях допускає ефективну паралельну реалізацію. Також питанням паралельної реалізації присвячено роботу [17], в якій розглядається підхід, заснований на факторному зрушенні з використанням алгоритму Левінсона-Дарбіна [11] для організації паралельної процедури знаходження власних чисел теплицевих матриць. В роботі [16] також був використаний алгоритм Левінсона-Дарбіна і метод Ньютона вже для обчислення найменшого власного значення симетричної позитивно визначеної тепличної матриці. В той же час пропонується в цій роботі підхід дозволяє паралельно визначити будь-яке власне значення або, взагалі, всі.

3. Розробка та обґрунтування математичної моделі. При моделюванні стохастичного поля утворюється кореляційна симетрична теплицева матриця R_n порядку $n \times n$, яка має наступний вигляд

$$R_n = \begin{pmatrix} \rho_0 & \rho_1 & \rho_2 & \dots & \rho_{n-2} & \rho_{n-1} \\ \rho_1 & \rho_0 & \rho_1 & \dots & \rho_{n-3} & \rho_{n-2} \\ \rho_2 & \rho_1 & \rho_0 & \dots & \rho_{n-4} & \rho_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \rho_{n-2} & \rho_{n-3} & \dots & \dots & \rho_0 & \rho_1 \\ \rho_{n-1} & \rho_{n-2} & \dots & \dots & \rho_1 & \rho_0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Основною метою дослідження є визначення спектру матриці (1), яка, з одного боку, має дуже високу розмірність, тобто $n \rightarrow \infty$, а з іншого боку, така матриця має регулярну структуру, яка однозначно задається вектором з елементами $\{\rho_k\}, 0 \leq k \leq n-1$, відтоді сама матриця може бути утворена з елементів вектору у такий спосіб

$$R_n = \{\rho_{|k-l|}\}, \quad 0 \leq k, l \leq n-1.$$

Метод Тренча полягає у знаходженні коренів раціональної функції $q_n(\lambda)$. При зроблених припущеннях щодо матриці R_n , це завдання рівнозначне завданню знаходження власних значень зсунених матриць $R_m - \lambda I_m$. Для знаходження власних значень матриці R_n можна використовувати модифікований алгоритм Левінсона-Дарбіна [11], еквівалентний в даному випадку побудові LDL^T розкладання для матриці $R_m - \lambda I_m$. Процедура пошуку власних чисел теплицевої матриці у відповідності до [15] може бути зведеною до пошуку нулів раціональної функції

$$q_m(\lambda) = \frac{p_m(\lambda)}{p_{m-1}(\lambda)}, \quad (2)$$

де

$$p_m(\lambda) = \det[R_m - \lambda I_m].$$

Такий підхід дозволяє визначити будь-яке власне значення R_n , яке також не є власним значенням жодної з вкладених підматриць $R_1, R_2, \dots, R_{n-1}$.

Побудова процедури обчислювального процесу відбувається у наступній послідовності. Спочатку відбувається ініціалізація стартових значень

$$q_1(\lambda) = \rho_0 - \lambda, \quad z_{1,1}(\lambda) = \frac{\rho_1}{q_1(\lambda)},$$

далі рекурсивно визначається (нарощується) раціональна функція $q_n(\lambda)$ у відповідності до співвідношень

$$q_m(\lambda) = \left(1 - z_{m-1,m-1}^2(\lambda)\right) q_{m-1}(\lambda),$$

$$z_{m,m}(\lambda) = q_m^{-1}(\lambda) \left(\rho_m - \sum_{j=1}^{m-1} \rho_{m-1} z_{j,m-1}(\lambda) \right),$$

$$z_{j,m}(\lambda) = z_{j,m-1}(\lambda) - z_{m,m}(\lambda) z_{m-j,m-1}(\lambda), \quad 1 \leq j \leq m-1.$$

Схематична ілюстрація роботи алгоритму знаходження власних чисел теплицевої матриці R_n наведена на рис. 1. Спочатку з використанням кіл Гершгоріна визначається амплітуда розкиду власних значень. Для запобігання точного співпадіння власного значення і початкових границь розбиття в модель додаються випадкові збурення, що незначно розширюють визначені границі. Далі запускаються процедури розбиття отриманого відрізка з генерацією множини завдань, кожне з яких має на меті відокремлення «свого» власного значення. Як тільки власне число стає ізольованим, запускається процедура уточнення (стискання) інтервалу ізоляції до досягнення заданої точності. Такі процедури стискання можуть реалізовуватися незалежно, а кількість обчислювальних процесів уточнення регламентується розмірністю початкової матриці і числом наявних процесорів. В роботі процедура уточнення виконувалася з використанням методу бісекції, при тому, що можна було б застосувати методи, які характеризуються кращими показниками збіжності ітераційного процесу. В той же час, враховуючи специфіку матриць, для яких виконується пошук власних чисел, слід зазначити, що дуже малі власні значення у такий спосіб обчислюються точніше, ніж в конкуруючих алгоритмах.

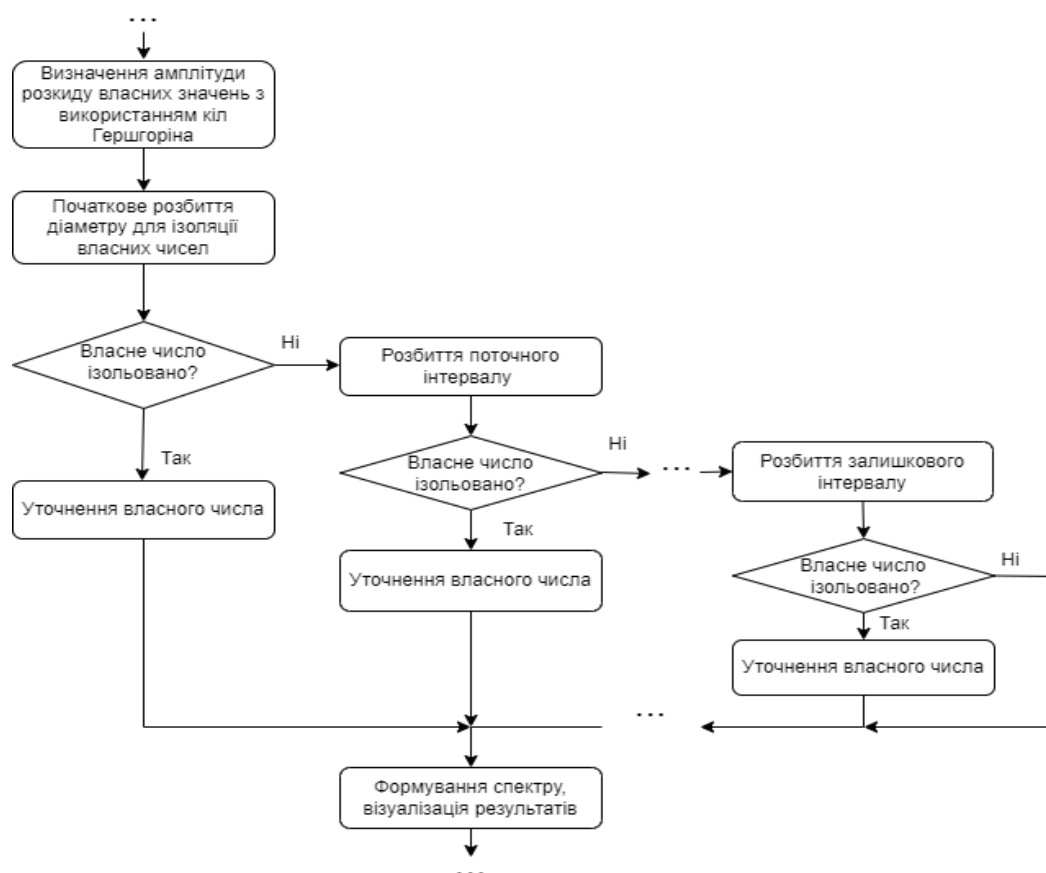


Рисунок 1 – Схема розпаралелювання процедури ізоляції і уточнення власних чисел

На основі запропонованої моделі було розроблено програмну систему, яка може працювати як в послідовному варіанті, так і з орієнтацією на паралельну архітектуру. Причому зрозуміло, що розподілення обчислень відбувається лише після визначення амплітуди розкиду всіх власних значень. Основною перевагою розробленої програмної реалізації є можливість керування порядком і кількістю визначення власних чисел з огляду на проблематику поставленого завдання. Якщо завдання спрямовані на пошук найбільшого (найбільших) або найменшого (найменших) власних чисел, у програмному коді передбачена можливість відповідних налаштувань. В протилежному випадку ніяких втручань у послідовність обчислень не відбувається.

4. Тестова реалізація процедури визначення власних чисел теплицевих матриць. В якості тестових матриць в роботі застосовувалося генерування випадкових векторів довільних розмірностей з подальшим формуванням на таких векторах симетричних теплицевих матриць. Дослідження проводилися як для послідовних так і для паралельних реалізацій обчислювальних процесів. При тестуванні основний упор здійснювався на проведення порівняльного аналізу точності отриманих розв'язків. Також оцінювалося відношення загальної кількості згенерованих завдань до результативних, таких, які приводили до ізолювання власного числа на інтервалі. Разом з тим слід зазначити, що оцінки отримувалися для матриць, які генерувалися випадково, отже, з одного боку порівняння кожного разу проводилося на неспівпадаючих матрицях, а з іншого боку, велика кількість проведених експериментів надає змогу стверджувати, що на всі типи показників, які досліджувалися, конкретні значення елементів матриці не впливають. Мова йде лише про впливовість розмірностей матриць і заданої точності обчислень. На рис. 2 наведені схеми утворення кіл Гершгоріна для випадково

згенерованої симетричної теплицевої матриці, $n=6$. На рис. 2а) наведено результат початкового визначення границь інтервалу дійсної вісі, який містить всі власні числа згенерованої матриці. Після застосування процедур ізоляції і уточнення кожного власного числа для всієї множини, утворюється остаточний розподіл кіл Гершгоріна з відокремленими власними числами (рис. 2б).

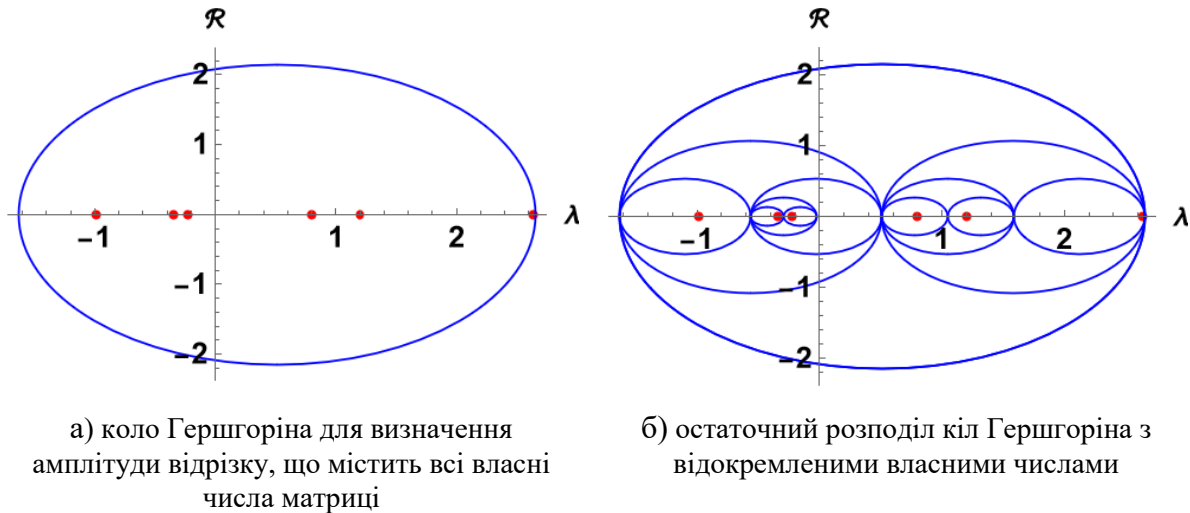


Рисунок 2 – Кола Гершгоріна для випадково згенерованої симетричної теплицевої матриці, $n=6$

На рис. 3 наведено результати комп'ютерних експериментів, які проводилися з випадково згенерованою симетричною теплицевою матрицею розмірності $n=200$. Показано остаточний розподіл кіл Гершгоріна з відокремленими власними числами (рис. 3а) та розподіл всіх власних чисел тестової матриці (рис. 3б).

Розроблена програмна система дозволяє також забезпечувати задану точність обчислень ϵ шляхом стискання відповідного інтервалу ізоляції $[\alpha_i, \beta_i]$ для кожного i -го ($i = 1, 2, \dots, n$) власного значення до амплітуди $(\beta_i - \alpha_i)/2 < \epsilon$. На рис. 4 показано результати розбіжностей при обчислень власних значень випадково згенерованої симетричної теплицевої матриці з заданими порядками точності $\epsilon = 10^{-3}$ (рис. 4 а) і $\epsilon = 10^{-6}$ (рис. 4 б).

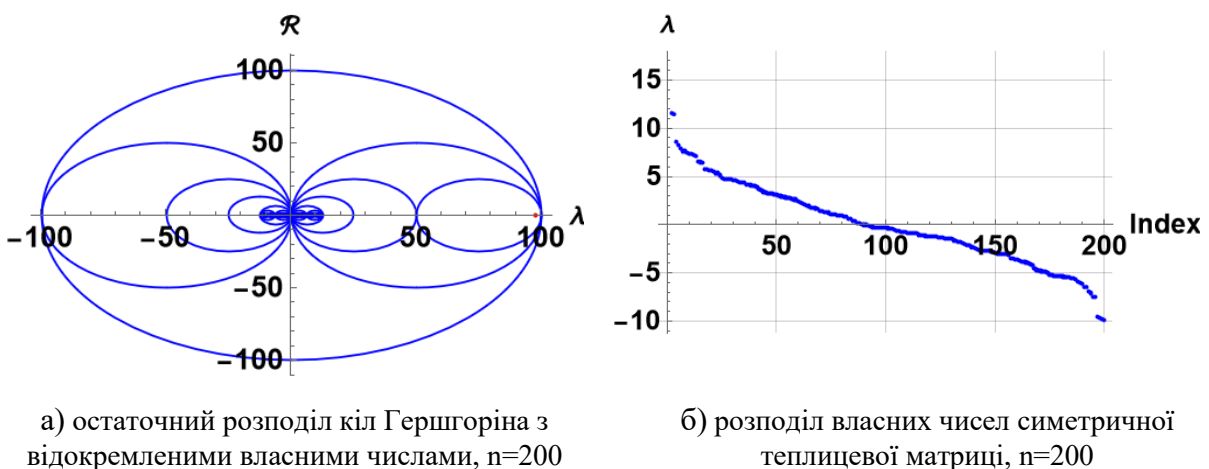


Рисунок 3 – Кола Гершгоріна і розподіл власних чисел для випадково згенерованої симетричної теплицевої матриці, $n=200$

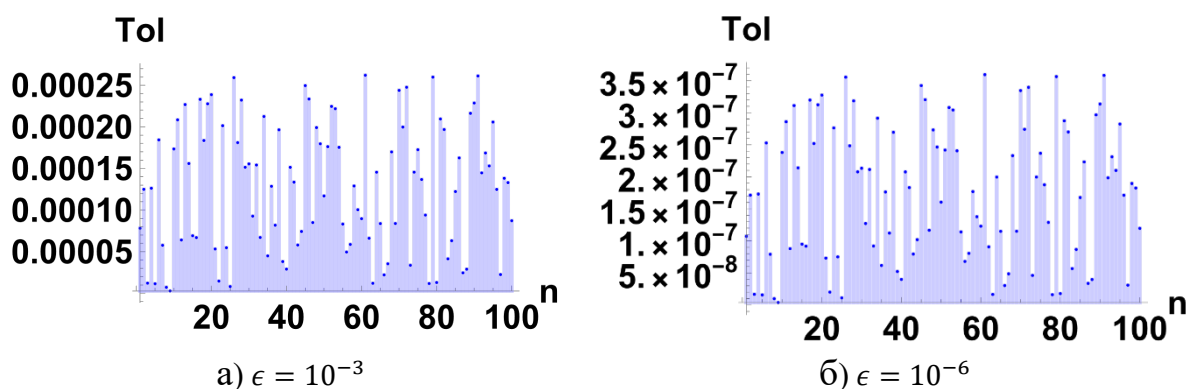


Рисунок 4 – Абсолютні величини розбіжностей всіх власних чисел для випадково згенерованої симетричної теплоцевої матриці, $n=100$

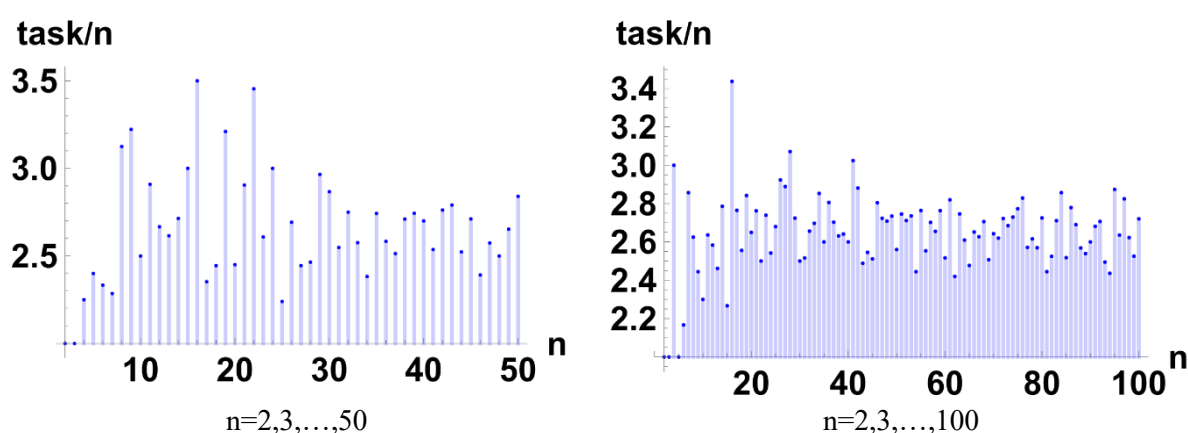


Рисунок 5 – Усереднені показники відношень загальної кількості згенерованих завдань до результативних при визначенні власних чисел для випадково згенерованих симетричних теплоцевих матриць

Результативність запропонованого підходу також перевірялась із застосуванням критерію, що регламентує відношення загальної кількості завдань розбиття до результативних, таких, які приводили до отримання власного числа. Можна сказати, що цей показник залишався сталим для будь-яких розмірностей матриць (рис. 5 а),б)). Тут слід сказати, що, оскільки всі експерименти були неповторюваними через застосування генераторів випадкових чисел для теплоцевих матриць довільних розмірностей, то, зрозуміло, що навіть для матриць співпадаючих розмірностей, цей показник може відрізнятися.

Висновки. Результати досліджень, наведені у статті, орієнтовано на застосування у математичних моделях, які спрямовані на опрацювання випадкових багатовимірних просторових полів, що пов'язано з реалізацією дуже ресурсоємних як за часом, так і за ресурсами пам'яті чисельних підходів. У роботі досліджено сучасні підходи до математичного моделювання випадкових полів із застосуванням кореляційних матриць надвисоких розмірностей. Розглянуто прийоми побудови сурогатних моделей, орієнтованих на зменшення високої розмірності стохастичних вхідних просторів. Проведено порівняльний аналіз сучасних числових методів пошуку власних чисел заповнених матриць з оцінюванням можливостей розпаралелювання процесу обчислень. Для визначення діапазону спектру розподілу власних чисел симетричних теплоцевих матриць і подальшої локалізації власних чисел запропоновано використання кіл Гершгоріна. Обґрунтовано використання паралельної процедури відокремлення і

уточнення всіх власних чисел матриці з застосуванням пріоритетного пошуку найменшого(-ших), найбільшого(-ших) власних чисел. Розроблено програмний застосунок відокремлення і уточнення всіх власних чисел симетричних теплицевих заповнених матриць, що утворюються при математичному моделюванні випадкових полів. В якості тестових матриць в роботі застосовувалося генерування випадкових векторів довільних розмірностей з подальшим формуванням на таких векторах симетричних теплицевих матриць. Дослідження проводилися як для послідовних так і для паралельних реалізацій обчислювальних процесів. При тестуванні основні завдання було спрямовано на проведення порівняльного аналізу точності отриманих розв'язань, оцінювання коефіцієнту відношення загальної кількості завдань розбиття до таких, які приводили до отримання власного числа.

Наукова новизна полягає в розробці модифікації методу Тренча з використанням перетворень Левінсона-Дарбіна, які орієнтовані на організацію паралельної процедури обчислення власних чисел позитивно визначених симетричних теплицевих матриць великої розмірності.

Практичне значення роботи полягає у створенні програмного застосунку відокремлення і уточнення всіх власних чисел симетричних теплицевих заповнених матриць, що утворюються при математичному моделюванні випадкових полів. Розроблений програмний застосунок дозволяє проводити паралельні обчислення для визначення власних чисел з застосуванням процедури пріоритетного пошуку найменшого(-ших), найбільшого(-ших) власних чисел. Запропонований програмний продукт може використовуватися у числових симуляторах при реалізації математичних моделей потоків підземних вод та фізико-хімічних процесів розчинення речовин у глибоких водоносних горизонтах.

Список літератури

1. Liu Y. Advances in gaussian random field generation/ Y. Liu, J. Li, S. Sun, B. Yu// Computational Geosciences. –2019, Vol. 23(5). P. 1011-1047.
2. Crevillen-Garcia D. Gaussian process modelling for uncertainty quantification in convectively-enhanced dissolution processes in porous media/ D. Crevillen-Garcia, R.D. Wilkinson, A.A. Shah// Advances in Water Resources. 2017, Vol. 99. P. 1–14.
3. Efimov A. Modeling of random processes based on Karhunen-Loeve decomposition/ A. Efimov// Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2022, Vol. 22(4). P. 779-784.
4. Eftekhari A. High-Dimensional Dynamic Stochastic Model Representation/ A. Eftekhari, S. Scheidegger. 2022. P. 1-26, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.06555>
5. D. Crevillen-Garcia. Surrogate modelling for the prediction of spatial fields based on simultaneous dimensionality reduction of high-dimensional input/output spaces/ D. Crevillen-Garcia// Royal Society Open Science. – 2018, Vol. 5(4). P. 1–16, <https://doi.org/10.1098/rsos.171933>.
6. Opportunities and challenges in CO2 geologic utilization and storage/[L. Zhang, W. Nowak, S. Oladyskin, Y. Wang, J. Cai]// Advances in Geo-Energy Research. 2023, Vol. 8(3). P. 141–145.
7. Fritz J. Application of FFT-based algorithms for large-scale universal kriging problems/ J. Fritz, I. Neuweiler, W. Nowak// Mathematical Geosciences. 2009, Vol. 41(5). P. 509–533.
8. Research on the Karhunen–Loève Transform Method and Its Application to Hull Form Optimization/ [H. Chang, C. Wang, Z. Liu, B. Feng, C. Zhan, X. Cheng]// Journal of Marine Science and Engineering. 2023, Vol. 11(1). <https://doi.org/10.3390/jmse11010230>
9. Pranesh S. Faster computation of the Karhunen–Loève expansion using its domain independence property/ S. Pranesh, D. Ghosh // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2014, Vol. 285. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2014.10.053>.
10. Wang L. Karhunen-Loeve expansions and their applications/ L. Wang// PhD thesis. 2008, London School of Economics and Political, 292 p. <http://etheses.lse.ac.uk/id/eprint/2950>
11. Demmel J. Applied numerical linear algebra/ J. Demmel. 1997, SIAM, Philadelphia. 416 p.
12. Unfried J. Fast Time-Evolution of Matrix-Product States using the QR decomposition/ J. Unfried, J. Hauschild, F. Pollmann // Quantum Physics. 2022. P. 1-6. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.09782>

13. Ni X. A randomized algorithm for the QR decomposition-based approximate SVD/ X. Ni, A.B. Xu// Numerical Analysis. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.11450>
14. A New Subspace Iteration Algorithm for Solving Generalized Eigenvalue Problems/ [B. Wang, H. An, H. Xie, Z. Mo. 2023. P. 1-17. <https://arxiv.org/pdf/2212.14520.pdf>
15. Trench W. Numerical solution of the eigenvalue problem for Hermitian Toeplitz matrices/ W. Trench// SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications. – 1989, Vol. 10(2). P. 135-146.
16. Cybenko G. The numerical stability of the Levinson-Durbin algorithm for Toeplitz systems of equations/ G. Cybenko// Siam Journal on Scientific and Statistical Computing. – 1980, Vol. 1(3). P. 303-319.
17. Noor F. Using MPI on PC Cluster to Compute Eigenvalues of Hermitian Toeplitz Matrices/ F. Noor, S. Misbahuddin// Algorithms and Architectures for Parallel Processing. 2010, Springer, Berlin. 323 p.

References

1. Liu, Y., Li, J., Sun, S. and Yu, B. (2019) Advances in gaussian random field generation. Computational Geosciences. Vol. 23(5), 1011-1047.
2. Crevillen-Garcia, D., Wilkinson, R.D. and Shah, A.A. (2017) Gaussian process modelling for uncertainty quantification in convectively-enhanced dissolution processes in porous media. Advances in Water Resources. Vol. 99, 1–14.
3. Efimov, A. (2022) Modeling of random processes based on Karhunen-Loeve decomposition. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. Vol. 22(4), 779-784.
4. Eftekhari, A. and Scheidegger, S. (2022) High-Dimensional Dynamic Stochastic Model Representation. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.06555>
5. Crevillen-Garcia, D. (2018) Surrogate modelling for the prediction of spatial fields based on simultaneous dimensionality reduction of high-dimensional input/output spaces. Royal Society Open Science. Vol. 5(4), P.1–16. <https://doi.org/10.1098/rsos.171933>
6. Zhang, L., Nowak, W., Oladyshkin, S., Wang, Y. and Cai, J. (2023) Opportunities and challenges in CO2 geologic utilization and storage. Advances in Geo-Energy Research. Vol. 8(3), 141–145.
7. Fritz, J., Neuweiler, I. and Nowak, W. (2009) Application of FFT-based algorithms for large-scale universal kriging problems. Mathematical Geosciences. Vol. 41(5), 509–533.
8. Chang, H., Wang, C., Liu, Z., Feng, B., Zhan, C. and Cheng, X. (2023) Research on the Karhunen–Loève Transform Method and Its Application to Hull Form Optimization. Journal of Marine Science and Engineering. Vol. 11(1). <https://doi.org/10.3390/jmse11010230>
9. Pranesh, S. and Ghosh, D. (2014) Faster computation of the Karhunen–Loève expansion using its domain independence property. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Vol. 285. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2014.10.053>
10. Wang, L. (2008) Karhunen-Loeve expansions and their applications. PhD thesis. London School of Economics and Political, 292. <http://etheses.lse.ac.uk/id/eprint/2950>
11. Demmel, J. (1997) Applied numerical linear algebra. SIAM, Philadelphia. 416.
12. Unfried, J., Hauschild, J. and Pollmann, F. (2022) Fast Time-Evolution of Matrix-Product States using the QR decomposition. Quantum Physics. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.09782>
13. Ni, X. and Xu, A.-B. (2023) A randomized algorithm for the QR decomposition-based approximate SVD. Numerical Analysis. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.11450>
14. Wang, B., An, H., Xie, H. and Mo, Z. (2023) A New Subspace Iteration Algorithm for Solving Generalized Eigenvalue Problems. <https://arxiv.org/pdf/2212.14520.pdf>
15. Trench, W. (1989) Numerical solution of the eigenvalue problem for Hermitian Toeplitz matrices. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications. Vol. 10(2), 135-146.
16. Cybenko, G. (1980) The numerical stability of the Levinson-Durbin algorithm for Toeplitz systems of equations. Siam Journal on Scientific and Statistical Computing. Vol. 1(3), 303-319.
17. Noor, F. and Misbahuddin S. (2010) Using MPI on PC Cluster to Compute Eigenvalues of Hermitian Toeplitz Matrices. Algorithms and Architectures for Parallel Processing. 2010, Springer, Berlin. 323.

Надійшла до редакції 30.05.2023

O. Dmytriieva, V. Huskova

PARALLEL DETERMINATION OF THE SPECTRUM OF SYMMETRIC TOEPLITZ MATRIXES WITH LEVINSON-DARBIN TRANSFORMATIONS

***Purpose.** The paper investigates modern approaches to mathematical modeling of random fields using correlation matrices of superhigh dimensions.*

Methodology. Techniques for constructing surrogate models focused on reducing the high dimension of stochastic input spaces have been considered. A comparative analysis of modern numerical methods for searching for eigenvalues of filled matrices has been carried out with an assessment of the possibilities of parallelizing the computation process. To determine the range of the distribution spectrum of eigenvalues of symmetric Toeplitz matrices and subsequent localization of eigenvalues, the use of Gershgorin circles has been proposed. As test matrices, we used the generation of random vectors of arbitrary dimensions, followed by the formation of symmetric Toeplitz matrices on such vectors.

Results. The studies have been carried out both for serial and parallel implementations of computational processes. When testing, the main tasks were aimed at conducting a comparative analysis of the accuracy of the solutions obtained, at estimating the coefficient of the ratio of the total number of partitioning problems to those that led to obtaining an eigenvalue.

Scientific novelty. The use of a parallel procedure for separating and refining all matrix eigenvalues using a priority search for the smallest(s), largest(s) of eigenvalues has been justified. A software application has been developed for separating and refining all eigenvalues of symmetric Toeplitz filled matrices, which are formed in the course of mathematical modeling of random fields.

Practical significance. The proposed software product can be used in numerical simulators for the implementation of mathematical models of groundwater flows and physicochemical processes of dissolution in deep aquifers.

Keywords: spectrum, eigenvalue, symmetric Toeplitz matrices, parallel computing, Levinson-Darbin transform, Trench algorithm, random field, high dimensionality.

Відомості про авторів

Дмитрієва О.А.^{1,2}, докт. техн. наук, проф.,

¹проф. кафедри математичних методів системного аналізу Національного технічного університету України «КПІ ім. І. Сікорського», e-mail: olga.dmytriyeva@lil.kpi.ua

²проф. Інституту моделювання водно-екологічних систем університету Штутгарта, Німеччина, e-mail: olga.dmytriyeva@iws.uni-stuttgart.de

Гуськова В.Г., PhD, ст. викл. кафедри математичних методів системного аналізу Національного технічного університету України «КПІ ім. І. Сікорського», e-mail: guskovavera2009@gmail.com

Dmytriieva O.^{1,2}, Doctor of Technical Sciences, Professor,

¹Prof. of the Department of Mathematical Methods in System Analysis, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", e-mail: olga.dmytriyeva@lil.kpi.ua,

²Prof. of the Institute for modelling hydraulic and environmental systems, University of Stuttgart, e-mail: olga.dmytriyeva@iws.uni-stuttgart.de.

Huskova V., PhD Tech., Senior Lecturer of the Department of Mathematical Methods in System Analysis, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", e-mail: guskovavera2009@gmail.com

УДК 504.75, 331.453

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-63-68>**Н.Е. Журавська, І.С. Стефанович, П.І. Стефанович, Т.О. Негрій****ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА У НАФТОГАЗОВІЙ ГАЛУЗІ**

Анотація. Стаття містить ряд методологічних і методичних матеріалів, які націлені на більш глибоку теоретичну підготовку в області видобутку нафти і газу. Поглиблення знань в сфері охорони та раціонального використання природних ресурсів і конкретизація практично дозволить забезпечити ефективну підготовку спеціалістів для нафтогазової промисловості. В статті розглянуті питання екологічної безпеки стосовно нафтогазової справи а також вказані екологічні загрози та їх наслідки при видобутку сланцевого газу. Вони включають оцінку впливу на оточуюче середовище в процесі пошуку, розвідки й видобування нафти й газу, їх переробки й транспортування. В короткій формі вказано на антропогенний вплив на геологічне середовище, показані основні джерела забруднення довкілля під час експлуатації систем збирання та транспортування продукції свердловин, а також показані основні причини виникнення негативних екологічних наслідків. Особлива увага приділена різного роду порушенням при бурінні та їх наслідкам, охороні підземних вод й над і вказано, що нафтопромислові стічні води можуть негативно вплинути на водопостачання населення об'єкта. Вказані основні причини аварій на об'єктах нафтогазового виробництва. Окремо описана рекультивація території і описані етапи цієї рекультивації. Розглянуто законодавче забезпечення охорони природи, в короткій формі вказано на міжнародне співробітництво, при цьому, вказується що Китай, США та інші країни миру не зупиняють розвиток галузі сланцевого газу хоча існує ряд негативних екологічних факторів.

Ключові слова: логістична система, система управління ризиками, алгоритм управління ризиками, розвідка, буріння, видобуток, переробка, транспорт, нафто-шлями, газо-провід, сланцевий газ.

Вступ. Прискорення темпів і розширення масштабів виробничої діяльності в сучасних умовах нерозривно пов'язано зі зростаючим використанням енергоємних технологій і небезпечних речовин. В результаті зростає потенційна загроза для здоров'я ів життя людей та навколишнього середовища.

В першу чергу це відноситься до об'єктів нафтогазового комплексу, де спостерігається постійна інтенсифікація технологій, наявністю високих температур та тисків, використанням потужних установок і апаратів, наявність в них значної кількості вибухо-пожежонебезпечних речовин.

Внаслідок чого, можливе зростання числа аварій з тяжкими техногенними, економічними та екологічними наслідками. Найбільші ці аварії і катастрофи, що сталися в останні роки в Україні та світі, забрали десятки і сотні людських життів, завдали значної шкоди довкіллю.

Число техногенних аварій в світі постійно зростає, що нівелює зусилля з розвитку економіки. Більшість розвинених країн переходить на нову стратегію забезпечення безпеки, яка заснована на принципах прогнозування і попередження техногенних аварій.

Основна ідея полягає в тому, що охорона природи при розвідці, видобутку та переробці корисних матеріалів; Розвідка, буріння та розробка нафтогазових місць створення повинні здійснюватися на єдиній науковій основі з використанням комплексного системного підходу. Тому з фактичними даними про вплив нафтогазового виробництва на природне середовище, стан природних компонентів і комплексів, способів і засобів природоохоронної діяльності на підприємствах.

Актуальність і мета теми дослідження обґрунтовується тим, що сучасні тенденції розвитку суспільних відносин, заснованих на розумінні реальних масштабів та соціально-економічних наслідків великих промислових аварій та катастроф, переходом до розробки, створення і експлуатації виробничих об'єктів на базі нових критеріїв і методів аналізу небезпек.

Застосування методів аналізу небезпек в практиці забезпечення техногенної безпеки, в тому числі при декларуванні безпеки і страхування відповідальності, вимагає створення єдиних методологічних підходів, які враховують специфіку небезпечних виробничих об'єктів і нормативних вимог у галузі техногенної та пожежної безпеки та захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій.

Виклад основного матеріалу. Охорона геологічного середовища – це здійснення комплексу заходів, спрямованих на запобігання втратам нафти в надрах внаслідок низької якості проходження свердловин, порушень технології розробки нафтових покладів та експлуатації свердловин, що призводять до передчасного обводнення або дегазації пластів, перетікання рідини між продуктивними та сусідніми горизонтами, руйнування нафто-вмісних порід, обсадної колони та цементу за нею.

Антропогенний вплив на геологічне середовище

1. Сільськогосподарське використання земель: – знищення або різке скорочення природного рослинного покриву, у тому числі ліквідація лісів; – активізація вітрової та водної ерозії внаслідок розорювання земель; – вплив на режим та склад підземних вод агрохімічними заходами (використання добрив та пестицидів); – засолення ґрунтів та ґрунтів внаслідок гідротехнічної меліорації (осушення або зрошення земель).

2. Пошуки, розвідка та розробка корисних копалин: – порушення природної рівноваги досліджуваних площ, забруднення підземних вод (гірські роботи та буріння); – будівництво кар'єрів при відкритих методах розробки супроводжуються порушенням ґрунтового покриву, створенням відвалів із розтину та непродуктивних порід, що стає причиною запилення атмосфери, порушення режиму підземних вод;

– газові викиди в процесі експлуатації вугільних шахт, а також утворення просадок та провалів у межах шахтного поля.

3. Розвідка та розробка нафтогазових родовищ: – перетікання вод та вуглеводнів (УВ); – забруднення ґрунтів, поверхневих та підземних вод викидами нафти, газу та конденсату, мінералізованих вод; – просідання земної поверхні при тривалій експлуатації родовищ; – аварійні викиди нафти та газу; – будівництво та експлуатація нафто- та газопроводів, морське транспортування нафти; – ліквідація шкідливих відходів виробництва, які потребують спеціальних заходів (переробка, поховання у глибокі горизонти).

4. Гідротехнічне будівництво: – зміна режиму ґрунтових вод (у тому числі, підтоплення прилеглих площ); – активізація процесів інфільтрації; – заболочування, можливість забруднення підземних вод; – збільшення навантаження на надра.

Забруднювачі нафтового виробництва. При розливі нафти утворюється суцільна нафтова плівка, що створює на воді емульсії. типу «вода в нафті» та «нафта у воді». Перша емульсія здатна руйнуватися під дією бактерій. Емульсія типу "шоколадний мус" практично не піддається бактеріальному руйнуванню і містить 30-40 мг/л нафти. Токсичність нафти залежить від її хімічного складу та якості нафтових кислот. Найбільшою токсичністю має емульгування у вигляді нафти. Концентрація її вище 0,05 мг/л і призводить до порушення біологічної рівноваги водойм, впливає на фізико-біологічну функцію організмів. Плівкова нафта менш токсична, але порушує біологічні та обмінні процеси між водою та повітряним середовищем.

Основними джерелами забруднення довкілля під час експлуатації систем збирання та транспортування продукції свердловин на нафтових родовищах є наступні споруди та об'єкти нафтопромислів:

1. Гирла свердловин та свердловинні ділянки, де розлив нафти, пластових та стічних вод відбувається через порушення герметичності гирлової арматури, а також під час проведення робіт з освоєння свердловин, капітального та профілактичного ремонту;

2. Трубопровідна система збору та транспорту видобутої рідини з пласта та закачування стічних вод у нагнітальні свердловини через нещільності в устаткуванні, промислових нафтозбірних та нагнітальних трубопроводах;

3. Резервуарні парки та дотискні збірні пункти, де розлив видобутої рідини відбувається при спуску із резервуарів стічних вод, забруднених опадами парафіносмолистих відкладень, переливах нафти через верх резервуарів;

4. Земляні комори, шлако-накопичувачі та спеціальні майданчики, в які скидаються опади з резервуарів та очисних споруд, що становлять відкладення важких

фракцій нафти, парафіно-смолистих речовин та всіляких домішок, насичених нафтою, нафтопродуктами та хімреагентами, а також твердих мінеральних домішок. В цих шламах можуть міститися до 80 - 85% нафти, до 50% механічних домішок, до 70% мінеральних солей та до 5% поверхнево-активних речовин;

5. Факельні установки призначені для спалювання некондиційних газів, що утворюються під час пуску, продування обладнання або в процесі роботи, подальша переробка яких економічно недоцільна або неможлива. З факельних пристроїв, котелень, нагрівальних печей як продукти згоряння в навколишнє середовище викидаються оксиди азоту, діоксид сірки, оксид вуглецю, сажа.

Причини виникнення негативних екологічних наслідків:

1. танкери, що сіли на мілину, що часто супроводжується витіканням нафти в акваторії;

2. залізничні аварії, внаслідок яких відбуваються пожежі, загоряння цистерн, що перекинулися;

3. аварії на трубопроводах.

На більшості нафтових родовищ способи очищення та утилізації стічних вод на промислах передбачають виділення основної маси нафтопродуктів та твердих домішок, які у стічних водах, в резервуарах.

Залежно від властивостей стічних вод основними способами очищення є: – механічний, – хімічний, – фізико-хімічний, – біохімічний (останній, на жаль, практично не використовується).

Нафтопромислові стічні води можуть негативно вплинути на стан водопостачання населення. Часті аварійні пориви водоводів стічних вод цехів підготовки та перекачування нафти у місцях водокористування населення призвели до потрапляння стоків у підземні води та різко погіршили склад води у колодязях та джерелах населених пунктів.

Рекультивация – це комплекс робіт, спрямованих на відновлення продуктивності та цінності порушених земель, а також на покращення умов навколишнього середовища.

Етапи рекультивации:

1. Технічний – підготовка порушених земель для подальшого цільового використання у народному господарстві: – очищення території; – планування порушених ділянок; – механічна обробка ґрунту для штучної аерації її верхніх горизонтів та прискореного вивітрювання забруднювача; – нанесення родючого шару ґрунтів; – будівництво доріг, гідротехнічних та меліоративних споруд.

Роботи цього етапу виконуються гірськими підприємствами чи підрядними спеціалізованими організаціями.

2. Біологічний – відновлення родючості (продуктивності) земель: – геліотермічна меліорація (глибоке оранка та залишити для перегару) – посилюються процеси деградації нафтопродуктів, покращується водоповітряний режим та підвищується біохімічна активність ґрунтів; – вапнування (кислі ґрунти) - з метою створення оптимальних умов для життєдіяльності бактеріальних мікроорганізмів, здатних асимілювати вуглеводні; – гіпсування спільно зі штучним зволоженням - для

відновлення якості дерново-підзолистих ґрунтів, що внаслідок нафтового забруднення трансформувалися у техногенні солончаки.

Технології переробки нафто шламів. Методи переробки нафто шламів можна поділити на такі групи:

1. Термічні – спалювання у відкритих коморах, печах різних типів, отримання бітумінозних залишків;

2. Фізичні – поховання у спеціальних могильниках, поділ у відцентровому полі, вакуумне фільтрування та фільтрування під тиском;

3. Хімічні – екстрагування за допомогою розчинників, затвердіння (цемент, рідке скло, глина); із застосуванням органічних добавок (епоксидні та полістирольні смоли, поліуретани та ін.);

4. Фізико-хімічні – застосування спеціально підібраних реагентів, що змінюють фізико-хімічні властивості, з подальшою обробкою на спеціальному обладнанні;

5. Біологічні – мікробіологічне розкладання у ґрунті безпосередньо в місцях зберігання, біотермічне розкладання.

Методи поділу нафто шламів з метою утилізації: центрифугування; реагентна обробка; спалювання; екстракція; гравітаційне ущільнення; вакуум фільтрація; фільтр пресування; заморожування та ін.

Основні причини аварії нафтогазового виробництва:

❖ Технічні: – незадовільний стан технічних пристроїв, обладнання, споруджень; – відсутність або несправність засобів протиаварійного захисту, сигналізації; – відсутність або несправність системи автоматизації небезпечних операцій, механізації трудомісних робіт; – недосконалість технології або конструктивні недоліки обладнання та технічних пристроїв.

❖ Організаційні: – порушення технології виробництва робіт; – порушення регламенту обслуговування технічних пристроїв обладнання; – порушення регламенту ремонтних робіт; – неефективність виробничого контролю; – низький рівень знань вимог промислової безпеки; – порушення виробничої дисципліни; – необережні або несанкціоновані дії виконавців робіт.

❖ Зовнішні впливи: – наслідки аварії на інших об'єктах; – припинення подачі енергоресурсів або сировини; – явлення природного походження.

На відміну від звичайного, сланцевий газ зосереджений над підземних пастках, а розподілений у порах породи великий глибини. Існує дві основні технології видобутку сланцевого газу – технологія горизонтального буріння та гідравлічного розриву пласта (ГРП). У процесі гідравлічного розриву пласта в газоносні породи вводиться суміш піску, води та хімічних речовин під дуже високим тиском. Під тиском утворюються тріщини, які дозволяють газу вирватися назовні.

Екологічні загрози та їх наслідки при видобутку сланцевого газу:

1. Використання великої кількості водних ресурсів:

- для видобутку газу методом ГРП в одній свердловині використовують близько 20 мільйонів літрів води;

- залежно від інтенсивності розробки та кількості свердловин через кілька років гостро постає питання про нестачу питної води для населення;

2. Зараження ґрунтових вод хімічними реактивами для ГРП:

- ГРП відбуваються до десяти разів на рік, при цьому хімічна суміш забруднює не лише ґрунтові води, а й великі території земних порід;

- шкода навколишньому середовищу та здоров'ю місцевих жителів;

- загострення хронічних захворювань, зростання кількості онкологічних захворювань.

3. Попадання газових сумішей внаслідок використання методу ГРП у водоносні шари:

- підвищення рівня метану та інших газів у питній воді, що робить її непридатною для пиття.

4. Зараження ґрунту від зливу відпрацьованої води та безлічі інших супутніх технологічних факторів:

- шкода навколишньому середовищу та «омертвіння» ґрунту.

Висновок. Наявність негативних екологічних ефектів навряд чи зможе зупинити розвиток галузі сланцевого газу, принаймні у США, Китаї та кількох інших країнах. В США, швидше за все, підуть шляхом посилення екологічного регулювання галузі, а не її повного закриття. Зрештою, альтернативні джерела газу та нафти, наприклад, глибоководне буріння також мають свої екологічні витрати. Тільки в Європі, з її традиційно більше серйозним ставленням до екології, відповідні моменти можуть бути обмеженням на розвиток галузі.

Список літератури

1. ГОСТ 17.1.3.10-83. Гідросфери. Загальні вимоги до охорони поверхневих та підземних вод від забруднення нафтою та нафтопродуктами при транспортуванні по трубопроводу.
2. ГОСТ 17.1.3.12-86. Охорона природи. Гідросфери. Загальні правила охорони вод від забруднення під час буріння та видобутку нафти та газу на суші.
3. Соловйов В.О., Фик І.М., Варавіна Є.П. Екологічна безпека у нафтогазовій справі: Навчальний посібник. - Х.: НТУ "ХПІ", 2012. 96 с.
4. Соловйов В.О., Фик І.М., Прибилова В.І. Екологічна геологія: Навчальний посібник. Харків, 2012. 160 с.
5. Суярко В.Г., Сердюкова О.О., Сухов В.В. Загальна та нафтогазова геологія: Навчальний посібник. Х.: ХНУ ім. В.М. Каразіна, 2013. 212 с.
6. Тетельмін В.В., Язев В.А. Захист навколишнього середовища у нафтогазовому комплексі: Навчальний посібник. - Довгопрудний: Вид. будинок «Інтелект», 2009. 352 с.
7. А. Белова, Н. Журавская, С. Коваль, А. Кочедыкова, П. Стефанович. Анализ неформальной занятости как основы внедрения стандартов Европейского Союза в Украине, 2023, Часть серии книг Lecture Notes in Civil Engineering (LNCE, том 299), с.643 – 651. DOI 10.1007/978-3-031-17385-1_52.
8. Zhuravska N. Economic development and modern management: Concepts of management of modern innovative environmentally friendly production in the direction of sustainable development / N.Zhuravska, P.Stefanovich, I.Stefanovich, I.Peregineets // Monographic series «European Science». Book 7. Part 2. 2021. ScientificWorld-NetAkhatAV: Karlsruhe, 2021. 111 p. <https://www.sworld.com.ua/monoge4/mge4-2.pdf>.

References:

1. GOST 17.1.3.10-83. Hydrospheres. General requirements for the protection of surface and underground waters from contamination by oil and oil products during transportation by pipeline.
2. GOST 17.1.3.12-86. Conservation. Hydrospheres. General rules for the protection of water from pollution during drilling and extraction of oil and gas on land.
3. Solovyov V.O., Fik I.M., Varavina E.P. Environmental safety in oil and gas business: Study guide. - Kh.: NTU "KhPI", 2012. 96 p.
4. Solovyov V.O., Fik I.M., Pribylova V.I. Ecological geology: Study guide. - Kharkiv, 2012. 160 p.
5. Suyarko V.G., Serdyukova O.O., Sukhov V.V. General and oil and gas geology: Study guide. - Kh.: KHNU named after V.M. Karazina, 2013. 212 p.
6. Tetelmin V.V., Yazev V.A. Environmental protection in the oil and gas complex: Tutorial. - Dugoprudny: Type "Intellect" building, 2009. 352 p.: Illus.
7. Bielova A., Zhuravska N., Koval S., Kochedykova A., Stefanovych P. Analysis of Informal Employment AS a Basis for Implementation of European Union Standards in Ukraine, 2023, Lecture Notes in Civil Engineering, 299, 643 – 651, 2023. DOI 10.1007/978-3-031-17385-1_52
8. Zhuravska N. Economic development and modern management: Concepts of management of modern innovative environmentally friendly production in the direction of sustainable development / N.Zhuravska, P.Stefanovich,

I.Stefanovich, I.Pereginec // Monographic series «European Science». Book 7. Part 2. 2021. ScientificWorld-NetAkhatAV: Karlsruhe, 2021. – 111 p. <https://www.sworld.com.ua/monoge4/mge4-2.pdf>.

Надійшла до редакції 05.05.2023

N. Zhuravska, I. Stefanovych, P. Stefanovych, T. Nehrii

ENVIRONMENTAL SAFETY IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

Purpose. To deepen the knowledge in the field of protection and rational use of natural resources and specification will practically ensure effective training of specialists for the oil and gas industry.

Methodology. The article contains a number of methodological and methodical materials aimed at deeper theoretical training in the field of oil and gas production.

Results. The article examines environmental safety issues related to the oil and gas business, as well as indicates environmental threats and their consequences during shale gas extraction. They include an assessment of the impact on the environment in the process of search, exploration and extraction of oil and gas, their processing and transportation. In a short form, the anthropogenic impact on the geological environment is indicated, the main sources of environmental pollution during the operation of well production collection and transportation systems are shown, and the main causes of negative environmental consequences are also shown.

Scientific novelty. Special attention is paid to various violations during drilling and their consequences, protection of underground water and subsoil, and it is indicated that oil industry wastewater can negatively affect the water supply of the population of the facility. The main causes of accidents at oil and gas production facilities are indicated. The reclamation of the territory and the stages of this reclamation are described separately. The legislative provision of nature protection is considered, international cooperation is briefly indicated, while it is indicated that China, the USA and other countries of the world do not stop the development of the shale gas industry, although there are a number of negative environmental factors.

Keywords: logistics system, risk management system, risk management algorithm, exploration, drilling, extraction, processing, transport, oil sludge, gas pipeline, shale gas.

Відомості про авторів

Журавська Наталія Євгенівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури; e-mail: nzhur@ua.fm

Стефанович Іван Станіславович, старший викладач кафедри технології захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури; e-mail: salevap9@gmail.com

Стефанович Павло Іванович, викладач кафедри технології захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури; e-mail: mr.stalker7@gmail.com

Негрії Тетяна Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури; e-mail: nehrii.to@knuba.edu.ua

Zhuravska Nataliia, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Environmental Protection and Labor Safety Technology, Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine; e-mail: nzhur@ua.fm

Stefanovych Ivan, Senior Lecturer, Department of Occupational Safety and Environment, Kyiv National University of Construction and Architecture; e-mail: salevap9@gmail.com

Stefanovych Pavlo, Lecturer at the Department of Occupational Safety and Environment, Kyiv National University of Construction and Architecture; e-mail: mr.stalker7@gmail.com

Nehrii Tetiana, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Environmental Protection and Labor Safety Technology, Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine; e-mail: nehrii.to@knuba.edu.ua

УДК 621.928.1

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-69-80>**Л. М. Заміховський, Ю. Й. Стрілецький, І. Т. Левицький, М. Я. Николайчук****РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОГО БЛОКУ ПІДСИСТЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ
МЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У СИРОВИНІ НА КОНВЕЄРНІЙ СТРІЧЦІ З
АВТОМАТИЧНИМ ВИЗНАЧЕННЯМ ЇХ КООРДИНАТ**

Мета. Забезпечення надійності і ефективності функціонування технологічного процесу виготовлення керамічних виробів шляхом інтеграції в нього підсистеми ідентифікації металевих включень в сировині з автоматичним визначенням їх координат та габаритів для подальшого їх вилучення.

Методика. Використано методи схемотехніки, основи теорії систем та автоматичного управління, методи електромагнітних кіл і цифрової обробки сигналів а також застосовано комплексний підхід щодо побудови системи управління, математичні методи дослідження операцій.

Результати. В статті проведено критичний аналіз існуючих сучасних рішень щодо ідентифікації металевих включень у сипучій сировині для виготовлення керамічних виробів при їх русі конвеєрною стрічкою. Встановлено, що наявність металевих включень у сировині неминуче призводить до відмов з подальшими аваріями технологічного обладнання. Проведено розробку електронного блоку вимірювання і обробки сигналів приймальної котушки, електронного блоку формування сигналу збудження випромінювальних котушок. На базі запропонованої концепції створена підсистема виявлення металевих включень, яка легко масштабується до ширини конвеєрної стрічки шляхом підбору кількості вимірювальних каналів. Створено алгоритм блоку обробки сигналу приймальних котушок, що дозволяє здійснити послідовність і синхронізацію операцій вимірювання, обробки і формування сигналів та представлення їх результатів.

Наукова новизна. Запропонована структура підсистеми ідентифікації металевих включень, яка реалізована на базі паралельного методу визначення положення металевих включень між котушками.

Практична значимість. Проведено розробку і інтеграцію підсистеми ідентифікації металевих включень в структуру автоматизованої системи керування процесом підготовки сировини, яка включала розробку апаратного і алгоритмічного забезпечення. В результаті випробування підсистеми ідентифікації металевих включень на лабораторній установці у вигляді ділянки конвеєрної лінії вдалось виявити 89,8% металевих включень від їх загальної кількості.

Ключові слова: металеві включення, конвеєрна стрічка, система виявлення, система вилучення, магнітне поле, котушка збудження.

Вступ. Виробники, що здійснюють переробку сировини, зокрема виготовлення керамічних виробів, керамічної плитки, цегли і ін., ставлять високі вимоги до сировини, як по її хімічному так і якісному складу. І хоча технологічний процес підготовки сировини (глини) є механізованим і доволі досконалим, проте під час даного процесу в сировину часто потрапляють різного роду металеві включення, що різняться за типом металу, формою і вагою. Саме наявність металевих включень в сировині становить основну небезпеку для технічного стану технологічного обладнання, а також негативно впливає на якість вихідної продукції.

Джерелами потрапляння металевих включень у сировину є технологічні етапи її підготовки, а також людський фактор. В результаті потрапляння металевих включень у сировину часто призводять до аварійних ситуацій і, як наслідок, до значних фінансових затрат на ліквідацію аварійних станів і простій технологічних ліній а також погіршення якості продукції [1, 2]. Тому актуальною є задача розробки електронного блоку підсистеми ідентифікації металевих включень у сировині, що переміщується конвеєрною стрічкою з автоматичним визначенням їх координат і розмірів та передачі цих даних у підсистему їх вилучення, які є складовою автоматизованої системи управління процесом переробки сировини,

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз показав, що існуючі автоматизовані системи управління процесом підготовки сировини в умовах конвеєрної лінії більшості заводів, що виготовляють керамічні вироби, передбачають розміщення над конвеєрною стрічкою постійного електромагніту різних моделей, зокрема П100М. Такий метод не дає можливості в повній мірі забезпечити чистоту сировини, зокрема передбачити потрапляння металевих включень кольорових металів чи металів малої ваги, які призводять до спрацювання електромагніту. Існуючі електронні блоки ідентифікації металевих включень не володіють можливістю визначити їх розміри і координати положення на конвеєрній стрічці. Так, в роботі [3, 4] для побудови електронного блоку ідентифікації металевих включень використовують інтегральну мікросхему серії LDC. Вона призначена для узгодження роботи схеми разом з приймальною котушкою та здійснює підсилення сигналу від приймальної котушки. Однак цей метод не дозволяє забезпечити достатньої чутливості по всій ширині конвеєрної стрічки. В інших публікаціях [5, 6] для виявлення металевих включень використовується загальновідомий імпульсний метод, однак при використанні в ролі передавальної і приймальної котушок однієї і тієї ж котушки, чутливість електронного блоку є доволі низькою, хоча конструкція блоку є достатньо простою в реалізації. З метою підвищення чутливості електронного блоку ідентифікації металевих включень використовують спеціальні методи формування сигналів котушок збудження [7, 8]. Такий спосіб забезпечує незначне збільшення чутливості і є недостатнім для промислових умов застосування. Доволі перспективним методом є застосування високих частот в діапазоні 1-1.5 ГГц [9, 10] для ідентифікації металевих включень у сировині, проте їх застосування призводить до збільшення вартості системи при реалізації методу та необхідності використання складних методів обробки даних. У публікаціях [11, 12] було досліджено амплітудні та фазові характеристики сигналу, отриманого із приймальної котушки, що частково було використано нами при розробці електронного блоку ідентифікації металевих включень кольорових металів. Так, при потрапленні металевих включень кольорового металу в зону дії приймальної котушки, сигнал із неї характеризується зміною не тільки амплітуди, але і фази сигналу по відношенню до сигналу збудження.

Мета роботи. Метою роботи є розробка на основі теоретико-експериментальних досліджень методу ідентифікації металевих включень в сировині та його реалізація підсистемою ідентифікації на базі автоматичного електронного блоку з функціями виявлення металевих включень, визначення їх габаритів, типу металу і їх координат відносно поперечного перерізу конвеєрної стрічки. А також інтеграція розробленої підсистеми ідентифікації металевих включень в автоматизовану систему управління процесом переробки сировини, що дасть змогу підвищити надійність технологічного обладнання в цілому.

Постановка задачі. Для дослідження методу ідентифікації, що базуються на генеруванні магнітного поля з рухомим максимумом амплітуди напруженості котушок збудження [13, 14], запропоновано функціональну схему підсистеми ідентифікації основу якої складає блок генератора і блок обробки сигналу із приймальної котушки. Розробка електронного блоку підсистеми ідентифікації металевих включень передбачає побудову принципової електричної схеми відповідних блоків та реалізація на їх базі друкованих плат. Окрім цього, розробка передбачає підбір елементної бази, що задовольнятиме функціональним вимогам та необхідним технічним параметрам електронних блоків. Для реалізації поставлених задач передбачено розробку алгоритмічного програмного забезпечення електронного блоку підсистеми ідентифікації металевих включень в умовах конвеєрної лінії.

Результати розробки. Основою для розробки електронного блоку і реалізації запропонованого методу ідентифікації металевих включень служить структурна схема (рисунок 1), що являє собою блок випромінюючих котушок (поз. 2, рис. 1) і блок приймальних котушок (поз. 3, рис. 1) а також блок формування сигналу збудження і обробки сигналів з приймальних котушок (поз. 6). Кількість котушок збудження і приймальних котушок визначається в залежності від ширини конвеєрної стрічки.

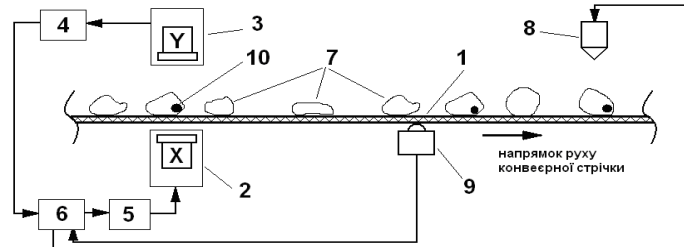


Рисунок 1 – Структурна схема підсистеми ідентифікації металевих включень: 1 – конвеєрна стрічка; 2 – випромінюючий блок; 3 – приймальний блок; 4 – підсилювач сигналу; 5 – підсилювач потужності; 6 – мікропроцесорний пристрій; 7 – сировина; 8 – маркувальний пристрій; 9 – датчик швидкості; 10 – металеві включення

Основою випромінюючого блоку є генератор цифрових сигналів, який відповідає за формування кількох сигналів збудження на різних частотах з метою розділення траєкторій ідентифікації. Реалізовано цей блок за допомогою ARM мікроконтролера типу STM32F100 [15]. Генератор цифрових сигналів містить таблицю значень вихідного сигналу збудження, що полегшує алгоритм його формування і звільняє додаткові обчислювальні потужності для інших операцій. Цей мікроконтролер містить в своєму складі достатній об'єм пам'яті і вбудований двохканальний ЦАП. Це дало можливість, використовуючи блок прямого доступу до пам'яті, реалізувати простий алгоритм формування квадратурних сигналів гармонійної форми. Принципова схема блоку генератора цифрових сигналів наведена на рисунку 2.

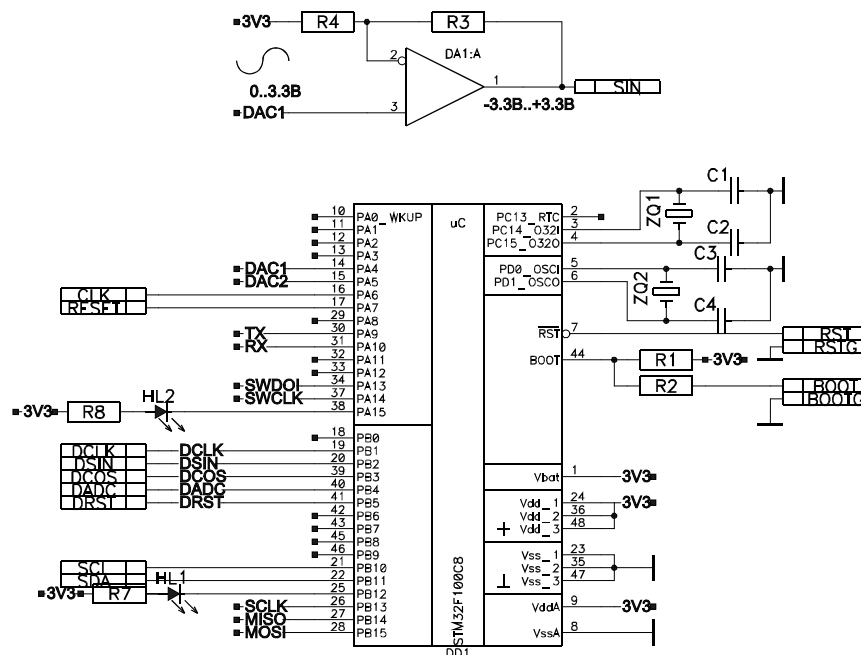


Рисунок 2 – Принципова схема генератора цифрових сигналів випромінюючого блоку

Зміщення сигналів до двохполярного виду здійснюється за допомогою суматора на основі операційного підсилювача LM358 (DA1.A). Сигнал з виходу внутрішнього ЦАП *DAC1* поступає на суматор DA1, який зміщує рівень однополярного сигналу з виходу ЦАП до двохполярного сигналу, що подається на вхід *SIN*. Зовнішні сигнали синхронізації поступають на входи *CLK* і *RESET*. Дискретні квадрантурні сигнали *DSIN* *DCOS* подаються в блок вимірювання. Сигнали подаються у послідовному форматі і тактуються сигналом *DCLK*. Використовуючи синхросигнал *CLK* шляхом ділення його в 4 рази, формується сигнал синхронізації роботи АЦП *DADC*.

Основою приймального блоку є схема обробки сигналу приймальної котушки, яка базується також на ARM мікроконтролері типу STM32F100. Частота сигналу збудження для котушок збудження обирається кратною 100Гц, починаючи із частоти 1кГц. Тобто для кожної з котушок частота буде становити 1000Гц, 1100Гц, 1200Гц. і т.д. в залежності від кількості котушок збудження. При цьому частота синхроімпульсів 40кГц, а частота кадрових імпульсів 10Гц. Відповідно на один кадр припадає 4тис точок. Генерований сигнал має містити цілу кількість періодів і кадр має тривати 0.1с. Цим вимогам відповідають всі сигнали кратні 10 Гц. Принципова схема блоку обробки сигналу приймальної котушки представлена на рисунку 3.

Максимальна частота сигналу приймальної котушки не повинна перевищувати половину частоти дискретизації АЦП, а це частота 5кГц згідно теореми відліків Нейквіста. Окрему умову на максимальну частоту дискретизації накладає передавальна характеристика вибраного АЦП ADS1256. Згідно передавальної характеристики цього АЦП, наведеної в документації [16] для частоти дискретизації 30кГц видно, що при зростанні частоти вхідного сигналу зменшується передавальна характеристика і на частоті дискретизації логарифмічний коефіцієнт передачі АЦП становить $-\infty$. Відповідно приблизне значення максимальної частоти, здатної бути опрацьованою АЦП ADS1256 при частоті дискретизації 10кГц становить 4кГц.

Блок вимірювання сигналу приймальної котушки містить попередній підсилювач сигналу котушки, протипідмінний фільтр, АЦП і мікроконтролер для виконання математичних операцій із дискретизованим сигналом.

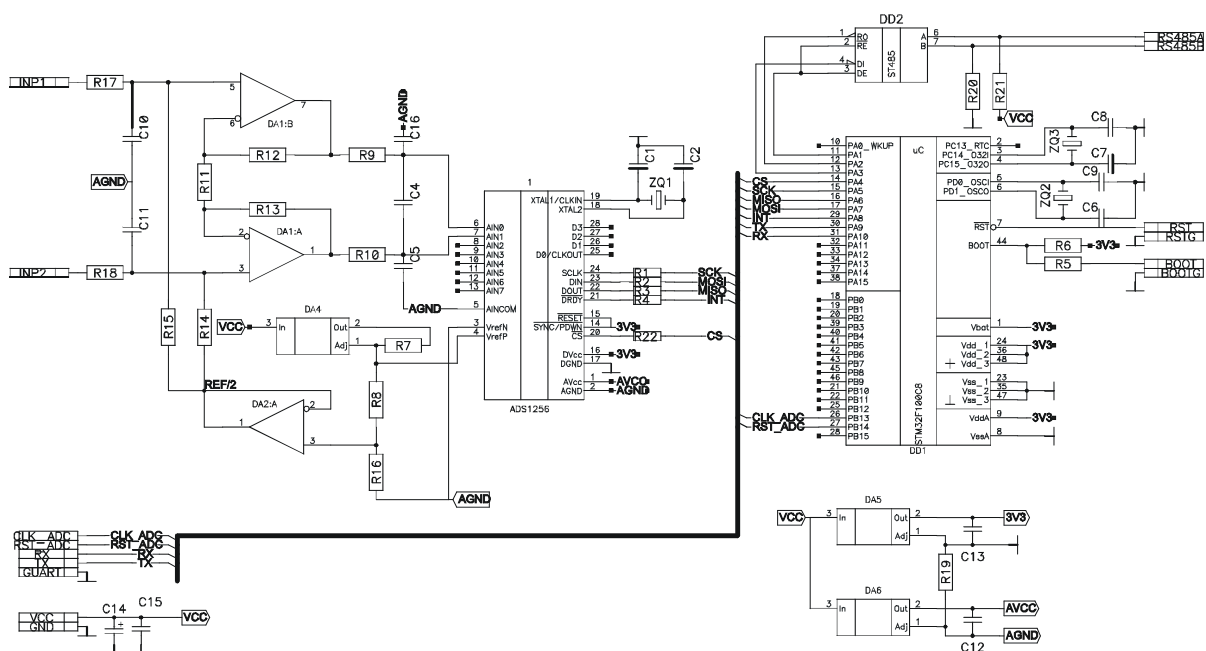


Рисунок 3 – Принципова схема блоку обробки сигналу приймальної котушки

Вхідний попередній підсилювач здійснює буферизацію вхідних сигналів із приймальної котушки і підсилення в 200 разів. Сигнал в диференційному виді поступає на вхід диференційного підсилювача, побудованого на операційних підсилювачах DA1, рис.3. Вихідний диференційний сигнал поступає на вхід протипідмінного RC фільтра на базі резисторів R9, R10 і конденсаторів C4, C5, C10. Відфільтрований диференційний сигнал далі поступає на диференційний вхід АЦП типу AD1256. Вхідний діапазон напруг цього АЦП визначається опорною напругою, яка подається на входи V_{refN} , V_{refP} . Ця напруга формується, як спад напруги на прецизійних резисторах R8, R16. Струм через ці резистори стабілізується джерелом струму на стабілізаторі DA4 типу TL431. Резистори R8, R16 одного номіналу і тому на вході операційного підсилювача DA2 буде половина опорної напруги $U_{REF}/2$. На виході буферного DA2 буде посилена копія цього сигналу. Ця напруга подається на вхід диференційного підсилювача через резистори R14, R15. За допомогою цієї частини схеми, рис.3, напруга на виході диференційного підсилювача зміщується на напругу $U_{REF}/2$. В результаті, двохполярний сигнал із виходу приймальної котушки підсилюється в діапазоні однієї полярності від V_{ref} до 0.

Сигнали цифрового обміну подаються із мікроконтролера до АЦП через ланки із послідовно включеними резисторами для зменшення впливу широкосмугових цифрових сигналів на роботу АЦП. Синхронно із роботою блоку генератора цифрових сигналів в блок обробки виміряного сигналу приходять синхросигнали clk_ADC , які тактують запуск перетворення АЦП.

Робота системи вимірювальних котушок є синхронною. Синхронізується як дискретизація миттєвих значень так і початок кадру. Визначення параметрів синхронізуючих імпульсів проводилося виходячи з результатів аналізу геометричних розмірів вимірювальної системи (рисунок 4). Було прийнято, що відстань від котушок до площини в якій рухається металеве тіло становить $h=0.2\text{м}$. Зона чутливості системи ідентифікації починається на відстані h від осі котушок. При швидкості руху стрічки із досліджуваною сировиною 0.5м/с , відстань від початку зони чутливості до максимального значення, коли металеве включення буде на осі котушки, буде пройдена за $t=h/v=0.4\text{с}$. Тобто, від положення, коли металеве включення неможливо виявити до положення, коли він може бути ідентифікований із максимальною амплітудою, проходить 0.4с .

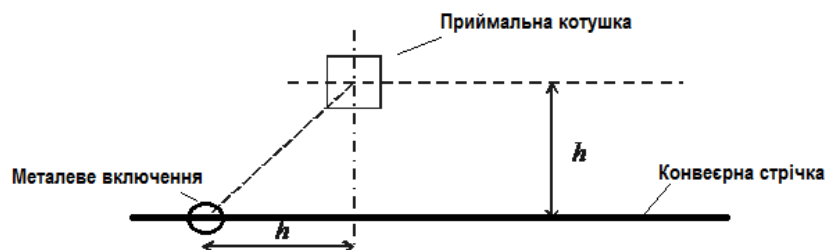


Рисунок 4 – Оцінка геометричних параметрів системи вимірювання

Для оцінки швидкості наростання сигналу необхідно декілька вимірювань. Тому було прийнято, що система буде отримувати кожне нове вимірне значення за 0.1с .

При русі металевого включення в змінному електромагнітному полі, за рахунок виникнення вторинних полів, виникає частотна модуляція сигналу збудження, тому прийнятий сигнал має не тільки ті частотні складові, які формує котушка збудження, а й частотні складові в околі частоти збудження. При використанні для пошуку амплітудних оцінок сигналу алгоритму дискретного перетворення Фур'є кожне дискретне значення

спектральної складової є інтегральною оцінкою всіх спектральних складових в околі вибраного дискретного значення. Інтегруюча функція на частоті 100Гц зображена на рисунку 5.

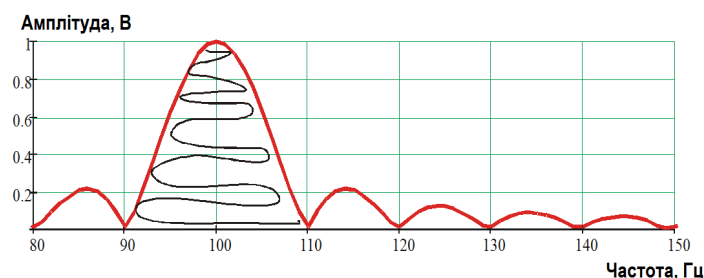


Рисунок 5 – Графік функції інтегрування дискретної спектральної складової на частоті 100Гц

Із наведеного графіку видно, що дискретну складову амплітуди значенням 100Гц буде впливати множина складових окрім тих, що знаходяться на дискретних значеннях кратних 10. В тому числі буде інтегровано спектральні складові від значення 90Гц до 110Гц. Тобто, вибрана дискретна складова 100Гц буде мати складові в околі від 90Гц до 110Гц.

В цілому, процес опрацювання і передачі даних з вузлів блоку обробки сигналів від приймальних котушок системи ідентифікації синхронізується. Діаграма основних сигналів зображено на рисунку 6. По основному синхросигналу *clk* формується допоміжний сигнал *clk_ADC*, який має частоту в 4 рази меншу. Частота синхроімпульсів 40кГц, таким чином частота *clk_ADC* становить 10 кГц. Синхроімпульси кадрів *RESET* формуються кожні 0.1с синхронно із *clk*. За час між імпульсами *RESET* проходить 4000 імпульсів *clk* і 1000 імпульсів *clk_ADC*.

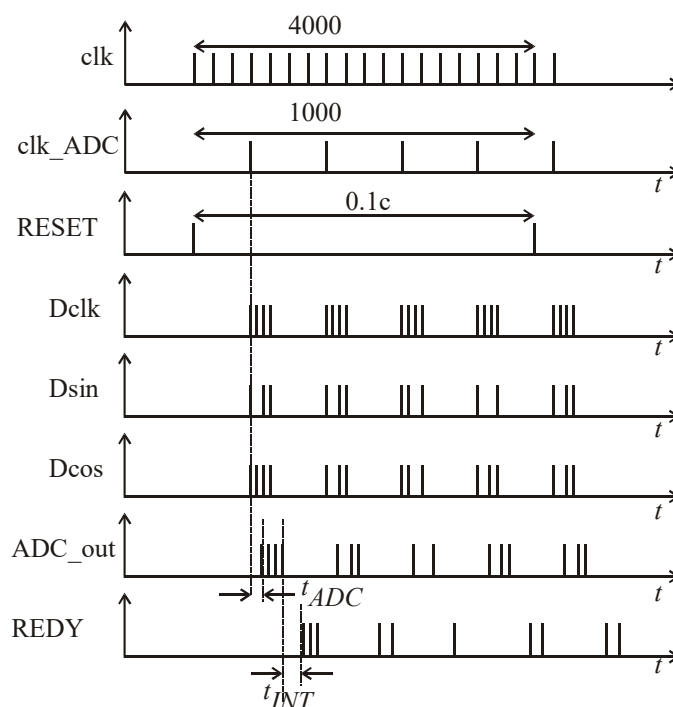


Рисунок 6 – Діаграма синхронізації роботи блоку обробки сигналів

Разом із імпульсом clk_ADC генератор відсилає в послідовному форматі 16-ти бітне поточне значення таблиці для квадратурних складових по лініях $Dsin, Dcos$. Тактуються послідовні сигнали по лінії $Dclk$. Приймальний блок, отримавши сигнал clk_ADC запускає перетворення АЦП, яке триває певний час t_{ADC} . Після закінчення перетворення результат його зчитується по лінії ADC_out . На цей момент блок обробки сигналів вже отримав поточні квадратурні складові опорного сигналу $DSIN, DCOS$ і, для поточного дискретизованого значення і вхідного сигналу з АЦП C_{ADC} , шукаються два добутки впродовж часу t_{int} :

$$DS_i = C_{ADC} \cdot DSIN$$

$$DC_i = C_{ADC} \cdot DCOS$$

Результат записується в масив із ковзним початком, замінюючи цим найбільш старе значення, записане в масив 1000 циклів перед цим. В подальшому, синхронно із сигналом $RESET$, шукається сума елементів масиву DS, DC :

$$Re = \sum_{i=0}^{999} DS_i,$$

$$Im = \sum_{i=0}^{999} DC_i. \quad (1)$$

Значення коефіцієнтів доступне для зчитування по лінії $READY$. Таким чином, об'єднані блоки генератора приймача за час 0.1с визначають комплексну оцінку сигналу на частоті, яка задана блоком генератора.

Блок, що формує сигнали синхронізації, зчитує значення $Re(f_j)$ і $Im(f_j)$ для кожної із частот f_j . При цьому f_j - це значення частоти сигналу збудження для обраної в даний момент пари вимірювальних котушок. Структурна схема блоку визначення координат металевих включень зображена на рисунку 7.

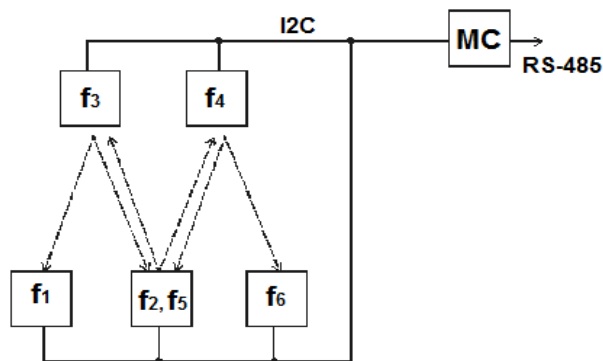


Рисунок 7 – Структурна схема блоку визначення координати металевих включень

Значення комплексних оцінок для кожної із частот збудження системи вимірювальних котушок одержують блоками f_i і зчитуються головним контролером МС підсистеми ідентифікації.

З отриманого набору комплексних оцінок визначаються параметри векторів кожної із частот R_j, ϕ_j :

$$R_j = \sqrt{\text{Re}(f_j)^2 + \text{Im}(f_j)^2},$$

$$\phi_j = \arctan\left(\frac{\text{Im}(f_j)}{\text{Re}(f_j)}\right). \quad (2)$$

Ці значення довжини і кута вектора кожної із досліджуваної частоти збудження усереднюються для знаходження початкового рівня сигналу. Усереднення проходить із використанням авторегресійного фільтра виду:

$$y_i = \rho \cdot x_i + (1 - \rho) \cdot y_{i-1}, \quad (3)$$

де ρ – згладжуюча константа.

Значення константи визначається формулою

$$\rho = e^{\frac{-1}{fd \cdot \tau}},$$

де fd – частота поновлення вхідних даних x_i ,

τ - час усереднення.

В розробленій підсистемі частота поновлення вхідних даних становить 10Гц. Тривалість ковзного усереднення становить 10с. Аналогічно згладжуються поточні значення $R0.4_{j,i}$, $\phi0.4_{j,i}$ (5) для усунення випадкових завад із часом усереднення $\tau = 0.4$ с. За комплексними оцінками усереднених параметрів векторів шукається узагальнений оціночний коефіцієнт згідно формули

$$Ua_{j,i} = (R0.4_{j,i} - R10_{j,i}) + q \cdot |\phi0.4_{j,i} - \phi10_{j,i}|, \quad (5)$$

де q – узгоджуючий коефіцієнт впливу фази.

В даному випадку, амплітуда і фаза сигналу додаються для отримання коефіцієнта, який враховує провідні і магнітні властивості металевого тіла.

При вимірюванні зміни по різних частотах збудження вибирається та, зміна в якій найбільша. Вибравши таку частоту збудження шукається максимальне значення такої зміни. Як тільки наростання значення $Ua_{j,i}$ припиняється чи зменшується, проводиться подальше опрацювання.

Маючи приведені по амплітуді значення $Ua_{j,i}$ для поточного виміру i та для обраної частоти збудження j шукається коефіцієнт відношення по відповідних частотах збудженнях

$$G_{12,i} = \frac{Ua_{2,i}}{Ua_{1,i}} \quad (6)$$

За цим коефіцієнтом визначається положення металевого включення відносно даних пар вимірювальних котушок.

На рисунку 8 зображено один з розроблених електронних блоків системи ідентифікації металевих включень та імітаційний стенд для його наладки.



Рисунок 8 – Фото електронного пристрою для генерування сигналів випромінюючого блоку та імітаційного стенду для його наладки

Обговорення результатів. При побудові підсистеми ідентифікації металевих включень було розроблено наступні функціональні блоки: блок вимірювання і обробки сигналів приймальної котушки, блок формування сигналу збудження випромінювальних котушок. Розробка передбачала створення концепції, яка дозволяє легко масштабувати систему виявлення металевих включень, відповідно до ширини конвеєрної стручки шляхом підбору кількості вимірювальних каналів з метою узагальнення підходу до побудови систем ідентифікації металевих включень в керамічній сировині на профільних виробництвах. Відповідно структура підсистеми є модульною. Основними функціями розроблених блоків є формування сигналів збудження електромагнітного поля і вимірювання комплексного сигналу, що формується на приймальній котушці. Як результат, в залежності від положення котушки в лінійці котушок збудження, вона може приймати участь у опрацюванні одночасно до чотирьох незалежних синусоїдальних сигналів збудження. Одна приймальна котушка формує до двох вихідних сигналів у вихідному сумарному сигналі та приймає до двох вхідних. Такий підхід до опрацювання сигналів дозволяє досліджувати магнітні властивості середовища, шукаючи координату металевих включень між однією передавальною і двома приймальними котушками одночасно по двох напрямках.

Вимірювання комплексних оцінок векторів, а саме довжини і кута вектора на кожній із досліджуваних частот збудження електромагнітного поля, дозволяє виявляти положення в просторі металевих включень не тільки для чорних, але і кольорових металів, а використання лінійки котушок дозволяє будувати систему відповідно до умов виробництва для оптимізації процесу їх вилучення [17].

Висновки. В результаті проведеної роботи:

- розроблено складові підсистеми ідентифікації металевих включень, а саме блок генератора цифрових сигналів та блок обробки сигналів приймальних котушок;
- проведено підбір елементів підсистеми ідентифікації, на основі яких розроблені принципові електричні схеми та наведено опис їх роботи;
- створено алгоритм блоку обробки сигналу приймальних котушок, що дозволяє здійснити послідовність і синхронізацію операцій вимірювання, обробки і формування сигналів та представлення їх результатів і, тим самим, реалізувати підсистему ідентифікації металевих включень в сировині, що рухається стрічковим конвеєром;
- проведені випробування підсистеми ідентифікації металевих включень на лабораторній установці у вигляді ділянки конвеєрної лінії дозволили виявити 89,8% металевих включень від їх загальної кількості, а проведена апробація підсистеми ідентифікації металевих включень на СВП «Завод ПРОКЕРАМ» ТОВ «Голд Кераміка» підтвердила її ефективність.

Список літератури

1. Priazhnikova K., Kochura E. (2017) Modeliuvannia vplyvu dynamiky rudopostachannia na enerhospozhyvannia hirnycho-zbahachuvalnoho kombinatu z pozytsii keruvannia [Modeling of influence of ore supply dynamics on energy consumption in mining and processing enterprise in terms of control]. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol. 85, no 1, P. 80-88.
2. Belodedenko S., Grechany A., Ibragimov M. (2017) Risk indicators and diagnostic models for sudden failures. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol. 88, no 4, pp. 111-118.
3. Huang J. (2021) Development of a New Metal Detector Based on LDC1314. Advances in Intelligent Systems and Computing. Xijing University, Xi'an, Shaanxi, 710123, China. Volume 1385 AIST, Pages 71 – 76.
4. Wang, L., Ma, L., Zhong, H., Lei, Z., Han, T. Design and development of mobile metal object detection and positioning instrument (2015) Exp. Technol. Manag., 32 (5), P. 107-110.
5. Citak H. (2020) Pulse Induction Metal Detector: A Performance Application. IEEE Transactions on Plasma Science. Balikesir Vocational High School, Balikesir University, Balikesir, 10145, Turkey. Volume 48, Issue 6, Pages 2210 - 2223.

6. Ege, Y., Coramik, M. A new measurement system using magnetic flux leakage method in pipeline inspection (2018) *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 123, P. 163-174. Cited 32 times. doi: 10.1016/j.measurement.2018.03.064
7. Svatoš, J., Vedral, J., Pospisil, T. Advanced Instrumentation for Polyharmonic Metal Detectors (2016) *IEEE Transactions on Magnetics*, 52 (5), art. no. 7352331. Cited 6 times. doi: 10.1109/TMAG.2015.2507780
8. Hu W. A new kind of metal detector based on chaotic oscillator (2017) *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 100, Issue 120 December 2017 Article number 0121861st International Global on Renewable
9. Siddiqui O. (2021) Metal Detector Based on Lorentz Dispersion. *IEEE Sensors Journal*. College of Engineering, Taibah University, Madinah, 342, Saudi Arabia. Volume 21, Issue 3, P. 3784 – 3790.
10. Siddiqui, O.F., Ramzan, R., Amin, M., Omar, M., Bastaki, N. Lorentz Reflect-Phase Detector for Moisture and Dielectric Sensing (2018) *IEEE Sensors Journal*, 18 (22), art. no. 8458134, pp. 9236-9242. Cited 10 times. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=7361> doi: 10.1109/JSEN.2018.2869401
11. Bai S., Bai Y. High Precision Algorithm of Metal Detector Based on Balance Coil (2018) *ICEMS 2018 - 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems*, Pages 684 - 68727 November 2018 Article number 854920321st International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2018, Jeju, 7 October 2018 - 10 October 2018, 143160
12. Bedenik G.a, Silveira J.a, Santos I.a, Carvalho E.a, Carvalho J.G.a, Freire R.b . Single coil metal detector and classifier based on phase measurement (2019) *INSCIT 2019 - 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers*, August 2019 Article number 88683294th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers, INSCIT 2019, Sao Paulo, 26 August 2019 - 30 August 2019, 152900
13. Leonid M. Zamihovskiy, Ivan T. Levytskyi, Konrad Gromaszekb, Saule Smailovac, Ardak Akhmetovad, Azhar Sagymbekovab. Development of control system of metallic inclusions in granular materials based on the method of scanning signal. // *SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016*, 100310H (28 September 2016); doi: 10.1117/12.2249200.
14. Zamikhovskiy L., Levitskyi I., Nykolaychuk M., Striletskyi Yu. (2021) Mathematical fundamentals of the method of identification of metal inclusions in raw materials with automatic determination of their coordinates. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, vol 103, no 3, P. 23–32.
15. STM32F100 Value Line. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f100-value-line.html>.
16. ADS1256. DataSheet. Very Low Noise, 24-Bit Analog-to-Digital Converter. URL: https://www.ti.com/lit/ds/sbas288k/sbas288k.pdf?ts=1633827236916&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
17. Leonid Zamikhovskiy, Ivan Levitsky, Mykola Nykolaychuk – Designing a system that removes metallic inclusions from bulk raw materials on the belt conveyor. - *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. ISSN 1729-3774, 2021.- № 3/2(111). P. 79 -87.

References

1. Priazhnikova K., Kochura E. (2017) Modeliuvannya vplyvu dynamiky rudopostachannia na enerhospozhyvannia hirnycho-zbahachuvalnoho kombinatu z pozytsii keruvannia [Modeling of influence of ore supply dynamics on energy consumption in mining and processing enterprise in terms of control]. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, vol. 85, no 1, 80-88.
2. Belodedenko S., Grechany A., Ibragimov M. (2017) Risk indicators and diagnostic models for sudden failures. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, vol. 88, no 4, 111-118.
3. Huang J. (2021) Development of a New Metal Detector Based on LDC1314. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Xijing University, Xi'an, Shaanxi, 710123, China. Volume 1385 AIST, Pages 71 – 76.
4. Wang, L., Ma, L., Zhong, H., Lei, Z., Han, T. Design and development of mobile metal object detection and positioning instrument (2015) *Exp. Technol. Manag.*, 32 (5), 107-110.
5. Citak H. (2020) Pulse Induction Metal Detector: A Performance Application. *IEEE Transactions on Plasma Science*. Balikesir Vocational High School, Balikesir University, Balikesir, 10145, Turkey. Volume 48, Issue 6, Pages 2210 - 2223.
6. Ege, Y., Coramik, M. A new measurement system using magnetic flux leakage method in pipeline inspection (2018) *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 123, 163-174. Cited 32 times. doi: 10.1016/j.measurement.2018.03.064

7. Svatoš, J., Vedral, J., Pospisil, T. Advanced Instrumentation for Polyharmonic Metal Detectors (2016) IEEE Transactions on Magnetics, 52 (5), art. no. 7352331. Cited 6 times. doi: 10.1109/TMAG.2015.2507780
8. Hu W. A new kind of metal detector based on chaotic oscillator (2017) IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 100, Issue 120 December 2017 Article number 0121861st International Global on Renewable
9. Siddiqui O. (2021) Metal Detector Based on Lorentz Dispersion. IEEE Sensors Journal. College of Engineering, Taibah University, Madinah, 342, Saudi Arabia. Volume 21, Issue 3, 3784 – 3790.
10. Siddiqui, O.F., Ramzan, R., Amin, M., Omar, M., Bastaki, N. Lorentz Reflect-Phase Detector for Moisture and Dielectric Sensing (2018) IEEE Sensors Journal, 18 (22), art. no. 8458134, 9236-9242. Cited 10 times. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=7361> doi: 10.1109/JSEN.2018.2869401
11. Bai S., Bai Y. High Precision Algorithm of Metal Detector Based on Balance Coil (2018) ICEMS 2018 - 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems, Pages 684 - 68727 November 2018 Article number 854920321st International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2018, Jeju, 7 October 2018 - 10 October 2018, 143160
12. Bedenik G.a, Silveira J.a, Santos I.a, Carvalho E.a, Carvalho J.G.a, Freire R.b . Single coil metal detector and classifier based on phase measurement (2019) INSCIT 2019 - 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers, August 2019 Article number 88683294th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers, INSCIT 2019, Sao Paulo, 26 August 2019 - 30 August 2019, 152900
13. Leonid M. Zamihovskiy, Ivan T. Levytskyi, Konrad Gromaszekb, Saule Smailovac, Ardak Akhmetovad, Azhar Sagymbekovab. Development of control system of metallic inclusions in granular materials based on the method of scanning signal. //SPIE 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016, 100310H (28 September 2016); doi: 10.1117/12.2249200.
14. Zamikhovskiy L., Levitskyi I., Nykolaychuk M., Striletskyi Yu. (2021) Mathematical fundamentals of the method of identification of metal inclusions in raw materials with automatic determination of their coordinates. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol 103, no 3, 23–32.
15. STM32F100 Value Line. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f100-value-line.html>.
16. ADS1256. DataSheet. Very Low Noise, 24-Bit Analog-to-Digital Converter. URL: https://www.ti.com/lit/ds/sbas288k/sbas288k.pdf?ts=1633827236916&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
17. Leonid Zamikhovskiy, Ivan Levitsky, Mykola Nykolaychuk – Designing a system that removes metallic inclusions from bulk raw materials on the belt conveyor. - Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. ISSN 1729-3774, 2021.- № 3/2(111). 79 -87.

Надійшла до редакції 10.05.2023

L. Zamikhovskiy, Yu. Striletskyi, M. Nykolaichuk, I. Levytskyi

DEVELOPMENT THE ELECTRONIC UNIT FOR METAL INCLUSIONS IDENTIFICATION SUBSYSTEM IN RAW MATERIALS ON CONVEYOR BELT WITH AUTOMATIC DETERMINATION OF THEIR COORDINATES

Purpose. Ensuring reliability and efficiency manufacturing ceramic products technological process by integrating into it the subsystem for identifying metal inclusions in raw materials with automatic determination of their coordinates and dimensions for their further extraction.

Methodology. Methods of circuit engineering, basics of system theory and automatic control, methods of electromagnetic circuits and digital signal processing are used, a comprehensive approach to the construction of a control system, mathematical methods of operations research are used as well.

Results. The article provides a critical analysis of existing modern solutions for metal inclusions identification in loose raw materials for ceramic products manufacture during their movement on a conveyor belt. It was established that the presence of metal inclusions in raw materials inevitably leads to failures with subsequent breakdowns of technological equipment. The electronic unit for measuring and processing the signals from the receiving coils has been developed. The electronic unit for generating the excitation signal in the radiating coils has been carried out. Based on the proposed concept, the subsystem for detecting metal inclusions has been created, which is easily scaled to the width of the conveyor belt by selecting the number of measuring channels. The algorithm of signal processing for the receiving coils unit has been worked out, which allows implementing the synchronous signals forming, measurement, processing, and presentation of results.

Scientific novelty. The identification subsystem structure of metal inclusions has been proposed, which is implemented on the parallax method of determining the position of the metal inclusion between the coils.

Practical significance. The development and integration of the identification subsystem of metal inclusions into the structure of the automated control system of the raw material preparation process has been carried out, which includes the development of hardware and algorithmic support. As result of testing the identification subsystem of metal inclusions on a laboratory installation of conveyor line, it is possible to detect 89.8% ones of metal inclusions.

Keywords: metal inclusions, conveyor belt, detection system, extraction system, magnetic field, excitation coil.

Відомості про авторів

Заміховський Леонід Михайлович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційно телекомунікаційних технологій та систем, Національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна, leo_zam@ukr.net.

Стрілецький Юрій Йосипович, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна, momental@ukr.net.

Левицький Іван Теодорович, кандидат технічних наук, Національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна, letis@ukr.net.

Николайчук Микола Ярославович, кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна, nmj_2010@ukr.net.

Zamikhovskiy Leonid, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department Of Information And Telecommunication Technologies and Systems, National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, leo_zam@ukr.net.

Striletskyi Yurii, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, momental@ukr.net.

Levytskyi Ivan, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, letis@ukr.net.

Nykolaichuk Mykola Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine, nmj_2010@ukr.net.

УДК 622.834:622.274

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-81-90>

Каюн О.П.

ВДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБІВ ЗБЕРЕЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБОК З УРАХУВАННЯМ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОХОРОННИХ СПОРУД

Мета: Оцінити деформаційні властивості охоронних споруд підготовчих виробок для збереження їх стійкості на виїмкових ділянках вугільних шахт з крутим заляганням вугільних пластів.

Методи. Для досягнення поставленої мети були виконані лабораторні та натурні дослідження деформаційних властивостей охоронних споруд.

Результати. Встановлено, що в умовах одновісного стиснення при дії статистичної зовнішньої сили, яка проявляється в умовах одновісного стиснення та відносної деформації дерев'яних кострів у межах $0,1 < \lambda < 0,2$, відбувається зменшення їх жорсткості, а потім її зростання при $0,4 < \lambda < 0,7$, чим створюються умови для забезпечення несучої здатності охоронних споруд. В натурних умовах, при способі охорони відкатних штреків дерев'яними кострами зі шпал, після їх деформування понад 40% в зоні впливу очисних робіт ($0 < l < 100$ м) в процесі ущільнення відбувається поетапне зменшення приросту зміщень бічних порід на контурі, за рахунок чого забезпечується експлуатаційний стан підготовчих виробок по довжині виїмкової ділянки. Для вивчення деформаційних характеристик охоронних споруд використовували функцію приросту зміщень бічних порід на контурі виробок на ділянці $0 < l < 100$ м позаду очисного забою.

Наукова новизна. Встановлені закономірності деформування охоронних споруд підготовчих гірничих виробок в умовах одновісного стиснення з урахуванням зміни їх жорсткості.

Практичне значення. При відпрацюванні крутих вугільних пластів, використовуючи особливості геомеханічних явищ, які проявляються у вуглепородному масиві, доцільно використання піддатливих охоронних споруд підготовчих гірничих виробок.

Ключові слова: стійкість, піддатливі охоронні споруди, вуглепородний масив, одновісне стиснення, деформація, виїмкова ділянка.

Вступ. Проблема забезпечення стійкості підготовчих гірничих виробок на виїмкових ділянках глибоких вугільних шахт є однією з основних для підвищення техніко-економічних показників роботи підприємства. Підготовчі виробки забезпечують підготовку частин шахтного поля та відпрацювання крутих вугільних пластів на виїмкових ділянках. Для нормальної роботи виїмкових ділянок необхідно, щоб площа поперечного перерізу ділянок підготовчих виробок, які прилегають до очисного вибою, відповідав вимогам Правил безпеки (ПБ).

Досвід роботи шахт, які розробляють пласти крутого падіння на глибоких горизонтах показує, що застосовувані способи охорони виробок не завжди здатні протистояти переміщенням розшарованих порід вуглепородного масиву, що призводить до втрати стійкості відкатних штреків. Незадовільний стан відкатних штреків погіршує умови провітрювання, ускладнює роботу підземного транспорту на виїмкових ділянках та погіршує безпеку гірничих робіт.

Дослідження стійкості відкатних штреків при різних способах охорони відкатних штреків є одним з головних напрямів підвищення ефективності відпрацювання крутих вугільних пластів. Це підтверджує актуальність цих досліджень які спрямовані на забезпечення стійкості підготовчих виробок у глибоких вугільних шахтах. Від правильного вирішення цієї проблеми залежить безпека робіт, своєчасне відпрацювання запасів на виїмкових ділянках та техніко-економічні показники роботи вугільного підприємства.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В даний час на більшості вугільних шахт, що розробляють вугільні пласти крутого падіння, для управління гірським тиском в очисному вибою використовують спосіб утримання покрівлі на кострах або її повне обвалення. У роботах [1,2] зазначається, що при утриманні покрівлі на кострах забезпечується стійкість бічних порід та експлуатаційний стан дільничних підготовчих виробок. У той самий час, при застосуванні цього способу не завжди гарантується стійка та безпечна робота очисних вибоїв. Пов'язано це, перш за все, з утворенням необрушених площ покрівлі позаду очисного вибою. Негативні наслідки такої геомеханічної обстановки можуть проявлятися при підтриманні відкатних штреків позаду очисного вибою на виїмкових дільницях, коли несподівані обвалення товщі провокують завали виробок.

Охорона дільничних підготовчих виробок дерев'яними кострами широко застосовується на шахтах Донбасу, але цей спосіб охорони, попри свою простоту, не позбавлений недоліків. Зокрема, костри мають низьку тримкість [2,3]. При розробці крутих вугільних пластів із застосуванням безціликових схем для охорони відкатних штреків також використовують дерев'яні костри з бруса [4].

Надштрекові охоронні спорудження, які призначені для підтримки бічних порід позаду очисного вибою на виїмковій дільниці, являють собою специфічні об'єкти, які виконують функції вантажонесучих опор [4,5,6]. Деформаційні характеристики таких об'єктів залежать від великого числа факторів. Тому для того, щоб оцінити умови підтримання відкатних штреків при різних способах охорони, необхідно спільно розглядати питання стійкості підготовчих виробок, що примикають до очисних вибоїв і працездатності охоронних споруд, які повинні забезпечувати цілісність бічних порід у виробленому просторі вуглепородного масиву. В цілому для забезпечення стійкості відкатних штреків, при виборі способу їх охорони необхідно, зіставити жорсткість підтримувальних конструкцій з механічними властивостями бічних порід, що дозволить обмежити зміщення на контурі, а отже, звести до мінімуму небезпечні прояви гірського тиску навколо виробок.

Постанова завдань дослідження. Поставлена ціль визначила наступні завдання дослідження:

– оцінити деформаційні характеристики дерев'яних кострів на експериментальних моделях;

– оцінити умови підтримання відкатних штреків крутих пластів по довжині виїмкової дільниці в натуральних умовах у глибокій шахті.

Виклад основного матеріалу. Для визначення деформаційних характеристик охоронних споруд використовували експериментальні зразки з дерева. Зразки охоронних споруд з дерева буди представлені у вигляді кострів з різними поєднаннями елементів конструкції. Модельована товщина вугільного пласта $m=1,0$ м відповідала висоті h (м) охоронної споруди. Масштаб моделювання 1:25. Розміри експериментальних зразків: висота $h=0,04$ м, ширина $b=0,04$ м, площа поперечного перетину $S=0,0016$ м². Деформаційні характеристики матеріалів визначалися при одновісному стисненні зразків.

Для імітації покрівлі і підшви вугільного пласта використовували породні балки довжиною $l=0,1$ м, товщиною $h=0,02$ м і шириною $b=0,04$ м. щільність балок відповідала $\rho=2300$ кг/м³, модуль пружності $E=11200$ МПа, межа міцності на стиск $\sigma_{сж}=48$ МПа. Для спрощення балка, що моделює шар підшви, була ідентичною балці, що моделює шар покрівлі.

При проведенні експериментів використовували гідравлічний прес ГП-50. Експериментальні зразки з дерева розміщували між породними балками і паралельними плитами преса. При дії вертикальної стискаючої сили F (кН), в результаті статичного

стиснення встановлювали величину зміни висоти експериментальних зразків Δh (м) та відносну деформацію $\lambda = \Delta h / h$ (h – початкова висота зразка, м). При стисненні моделей у вигляді дерев'яних кострів зі шпал і накатних кострів зі шпал, навантаження прикладалося поперек волокон.

Жорсткість експериментальних зразків визначали із співвідношення, що впливає із закону Гука [7]:

$$C = \frac{F}{\Delta h}. \quad (1)$$

Навантаження, що передається на зразок σ (МПа) визначали як

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (2)$$

де S – площа зразка, м^2 .

При деформуванні зразків відбувається зміна їх розмірів, тобто, зміна форми та об'єму. Виходячи з цього, повну питому потенціальну енергію охоронних споруд можна розділити на питому потенціальну енергію, яка накопичується за рахунок зміни об'єму $U_{\text{н.о.}}$ (Дж/м²) і за рахунок зміни форми $U_{\text{н.ф.}}$ (Дж/м²). Складові повної питомої потенціальної енергії визначаються із співвідношень [8,11]:

$$U_{\text{н.о.}} = \sigma^2 \left(\frac{1-2\nu}{6E} \right), \quad (3)$$

$$U_{\text{н.ф.}} = \sigma^2 \left(\frac{1+\nu}{3E} \right), \quad (4)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона.

Вивчення особливостей прояву гірського тиску за довжиною відкатних штреків та визначення основних факторів, що залежать від способу охорони та впливають на стійкість виробок, проведені в умовах шахті «Центральна» Державного підприємства «Торецьквугілля» (м. Торецьк, Україна) [9].

Для вивчення періодичного характеру прояву гірського тиску в підготовчих виробках при різних способах охорони, були проведені натурні дослідження стійкості відкатних штреків при їх охороні дерев'яними кострами зі шпал на горизонті 1146 м.

При проведенні спостережень в натуральних умовах на спеціально обладнаних замірних станціях по контуру виробки були встановлені репера. За допомогою маркшейдерської рулетки визначалася величина зближення реперів відносно один одного. Похибка вимірювань складала ± 2 мм. Схема замірних станцій та розташування реперів на контурі відкотного штреку представлені в [9].

Гірничо-геологічні умови наведені в табл.1.

Розглянемо умови підтримання підготовчих виробок на виїмкових дільницях.

Відкатний штрек по пласту l_3 . Виробку охороняли накатними кострами із дерев'яних шпал. Площа поперечного перерізу $S=8,5 \text{ м}^2$. Відстань між рамами арочного кріплення (АП-3) з дерев'яною затяжкою 0,8 м. Швидкість проведення відкатного штреку $V_{\text{оп}} = 16 \text{ м/мес}$, очисних робіт $V_{\text{оп}} = 10 \text{ м/мес}$. Штрек проводився за допомогою буровибухових робіт (БВР). Спосіб управління кривлею в очисному забої – повне обвалення.

Відкатний штрек по пласту l_5 . Виробку охороняли накатними кострами із шпал, потім кустами зі стоек або ціликами вугілля. Площа поперечного перерізу $S=8,5 \text{ м}^2$. Відстань між рамами арочного кріплення (АП-3) з дерев'яною затяжкою 0,8 м. Швидкість проведення відкатного штреку $V_{\text{оп}} = 14 \text{ м/мес}$, очисних робіт $V_{\text{оп}} = 11 \text{ м/мес}$.

Штрек проводився за допомогою БВР. Спосіб управління кривлею в очисному забої – утримання кривлі на кострах.

У реальних умовах розробки крутих вугільних пластів, при різних способах управління гірським тиском в очисному забої, зберігання відкатного штреку забезпечується за рахунок стійкості бічних порід. У цьому випадку для того, щоб зберегти цілісність нависаючої товщі у вуглепородному масиві, навколо підготовчих виробок зводять охоронні споруди – дерев'яні конструкції.

Таблиця 1 – Гірничо-геологічні умови експериментальних ділень

Індекс пласта	Кут падіння α , град	Потужність, м, м	Бокові породи			
			Кривля		Ґрунт	
			Безпосеред-ня	Основна	Безпосеред-ня	Основна
I_3	59	1,05	Глинистий сланець, потужністю до $m = 4,0$ м	Піщаний сланець, потужністю до $m = 7,0$ м	Глинистий сланець	Глинистий сланець, потужністю до $m = 15$ м
I_5	59	0,6	Глинистий сланець, потужністю до $m = 1,7-2,5$ м	Глинистий сланець, потужністю до $m = 10$ м	Глинистий сланець, піщано-глинистий сланець, потужністю до $m = 2,0$ м	Піщаник, потужністю $m = 10$ м

Навантаження $P(H)$ на охоронні споруди визначається з закону Гука [9,10,11]

$$P = E \cdot S \cdot \frac{\Delta h}{h}, \quad (5)$$

де E – модуль пружності, Па;

S – площа поперечного перерізу охоронної споруди, що припадає на 1 погонний метр відкатного штреку, m^2 , для ціликів $S = 8 m^2$, для накатних кострів $S = 6 m^2$, для кустів $S = 3 m^2$; відношення $\Delta h/h$ є відносною деформацією охоронної споруди, тобто

$$\lambda = \frac{\Delta h}{h}, \quad (6)$$

де Δh – вертикальна конвергенція по даним замірів в штреку, м;

h – висота охоронної споруди (відповідає потужності вугільного пласта), м.

У цьому дослідженні за величину Δh (м) приймаємо зміну відстані між кривлею та ґрунтом по нормалі на контурі відкатного штрека(напрямом реперів 1-3):

$$\Delta h = u_{1-3}.$$

Як простий і, водночас, показовий індикатор аналізу стійкості підготовчих гірничих виробок з урахуванням зміщень порід на контурі та деформаційних властивостей охоронних споруд, в дослідженні [9] використана оцінка приросту зміщення кривлі Δu (м) на контурі відкатного штрека по мірі віддалення від очисного забою, яка визначалася за виразом

$$\Delta u = u_{(1-3)i} - u_{(1-3)i-1}. \quad (7)$$

Для згладжування короточасних коливань та виявлення характерних тенденцій у змінах аналізованого параметра, застосовано метод простого ковзного середнього [12] з періодом усереднення 2:

$$\Delta u = \frac{\Delta u_i - \Delta u_{i-1}}{2} \quad (8)$$

З урахуванням розрахункового навантаження на охоронні споруди P (Н) та величини їх відносної деформації λ , можна отримати реальну оцінку деформаційних властивостей дерев'яних кострів, а отже оцінити умови підтримання відкатних штреків.

На рис.1 представлені графіки зміни висоти h (м) експериментальних зразків від навантаження F (кН) при одновісному стисненні.

При стисненні дерев'яних кострів зафіксовано, що зі збільшенням стискаючої сили до $F = 32$ кН, висота експериментального зразка зменшується з $h = 0,039$ м до $h = 0,011$ м (рис.1, крива 1). В результаті стиснення накатних кострів з дерев'яних шпал, при збільшенні стискаючої сили до $F = 50$ кН, висота зразка зменшилася з $h = 0,038$ до $h = 0,0156$ м (рис 3, крива 2).

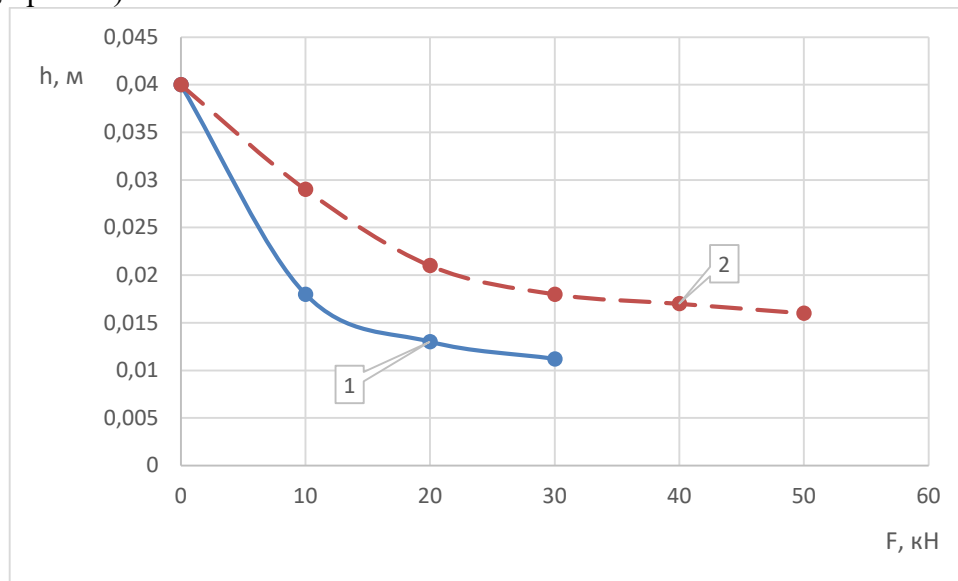


Рисунок 1 – Графіки зміни висоти h (м) експериментальних зразків від навантаження F (кН) при одновісному стисненні: 1 – дерев'яні костри; 2 – накатні костри з дерев'яних шпал.

На рис.2 показано графіки зміни жорсткості C (Н/м) експериментальних зразків від відносної деформації λ при одновісному стисненні. Зафіксовано, що при стисненні дерев'яних кострів зі шпал або накатних кострів їх жорсткість зменшується, а потім збільшується (рис.2, а, б). Так, при стисненні дерев'яних кострів до $\lambda = 0,38$ їх жорсткість C зменшилася з $C = 0,95 \cdot 10^6$ до $C = 0,25 \cdot 10^6$ Н/м, а потім збільшилась до $C = 1,04 \cdot 10^6$ Н/м при $\lambda = 0,72$ (рис.2, а). При одновісному стисненні накатних кострів зі шпал їх жорсткість відповідала $C = 0,82 \cdot 10^6$ Н/м при $\lambda = 0,31$, а потім $C = 1,94 \cdot 10^6$ Н/м при $\lambda = 0,62$ (рис.2, б).

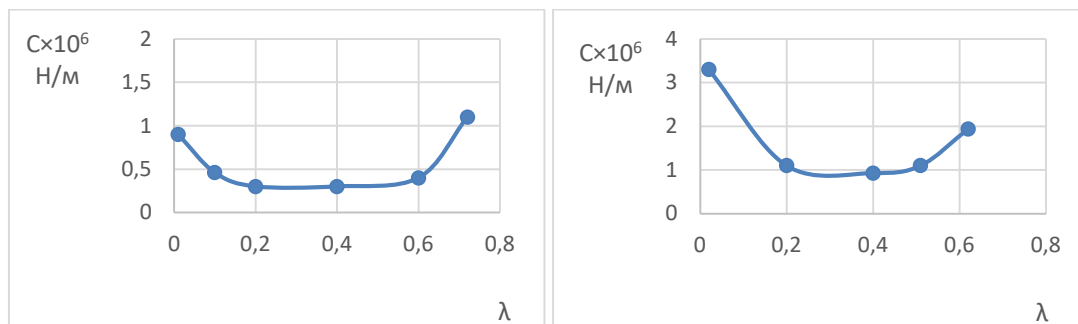


Рисунок 2 – Графіки зміни жорсткості C (10^6 Н/м) експериментальних зразків від величини відносної деформації λ при одновісному стисненні: а) костер зі шпал; б) накатний костер зі шпал.

На рис.3 показано графіки зміни навантаження σ (МПа), що передається на експериментальні зразки при стисненні від відносної деформації λ .

З рис.3 видно, що при стисненні дерев'яних кострів або накатних кострів з дерев'яних шпал навантаження плавно збільшується зі зростанням відносної деформації зразків (залежність 1,2).

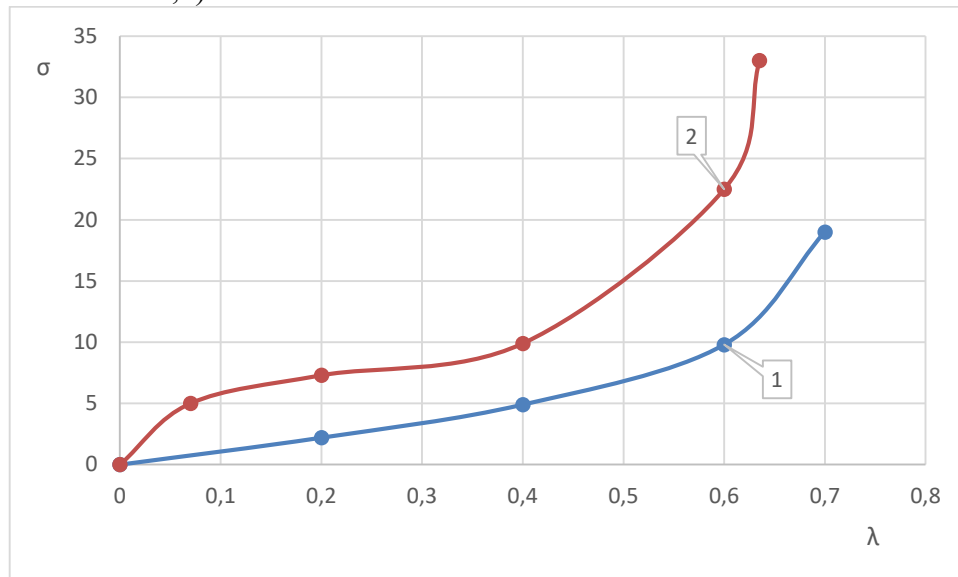


Рисунок 3 – Графіки зміни навантаження σ (МПа) при одновісному стисненні від відносної деформації λ : 1 – костер зі шпал; 2 – накатний костер зі шпал.

На рис.4 показано графіки змін питомої потенціальної енергії деформації експериментальних зразків з урахуванням зміни форми і об'єму в результаті одновісного стиснення від їх відносної деформації.

При стисненні дерев'яних кострів і накатних кострів зі шпал на зміну об'єму експериментальних зразків витрачається близько 30% питомої потенційної енергії, а на зміну форми близько 70 % (рис. 4, а,б).

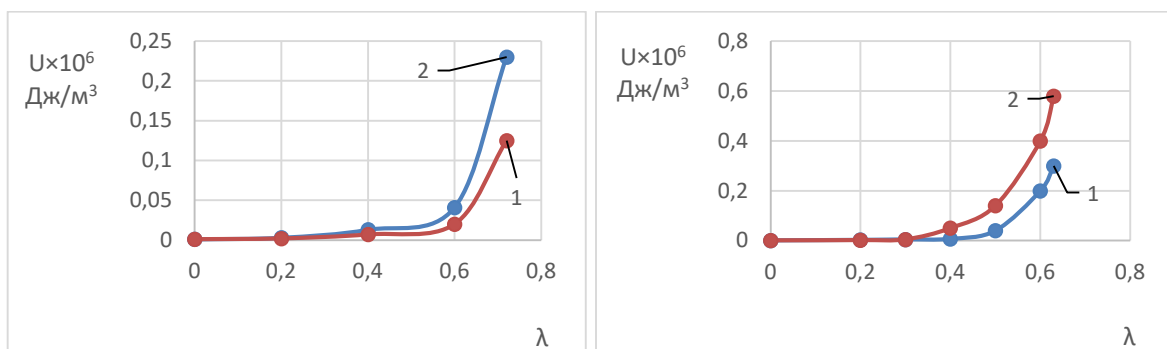


Рисунок 4 – Графіки змін питомої потенціальної енергії деформації експериментальних зразків при зміні об'єму $U_{н.о.}$ (10^6 Дж/м³) і форми $U_{н.ф.}$ (10^6 Дж/м³) в результаті одновісного стиснення від їх відносної деформації λ : а) дерев'яний костер зі шпал; б) накатний костер зі шпал; 1 - $U_{н.о.}$; 2 - $U_{н.ф.}$.

В результаті проведених досліджень, згідно [9] зафіксовано, що при охороні відкотного штрека накатними кострами зі шпал, навантаження збільшувалось поступово та досягало максимальних значень $P = 2,5 \dots 3,0$ МН на відстані $l = 60$ м позаду очисного забою. Далі, збільшення розрахункового навантаження P було незначним.

При охороні відкотного штрека накатними кострами із дерев'яних шпал зареєстровано зростання відносної деформації на відстані $l = 10 \dots 60$ м позаду очисного забою. Причому для пласта l_5 величина $\lambda = 0,6$ м, а для пласта l_6 - $\lambda = 0,5$ м, на відстані $l = 60$ м, позаду очисного забою.

На рис.5 представлені графіки зміни приросту зміщення Δu (м) від відносної деформації накатних кострів.

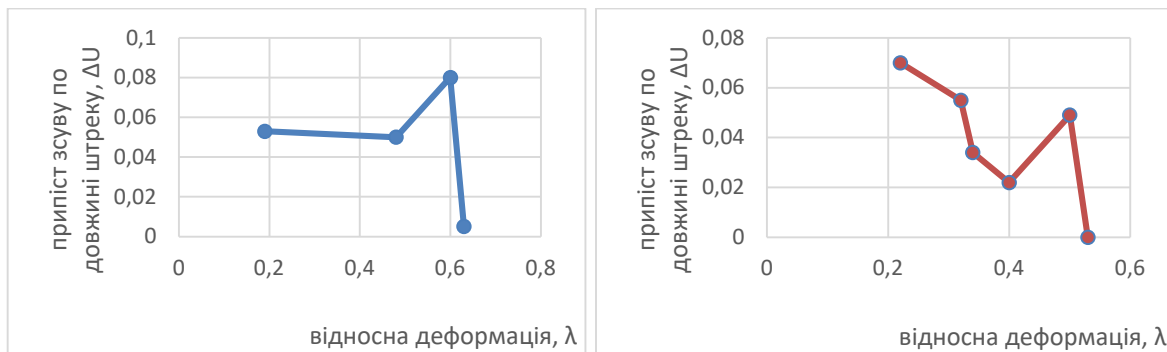


Рисунок 5 – Графіки зміни приросту зміщення Δu (м) від відносної деформації накатних кострів, розташованих над відкотним штреком: а) пласта l_5 ; б) пласта l_6 .

З наведених графіків видно, що на початковому етапі деформування середній приріст зсуву покрівлі Δu залишається умовно-постійним (пласт l_5) або поступово зменшується (пласт l_6), що свідчить про роботу охоронних споруд в режимі постійного або незначного наростаючого опору характерного, для піддатливих та обмежено-піддатливих конструкцій кріплення. Максимальне стиснення накатних кострів досягається при відносній деформації $\lambda = 0,5 \dots 0,6$. Перед цим відбувається стрибкоподібне ущільнення охоронної споруди, після чого подальший зсув бокових порід практично припиняється.

Надштрекові охоронні споруди, які призначені для підтримання бічних порід у вуглепородному масиві навколо підготовчих виробок, представляють собою специфічні об'єкти. Деформаційні характеристики таких об'єктів залежать від великої кількості факторів. Для вдосконалення способів охорони підготовчих виробок та їх оцінки використовували відносну деформацію охоронних споруд, зміну їх жорсткості та питому потенціальну енергію деформації з урахуванням зміни об'єму та форми при стисненні.

Обговорення результатів. Після одновісного стиснення експериментальних зразків (рис.1), останні під дією зовнішньої сили змінюють свої розміри і форму (рис.4). Для піддатливих охоронних споруд зі збільшенням відносної деформації λ відбувається ущільнення дерев'яних конструкцій (рис.1) і фіксується зростання жорсткості (рис.2).

З діаграми стиснення експериментальних зразків (рис.4) випливає, що при збільшенні навантаження на досліджувані конструкції зміна відносної деформації має певні особливості. При стисненні дерев'яних піддатливих конструкцій у вигляді кострів або накатних кострів характерне ущільнення експериментальних зразків із забезпеченням цілісності бічних порід. Обґрунтувати погіршення стійкості відкатних штреків при різних способах охорони (рис.1), можна за допомогою залежностей, що

відображають зміну приросту зсувів покрівлі Δu від відносної деформації охоронних споруд (рис 9,11). Для згладжування періодичних відхилень та виявлення характерних ділянок деформування, застосовано ковзне середнє.

Аналіз залежностей, представлених на рис.5 вказує на те, що при охороні відкатного штрека накатними кострами із дерев'яних шпал при їх стисненні, коли охоронні споруди деформуються на 50-60 %, проявляється чітко виражені піддатливі характеристики використовуваних охоронних споруд, працюючих в режимі постійного опору. Це найсприятливішим чином позначається на експлуатаційному стані підготовчих виробок. Встановлено, що при використанні піддатливих охоронних споруд в вигляді кострів або накатних кострів, внаслідок початкового зменшення жорсткості, а потім подальшого ущільнення конструкцій, що підтримують покрівлю, забезпечується плавний прогин бічних порід над відкатним штреком по довжині виїмкової ділянки. Показано, що характер зміни жорсткості дерев'яних піддатливих споруд зі зростанням відносної деформації (зниження на початковому етапі деформування з наступною стабілізацією та, в подальшому, зростання на кінцевому етапі) сприяє збереженню цілісності бічних порід, обмеженню граничної конвергенції та підвищенню стійкості вироблення, що охороняється.

Таким чином, в результаті виконаних досліджень встановлена оцінка деформаційних властивостей охоронних споруд підготовчих виробок для збереження їх стійкості на основі закономірностей геомеханічних явищ, які проявляються при розвантаженні вуглепородного масиву та сприяють збереженню цілісності покрівлі позаду лави, коли при управлінні її станом в процесі стиснення надштрекових конструкцій в зоні впливу очисних робіт відбувається поетапне зменшення прироста зміщень бічних порід на контурі, що призводить у часі до стабілізації навантаження на охоронні споруди та аркове піддатливе кріплення по довжині виїмкової ділянки.

Висновки. При розвантаженні вуглепородного масиву з підготовчими виробками та відносній деформації λ піддатливих охоронних споруд до певної граничної межі, відбувається їх модифікація за рахунок зміни питомої потенціальної енергії, що призводить до одночасного перетворення форми та об'єму і забезпечує несучу здатність конструкцій по довжині виїмкової ділянки.

1. Експериментально обґрунтовано, що в умовах одновісного стиснення піддатливих охоронних конструкцій з дерева у межах відносної деформації $0 < \lambda < 0,7$ відбувається зміна їх жорсткості, що у часі призводить до ущільнення ті підвищення опірності споруд, за рахунок чого переміщення бічних порід обмежується.

2. Експериментально встановлено, що при способі охорони підготовчих виробок дерев'яними кострами в зоні впливу очисних робіт ($0 < l < 100$ м) відбувається зростання їх опірності, яке проявляється у процесі стиснення після деформування охоронних споруд понад 40% та поетапне зменшення прироста зміщень бічних порід на контурі відкатного штреку позаду лави, чим створюються умови для стабілізації навантаження на аркове кріплення по довжині виїмкової ділянки.

Список літератури

1. Александров С.С. Обґрунтування та розробка способів забезпечення безпеки праці при підтримці виробок крутих вугільних пластів: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.26.01. / ДВНЗ «ДонНТУ», Покровськ, 2015. 24 с.
2. Чепіга Д.А. Обґрунтування та розробка способів підвищення безпеки праці гірників у виїмкових ділянках глибоких вугільних шахт: автореф. дис., канд. техн. Наук: 05.26.01. / ДВНЗ «ДонНТУ», Покровськ, 2019. 24 с.
3. Селезень А.Л., Томасов А.Г., Андрушко В.Ф. Поддержание подготовительных выработок при разработке крутых пластов. Москва: Недра, 1977. 205 с.

4. Алышев Н.А., Шаповал Н.А., Пивень Ю.А., Питаленко Е.И., Авербух А.Г., Аксенов А.В. Способы и средства охраны подготовительных горных выработок. – Донецк: НАН Украины, 1997. 80 с.
5. Сторчак Г.Г. Способы охраны выработок, предназначенных для повторного использования. Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2010». Дніпро, 2010. С. 211 – 215.
6. Солодянкин А.В., Мищенко М.Э. Поддержание подготовительных выработок для их повторного использования. Перспективы развития строительных технологий: 9-я междунар. научн.- практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. (Днепр, 23-24 апреля 2015 г). Днепр, 2015. С. 228 – 234.
7. Борщ-Компониц В.И. Практическая механика горных пород. М.: Горная книга. 2013. 322 с. ISBN978-5-98672-342-6.
8. Мешков Ю.Я. Концепция критической плотности энергии в моделях разрушенных плотных тел.
9. Iordanov, I. Buleha, Ya. Bachurina, H. Boichenko, V. Dovgal, O. Kayun, O. Kohtieva, Ye. Podkopayev (2020) EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE HAULAGE DRIFTS STABILITY IN STEEPLY DIPPING SEAMS. Min. miner. depos. 2021, 15(4): P. 56-57, <https://doi.org/10.33271/mining15.04.056>
10. Galvin, J.M. (2016). Ground Engineering – Principle and Practices for Underground Coal Mining. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25005-2>
11. Bedford A., Liechti K.M. Mechanics of Materials. Springer, 2020. – 1023 p.
12. Chatfield C. The Analysis of Time Series: An Introduction, Sixth Edition/Chapman Hall/CRC Text in Statistical Science/. CRC Press, 2016. 352 p.

References

1. Aleksandrov S.S. (2015) Obgruntuvannya ta rozrobka sposobiv zabezpechennia bezpeky pratsi pry pidtrymtsi vyrobok krutych vuhilnykh plastiv: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk: 05.26.01. / DVNZ «DonNTU», Pokrovsk (in Ukrainian)
2. Chepiga D.A. (2019) Obgruntuvannya ta rozrobka sposobiv pidvishchennia bezpeky praci girnikiv u viimkovih dilnitsyah glibokih vugilnih shaht: avtoref. dis., kand. tekhn. nauk: 05.26.01. DVNZ «DonNTU», Pokrovsk (in Ukrainian)
3. Selezenev A.L., Tomasov A.G., Andrushko V.F. (1977) Podderzhanie podgotovitelnykh vyrobotok pri razrabotke krutych plastov. Moskva: Nedra, (in Russian)
4. Alishev N.A., Shapoval N.A., Pyven Yu.A., Pytalenko E.Y., Averbukh A.H., Aksenov A.V. (1997) Sposoby y sredstva okhrany podhotoytelnykh gornyykh vyrobotok. – Donetsk: NAN Ukrayna (in Russian)
5. Storchak H.H. (2010) Sposoby okhrany vyrobotok, prednaznachennykh dlia povtornoho yspolzovaniya. Materialy mizhnarodnoi konferentsii «Forum hirnykiv – 2010». Dnipro, 211 – 215. (in Ukrainian)
6. Solodiankin A.V., Myshchenko M.E. (2015) Podderzhanie podgotovitelnykh vyrobotok dlia ykh povtornoho yspolzovaniya. Perspektivy razvitiya stroitelnykh tekhnologiy: 9-ya mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. molodykh uchennykh, aspyrantov y studentov. (Dnepr, 23-24 apreliya 2015 h). Dnepr. 228 – 234. (in Russian)
7. Borshch-Komponyets V.Y. (2013) Prakticheskaia mekhanika hornyykh porod. M.: Hornaia knyha. ISBN978-5-98672-342-6. (in Russian)
8. Meshkov Yu. Ya. Kontseptsyia krytycheskoi plotnosty enerhiy v modeliakh razrushennykh plotnykh tel. (in Russian)
9. I. Iordanov, I. Buleha, Ya. Bachurina, H. Boichenko, V. Dovgal, O. Kayun, O. Kohtieva, Ye. Podkopayev (2020) EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE HAULAGE DRIFTS STABILITY IN STEEPLY DIPPING SEAMS. Min. miner. depos. 2021, 15(4): P. 56-57, <https://doi.org/10.33271/mining15.04.056>
10. Galvin, J.M. (2016). Ground Engineering – Principle and Practices for Underground Coal Mining. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25005-2>
11. Bedford A., Liechti K.M. (2020). Mechanics of Materials. Springer.
12. Chatfield C. (2016) The Analysis of Time Series: An Introduction, Sixth Edition/Chapman Hall/CRC Text in Statistical Science/. CRC Press.

Надійшла до редакції 26.05.2023

O. KAIUN

IMPROVEMENT OF METHODS OF KEEPING THE STABILITY OF PREPARATORY WORKS TAKING INTO ACCOUNT THE DEFORMATION PROPERTIES OF PROTECTIVE CONSTRUCTIONS

Purpose. To evaluate the deformation properties of protective constructions of preparatory workings to maintain their stability in the excavation areas of coal mines with steep coal seams.

Methodology. To achieve this goal, laboratory and field studies of the deformation properties of protective constructions have been performed.

Results. It has been established that under uniaxial compression, under the action of a statistical external force, which manifests itself in the conditions of uniaxial compression and relative deformation of wood chocks within $0.1 < \lambda < 0.2$, their stiffness decreases, and then it increases at $0.4 < \lambda < 0.7$, which creates conditions for ensuring the bearing capacity of protective constructions. Under field conditions, when using the method of protecting the slope drifts with wood chocks made of sleepers, after their deformation of more than 40% in the zone of influence of mining works ($0 < l < 100$ m), a gradual decrease in the increase in the displacement of side rocks on the contour occurs during the compaction process, due to which the operational condition of the preparatory workings along the length of the excavation section is ensured. To study the deformation characteristics of the protective constructions, we used the function of the incremental displacement of the side rocks on the contour of the workings at the section of $0 < l < 100$ m behind the face.

Scientific novelty. The regularities of deformation of protective constructions of preparatory mine workings under uniaxial compression with regard to changes in their stiffness have been established.

Practical significance. When mining steep coal seams, using the peculiarities of geomechanical phenomena manifested in the coal massif, it is advisable to use compressible protective constructions of preparatory mine workings.

Keywords: stability, compressible protective constructions, coal massif, uniaxial compression, deformation, excavation area.

Відомості про авторів

Каюн Олексій Петрович, аспірант, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; e-mail: a.p.kayun@ukr.net

Kaiun Oleksii, PhD Student, Donetsk National Technical University; e-mail: a.p.kayun@ukr.net

УДК 622.831:622.274

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-91-104>**Косенко А.В., Хорольський А.О., Хоменко О.Є., Кононенко М.М.****ГЕОМЕХАНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ ПОТУЖНИХ ТА ВЕЛЬМИ ПОТУЖНИХ ПОКЛАДІВ БАГАТИХ ЗАЛІЗНИХ РУД В УМОВАХ ЗНАЧНИХ ГЛИБИН**

Мета. Підвищення якості видобутої рудної маси та зниження експлуатаційних витрат на видобування корисної копалини завдяки урахуванню геомеханічного стану рудо-породного масиву.

Методи дослідження. Комплексний метод, що включає аналіз та узагальнення раніше проведених досліджень, шахтні інструментальні спостереження, чисельне моделювання методом скінченних елементів, аналітичні дослідження та статистичну обробку даних.

Результати. Встановлено, що ключовими факторами, які впливають на вибір стійких параметрів конструктивних елементів очисних панелей видобувних блоків, є: параметри напружено-деформованого стану горизонту очисної виїмки, що визначаються глибиною розробки, потужністю і кутом падіння рудного покладу, формою та розмірами зони зсуву й обвалення підроблених вмісних порід; порядок відпрацювання панелей за потужністю та простяганням видобувного блоку; інтенсивність відпрацювання запасів компенсаційних просторів. Водночас стійкість транспортних штреків і сполучень з ортами-заїздами залежить від довжини розташування їх до контакту вмісних порід лежачого боку з рудним покладом, потужності рудного покладу і геологічною макроструктурою порід лежачого боку, а стійкість нарізних виробок – з місцем розташування очисних панелей за потужністю рудного покладу від вмісних порід висячого боку, а також кількості контактів очисної панелі з обваленими вмісними породами. Встановлені максимально можливі стійкі параметри відслонень компенсаційних камер, що утворюються за допомогою вибухового відбивання свердловинних зарядів залежно від потужності рудного покладу, та розташування їх центру від порід висячого боку.

Наукова новизна. Для діапазону глибин 1200–1500 м отримані залежності розподілу напружень вхрест простягання рудного покладу на горизонті ведення гірничих робіт. Встановлені степеневі залежності еквівалентної ширини прогину днища очисної панелі, еквівалентних прогинів стійкого горизонтального і вертикального відслонень від розташування центру панелі за потужністю рудного покладу від вмісних порід висячого боку.

Практична значимість. Отримані залежності дозволяють вибрати найбільш раціональні технологічні схеми відпрацювання покладів багатих залізних руд з урахуванням напружено-деформованого стану рудо-породного масиву та розташування панелі за потужністю покладу.

Ключові слова: багаті залізні руди, напружено-деформований стан, рудо-породний масив, початковий напружений стан, очисні роботи, вироблений простір.

Вступ. Україна входить до десятки найбагатших країн світу за запасами залізної руди [1], більша частина з яких знаходиться в надрах Криворізького басейну [2]. Тому однією з найбільш розвинених галузей промисловості країни є чорна металургія [3]. Водночас залізнорудна промисловість і металургійний комплекс є бюджетоутворюючими галузями господарства, що мають для країни стратегічне значення [4]. Але наразі гірничо-металургійний комплекс переживає не найкращі часи [5]. Експерти коментують даний факт, як не використання належним чином свого «геологічного козира» [6]. Так як багаті залізні руди (до 67% заліза), що видобуваються підземним способом, видаються на земну поверхню низької якості з вмістом заліза – 53–57% [7]. Водночас зі збільшенням глибини зростають накладні витрати на транспортування рудної маси на земну поверхню та матеріалів на горизонти шахт, водовідлив і вентиляцію [8]. Тому забезпечення конкурентоспроможності шахт, в умовах сучасних ринкових відносин, можливо досягти завдяки підвищенню якості видобутої рудної маси та зниженню експлуатаційних витрат, що пов'язані з видобуванням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізом багаторічної практики встановлено, що основною проблемою розробки родовищ багатих залізних руд в умовах значних глибин підземного Кривбасу, є управління геомеханічним станом конструктивних елементів систем розробки [9]. Так як в покладах, що відпрацьовуються ефективними системами [10], зі зростанням глибини значно знижується стійкість відслонень камер та ціликів [11], виникає небезпека самообвалення стелін [12]. Проте в більшості випадків вибір форм і розмірів виїмкових одиниць здійснюється, виходячи лише з технологічних можливостей обладнання, що застосовується [13], або за аналогією з попереднім досвідом [14]. Водночас конструкція системи розробки отримує або значний резерв міцності та стійкості, на шкоду раціональності вилучення запасів [15], або передчасно руйнується з обваленням вмісних порід і втратою підготовлених до виїмки запасів, технічного обладнання та травматизму гірників [16].

Отже перспективи розвитку систем розробки покладів нестійких багатих залізних руд в умовах глибоких горизонтів пов'язані із: забезпеченням стійких форм і максимальних геометричних розмірів компенсаційних камер і ціликів [17]; встановленням раціонального співвідношення між геометричними розмірами панелей та порядком очисної виїмки [18]; видами та типорозмірами гірничого обладнання, що застосовується, яке забезпечує спрощення конструкції системи розробки та зменшення обсягу підготовчо-нарізних робіт [19]; організацією паралельного в часі виконання технологічних процесів [20]; заміною переносного технологічного обладнання на самохідні комплекси [21]; підвищенням якісних і кількісних показників вилучення корисної копалини [22].

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення якості видобутої рудної маси та зниження експлуатаційних витрат на видобування корисної копалини завдяки урахуванню геомеханічного стану рудо-породного масиву.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні завдання:

- 1) встановлено параметри розташування транспортно-доставочного штреку залежно від потужності покладу, форми зони обвалення вмісних порід висячого боку та макроструктурної будови рудо-породного масиву родовищ;
- 2) визначено параметри стійких відслонень ціликів та камер виїмкових панелей з урахуванням технології їх утворення та напружено-деформованого стану рудо-породного масиву;
- 3) розроблено конструктивні схеми раціональної технології відпрацювання потужних покладів родовища багатих залізних руд на глибоких горизонтах шахт з урахуванням розташування виїмкової панелі від вмісних порід висячого боку за потужністю рудного покладу.

Методи дослідження. Для визначення закономірностей розподілу напружень навколо транспортних виробок і компенсаційних камер, що розташовані на різній відстані від вмісних порід висячого боку, був використаний комплексний підхід, який включає аналіз та узагальнення раніше проведених досліджень, шахтні інструментальні спостереження, чисельне моделювання методом скінченних елементів аналітичні дослідження та статистичну обробку даних.

Дослідження включають вирішення комплексу геомеханічних та технологічних завдань: встановлення закономірностей зміни геометричних параметрів конструктивних елементів технологій очисних робіт та розробка технологічних схем їх утворення від геолого-геомеханічного стану рудо-породного масиву; визначення раціональних параметрів ресурсозберігаючих технологічних процесів очисної виїмки шляхом їхньої спільної оптимізації; створення конструкцій геотехнологій очисної виїмки з використанням певного типу гірничого обладнання.

Проведення досліджень виконано для гірничо-геологічних і геомеханічних умов залягання та розробки родовищ багатих залізних руд шахт Кривбасу. Залізрудні поклади розробляються на глибині 1100–1400 м, в макрошаровому з пластичними стратиграфічними горизонтами, що чергуються між собою, кварцитів і сланців, з різними геолого-фізичними властивостями. Перехід від шару до шару здебільшого дифузійний. Зв'язок між шарами – жорсткий. Потужність покладу змінюється від 20 до 150 м; кут падіння 40–60°.

Виклад основного матеріалу. Уявлення про розподіл напружень в породах, що оточують гірничі виробки, можна отримати, розглядаючи гірський масив як пружне ізотропне середовище [23]. Характер поля напружень навколо виробок залежить: від форм і розмірів їх поперечного перерізу [24]; природного поля напружень [25]; макроструктури та фізичних властивостей гірських порід [26]; динамічних навантажень, що викликані буро-підливними роботами [27]; близькістю розташування сусідніх гірничих виробок [28]. Водночас у процесі розробки залізрудних родовищ Криворізького басейну системами з обваленням руди та вмісних порід, коли породи висячого боку зрушуються й обвалюються в міру пониження горизонту очисної виїмки, в породах лежачого боку виникають специфічні зони опорного тиску і розвантаження (рис. 1).

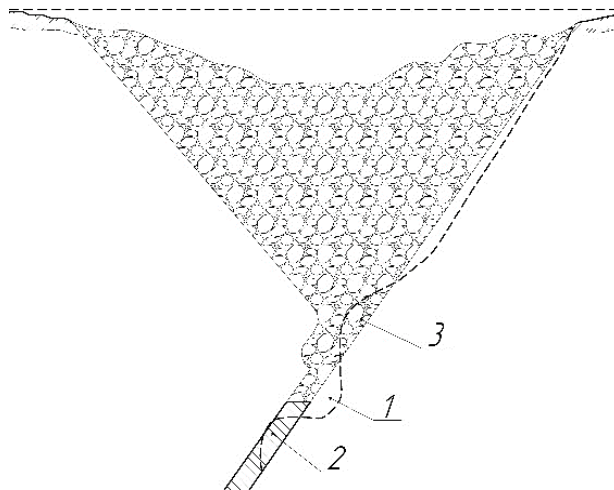


Рисунок 1 – Розріз родовища багатих залізних руд в хрест простягання: 1 – зона розвантаження; 2 – зона опорного тиску; 3 – зона вторинного ущільнення

Чисельним моделюванням методом скінчених елементів встановлено, що між геологічною структурою породних масивів Криворізьких залізрудних родовищ і структурного розподілу поля початкових напружень існує тісний зв'язок. Характеристики початкового напруженого стану залежать від геометричних і деформаційних параметрів структурних елементів масиву, їх взаємовідношень та орієнтації у просторі.

Для геологічних умов одного із родовищ південної групи шахт Кривбасу розподіл епюр відносних напружень визначається з виразу

$$\sigma_{ij}^o = \frac{\sigma_{ij}}{\gamma H}, \text{ ч. од.} \quad (1)$$

де σ_{ij} – початкові напруження (σ_{zz} – вертикальні; σ_{xx} – горизонтальні; σ_{zx} – дотичні), Па;
 H – глибина ведення гірничих робіт, м;
 γ – об’ємна вага гірських порід у масиві, т/м³.

Вертикальний розріз рудо-породного масиву вхрест простягання, з нанесенням епюр початкових напружень, подано на рис. 2.

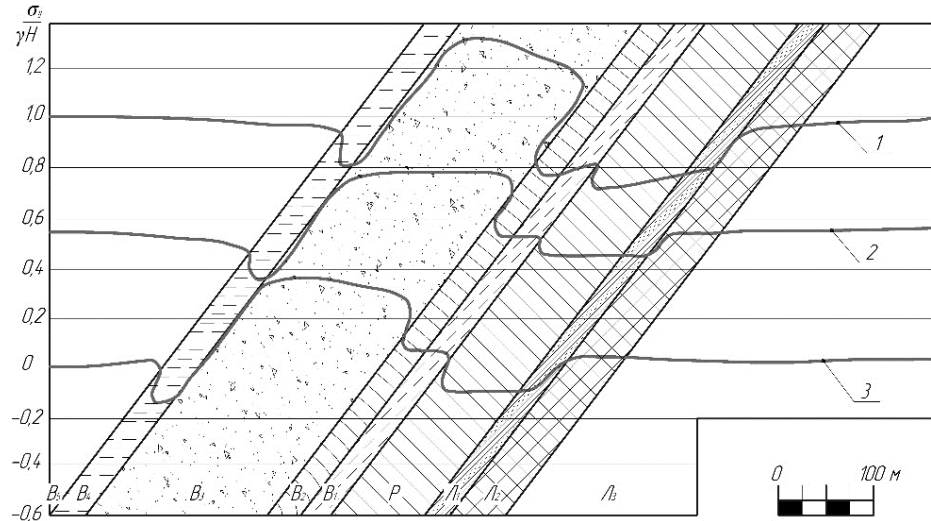


Рисунок 2 – Розподіл епюр відносних напружень на вертикальному розрізі рудо-породного масиву вхрест простягання: 1, 2, 3 – епюри відносних напружень, відповідно вертикальних, горизонтальних і дотичних; P – залізрудний масив; L_1, L_2, L_3 – вмісні породи висячого боку, відповідно силікатні сланці, джеспіліти й аркози; B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 – вмісні породи висячого боку, відповідно магнетитові кварцити, силікатно-магнетитові кварцити, карбонатно-силікатно-магнетитові кварцити, силікатні сланці та безрудні метапісчаникові варцити

З рис. 2, середні компоненти тензора напружень, в межах кожного окремого структурного елемента, можна описати залежностями:

$$\sigma_{zz} = K_1 \cdot \gamma H, \text{ Па} \quad (2)$$

$$\sigma_{xx} = K_2 \cdot \gamma H, \text{ Па} \quad (3)$$

$$\sigma_{zx} = K_3 \cdot \gamma H, \text{ Па} \quad (4)$$

де K_1, K_2, K_3 – емпіричні коефіцієнти, що залежать від геологічної структури та деформаційних характеристик структурних елементів рудо-породного масиву.

Напружено-деформований стан рудо-породного масиву в зоні очисних робіт родовищ другого класу розробки відрізняється від початкового напруженого стану впливом двох основних техногенних факторів: утворенням відкритого очисного простору; тиском обвалених вмісних порід на поверхню породного масиву, що оточує вироблений простір та утворену ним зону обвалення.

Вироблений простір являє собою відкрити, у напрямку земної поверхні, каньйоноподібну зону, що заповнена обваленими корінними породами висячого і лежачого боків, безрудними включеннями, наносами та втраченою рудою (рис. 1). Форма виробленого простору визначається потужністю і кутом падіння рудного покладу, а також характером обвалення та зсуву порід висячого боку (без відставання чи з відставанням від горизонту очисних робіт).

Установлено, що в період, коли виникає обвалення і здійснилося зрушення порід висячого боку (рис. 1), в зоні очисної виїмки за межами рудного покладу, на відстані до $0,5H$ вглиб від масиву, відсутні геомеханічні зони опорного тиску. Тобто всі компоненти поля напружень за абсолютною величиною не перевищують початкових напружень на 10–15%, що існували в цій зоні до початку ведення очисних робіт. У випадку консольного зависання подрібнених вмісних порід (рис. 1) у висячому боці рудного масиву на глибину до 40–100 м (залежно від прогину консолі l_{kons}) з'являється локальна зона концентрованих початкових напружень. Водночас зі зростанням значення прогину консолі (l_{kons}) коефіцієнти концентрації головних максимальних (K_{max}) і мінімальних (K_{min}) напружень:

$$K_{max} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{max}^o}, \text{ ч. од.} \quad (5)$$

$$K_{min} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{min}^o}, \text{ ч. од.} \quad (6)$$

де σ_{max} – головні максимальні напруження, Па;

σ_{min} – головні мінімальні напруження, Па;

σ_{max}^o – концентровані головні максимальні напруження, Па;

σ_{min}^o – концентровані головні мінімальні напруження, Па.

Коефіцієнти концентрацій головних нормальних напружень K_{max} і K_{min} , за умов різної величини проміжку консолі висячого боку в приконтатній зоні рудного покладу подано в табл. 1.

Таблиця 1 – Коефіцієнти концентрацій головних нормальних напружень за умов різної величини проміжку консолі висячого боку

$l_{kons}, \text{ м}$	K_{max}	K_{min}
0	0,55	0,65
50	1,05	0,75
100	1,45	1,1

Дослідження геомеханічного стану здійснювалось шляхом спостереження за руйнуванням кріплення відкотних штреків, що знаходилися на різній відстані до контакту рудного масиву з вмісними породами лежачого боку (рис. 3).



Рисунок 3 – Світлини наслідків проявів гірського тиску в умовах шахти «Криворізька» АТ «Криворізький залізорудний комбінат» на гор. 1315 м в маркшейдерських осях 130–136

Залежно від відстані відкотного штреку до контакту рудного масиву з вмісними породами лежачого боку витрати на перекріплення були різними. Графік залежності відносних витрат на перекріплення відкотного штреку, у порівнянні з витратами на кріплення після його проведення, залежно від відстані його до контакту рудного масиву з вмісними породами лежачого боку подано на рис. 4.

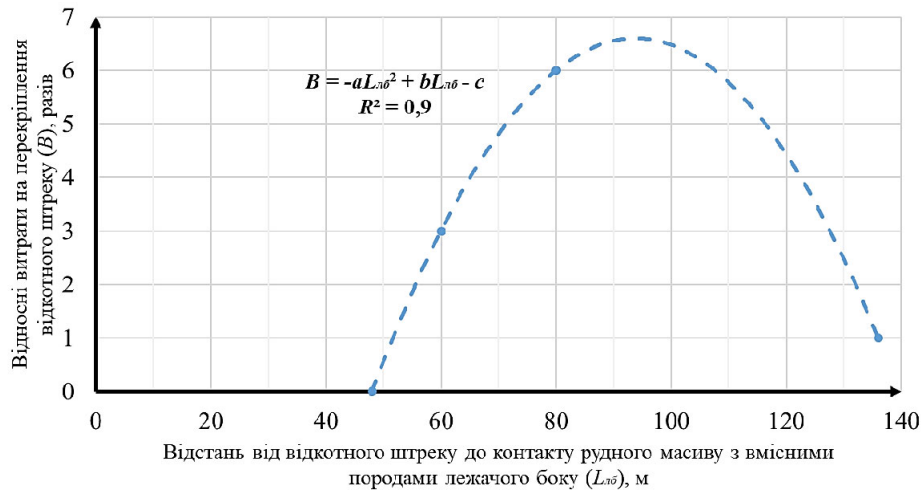


Рисунок 4 – Графік залежності відносних витрат на перекріплення відкотного штреку залежно від відстані його до контакту рудного масиву з вмісними породами лежачого боку в умовах шахти «Криворізька» АТ «Криворізький залізорудний комбінат» на гор. 1315 м в маркшейдерських осях 1–6, 6–14, 14–20, 20–26, 26–32, 32–38, 38–44, 44–76, 76–82, 82–88, 88–94, 94–100, 100–106, 106–112, 112–118, 118–124, 124–130, 130–136, 136–142, 142–148, 148–154а

З рис. 4 встановлено, що відносні витрати на перекріплення відкотного штреку, залежно від відстані його до контакту рудного масиву з вмісними породами лежачого боку, змінюється за поліноміальною квадратичною залежністю

$$B = -0,003L_{лб}^2 + 0,6L_{лб} - 21,1, \text{ разів} \quad (7)$$

де $L_{лб}$ – відстань від відкотного штреку до контакту рудного масиву з вмісними породами лежачого боку, м.

Проведений аналіз розробки потужних та вельми потужних рудних покладів (рис. 5) дав змогу встановити, що їх розробка здійснюється декількома панелями, що розташовані за потужністю рудного покладу. Відпрацювання запасів очисних панелей здійснюється за фронтально-діагональною схемою. Водночас більша частина очисних панелей характеризується одним і двома боковими контактами з обваленими вмісними породами. Панелі, що не мають контактів з обваленими вмісними породами, мають місце лише на початку відпрацювання блоків.

Згідно рис. 5, геомеханічні умови відпрацювання очисних панелей, у міру розвитку гірничих робіт в межах технологічних діляниць, характеризуються різною кількістю та місцем розташування вертикальних контактів очисних панелей з обваленими породами.

Для визначення параметрів стійких відслонень і ціликів заданої форми основних технологічних схем розробки залізорудних покладів Кривбасу застосовується методика [29]. Ця методика доведена до робочих інструкцій, що регламентують інженерні розрахунки у процесі технологічного проектування. В її основу покладено метод функціональних характеристик визначення допустимих розмірів конструктивних

елементів систем розробки залізорудних родовищ, що отримано експериментально-виробничим шляхом. Для розрахунків використовуються значення граничних за умовами стійкості характеристики: еквівалентний прогин стійкого відслонення (горизонтального, вертикального, похилого); безрозмірна характеристика для визначення ширини стійкого міжкамерного цілика та товщини стійкої стелени.

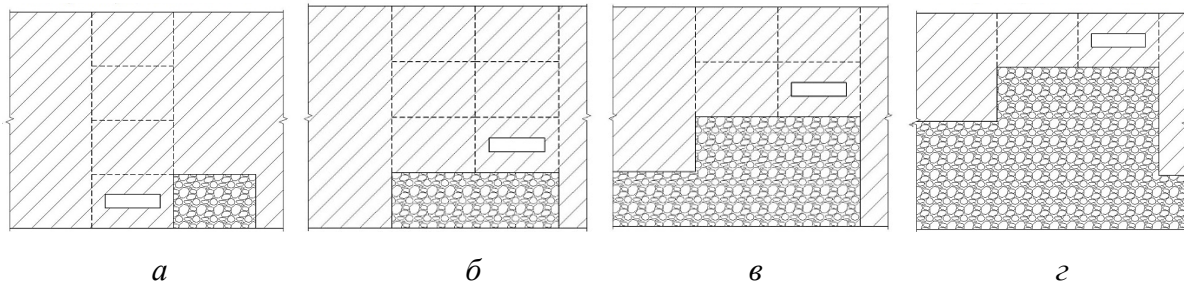


Рисунок 5 – Види контактів панелей з обваленими вмісними породами:

a – відпрацювання засів першої панелі; *б* – відпрацювання запасів другої панелі;

в – відпрацювання запасів третьої панелі; *г* – відпрацювання запасів четвертої панелі

На основі проведених розрахунків встановлені залежності еквівалентної ширини прогину днища очисної панелі від її розташування за потужністю рудного покладу (рис. 6).

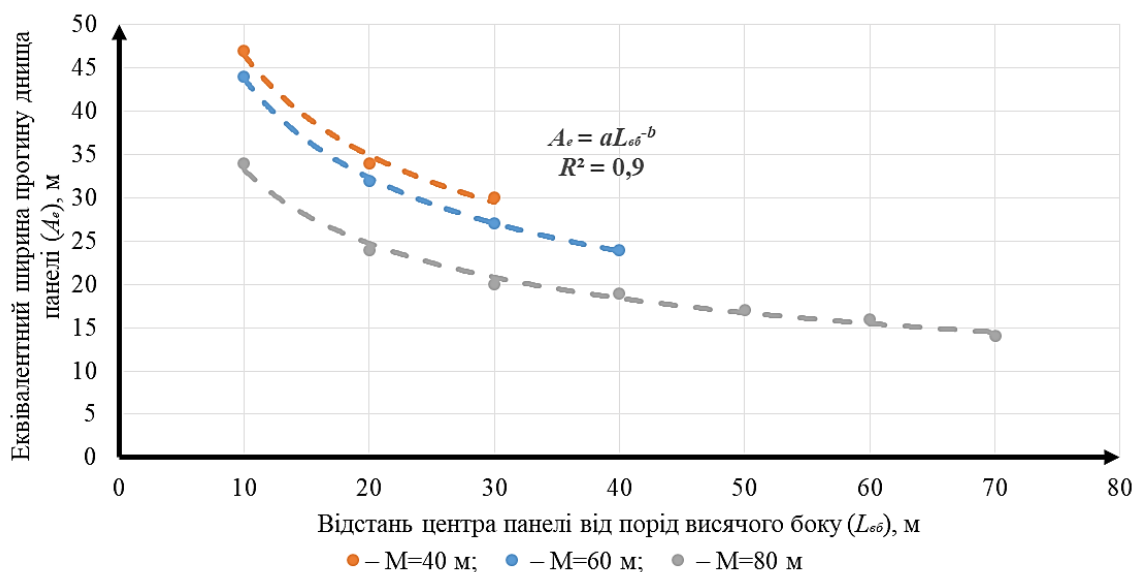


Рисунок 6 – Графіки залежності еквівалентного прогину днища очисної панелі від розташування її центру за потужністю рудного покладу від вмісних порід висячого боку, для покладів потужністю від 40 до 80 м

З рис. 6 встановлено, що еквівалентна ширина прогину днища очисної панелі залежить від потужності рудного покладу та змінюється за степеневою залежністю від розташування її центру за потужністю рудного покладу від вмісних порід висячого боку: коли потужність рудного покладу до 40 м

$$A_e = 125L_{eб}^{-0,43}, \text{ м} \quad (8)$$

де $L_{eб}$ – відстань від центру очисної панелі до вмісних порід висячого боку за потужністю рудного покладу

коли потужність рудного покладу 40–60 м

$$A_e = 120L_{\text{еб}}^{-0,44}, \text{ м} \quad (9)$$

Коли потужність рудного покладу 60–80 м

$$A_e = 89L_{\text{еб}}^{-0,42}, \text{ м} \quad (10)$$

На підставі проведених розрахунків встановлені залежності еквівалентних прогинів стійкого горизонтального і вертикального відслонень залежно від кількості контактів очисної панелі з обваленими вмісними породами та розташування її центру за потужністю рудного покладу від вмісних порід висячого боку (рис. 7).

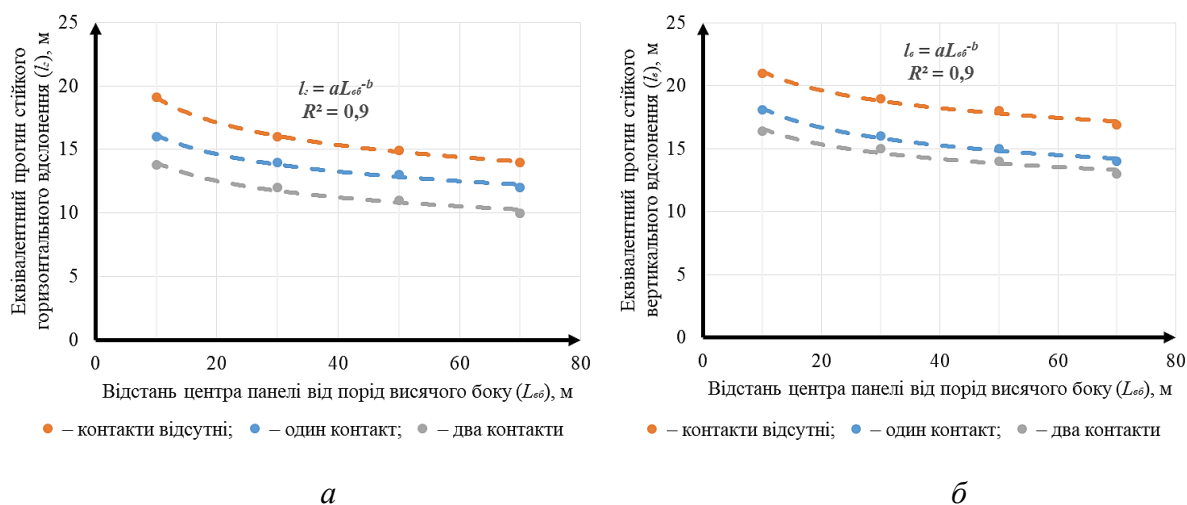


Рисунок 7 —Графіки залежності еквівалентних прогинів стійкого горизонтального (а) і вертикального (б) відслонень залежно від кількості контактів очисної панелі з обваленими вмісними породами та розташування її центру за потужністю рудного покладу від вмісних порід висячого боку:

З рис. 7 встановлено, що величина еквівалентних прогинів стійкого горизонтального ($l_{\text{г}}$) і вертикального ($l_{\text{в}}$) відслонень залежить від кількості контактів очисної панелі з обваленими вмісними породами та змінюється за степеневою залежністю від розташування її центру за потужністю рудного покладу від вмісних порід висячого боку:

коли панель не має контактів з обваленими вмісними породами

$$l_{\text{г}} = 27L_{\text{еб}}^{-0,15}, \text{ м} \quad (11)$$

$$l_{\text{в}} = 27L_{\text{еб}}^{-0,11}, \text{ м} \quad (12)$$

коли панель має один контакт з обваленими вмісними породами

$$l_{\text{г}} = 24L_{\text{еб}}^{-0,16}, \text{ м} \quad (13)$$

$$l_{\text{в}} = 24L_{\text{еб}}^{-0,12}, \text{ м} \quad (14)$$

коли панель має два контакти з обваленими вмісними породами

$$l_z = 20L_{\text{об}}^{-0,17}, \text{ м} \quad (15)$$

$$l_g = 21L_{\text{об}}^{-0,11}, \text{ м} \quad (16)$$

Обговорення результатів. В ході проведених досліджень встановлено, що напружено-деформований стан масивів, в зоні очисної виїмки, залежить від коефіцієнта бокового розпору регіонального поля початкових напружень. Водночас виявлено, що на характер формування початкових напружень істотно впливає структурна неоднорідність масиву гірських порід. Розраховані параметри напружень на 30–40% відрізняються від значень, що отримані для однорідних масивів. Основним фактором, що формує локальні поля напружень, є відмінність модулів деформацій структурних елементів. Параметри локальних полів напружень залежать від деформаційних властивостей, розмірів та орієнтації у просторі усієї сукупності шарів гірських порід. Область впливу кожного шару розповсюджується на відстань до трьох характерних його розмірів. Розподіл напружень за потужністю покладу крутоспадних шарів має чітко виражений максимум або мінімум, що розташований біля висячого чи лежачого боку шару, який розглядається, залежно від того більше чи менше одиниці відношення модулів деформації шару й оточуючих порід. Різниця між величинами напружень у протилежних меж породних шарів тим більша, чим більше відношення модулів деформацій шару й оточуючих порід.

Для боротьби з негативними наслідками порушення природної рівноваги стану рудо-породного масиву, що викликані веденням гірничих робіт, постійно застосовуються різноманітні додаткові заходи активного керування станом гірського масиву, які впливають на інтенсивність перехідних процесів і визначають властивості та стан порід в новому положенні рівноваги. Це здійснюється для раціонального, екологічного та безпечного видобування корисних копалин.

До заходів, що спрямовані на підвищення стійкості виробок, відносяться вибір раціональних місць їх закладення, розмірів та форм їх поперечного перерізу, типів і параметрів кріплення, що відповідають гірничо-геологічним умовам зміцнення або розвантаження приконтурних порід.

Розподіл напружень в зонах ведення гірничих робіт характеризується такими особливостями: в лежачому боці спостерігається активна динаміка змін параметрів напружено-деформованого стану масиву в зоні 50–100 м від контакту рудного покладу з породами лежачого боку, залежно від розвитку гірничих робіт в межах горизонту. Водночас вибір раціонального розташування транспортних виробок у породах лежачого боку є першочерговим завданням під час проектування підготовки родовища. Для забезпечення надійних умов експлуатації транспортні штреки необхідно розташовувати за межами зони розвантаження та за межами ділянки максимальних напружень в зоні опорного тиску.

Техніко-економічна оцінка і результати вимірювань реперних станцій показали, що факторами, які безпосередньо визначають параметри трасування транспортно-підготовчих виробок, є потужність покладу, макроструктура порід лежачого боку, тип транспортних засобів і технології відпрацювання покладу.

Висновки. У ході проведених досліджень встановлено, що ключовими факторами, які впливають на вибір стійких параметрів конструктивних елементів очисних панелей видобувних блоків, є: параметри напружено-деформованого стану горизонту очисної виїмки, що визначаються глибиною розробки, потужністю і кутом падіння рудного

покладу, формою та розмірами зони зсуву й обвалення підроблених вмісних порід; порядок відпрацювання панелей за потужністю та простяганням видобувного блоку; інтенсивність відпрацювання запасів компенсаційних просторів.

Для діапазону глибин 1200–1500 м отримані залежності розподілу напружень вхрест простягання рудного покладу на горизонті ведення гірничих робіт. Встановлені степеневі залежності визначення еквівалентної ширини прогину днища очисної панелі, еквівалентних прогинів стійкого горизонтального і вертикального відслонень від розташування центру панелі за потужністю рудного покладу від вмісних порід висячого боку. За отриманими залежностями обираються найбільш раціональні технологічні схеми відпрацювання покладів багатих залізних руд різної потужності, з урахуванням напружено-деформованого стану рудо-породного масиву та розташування панелі за потужністю покладу.

Установлено, що стійкість транспортних штреків і сполучень з ортами-заїздами залежить від довжини розташування їх до контакту вмісних порід лежачого боку з рудним покладом, потужності рудного покладу і геологічною макроструктурою порід лежачого боку, а стійкість нарізних виробок – з місцем розташування очисних панелей за потужністю рудного покладу від вмісних порід висячого боку, а також кількості контактів очисної панелі з обваленими вмісними породами. Водночас встановлено, що для підтримання функціонування гірничих виробок під час всього терміну експлуатації виконуються значні обсяги відновлювальних робіт, вартість яких у 5–6 разів перевищують вартість початкового проведення виробки.

Список літератури

1. Бодюк А.В. Геолого-економічні аспекти двоїстості визначень залізистих кварцитів та їх родовищ. *Геоecологія та охорона праці*. 2016. №30. С. 160–171. <https://doi.org/10.20535/2079-5688.2016.30.70008>
2. Kosenko A.V. Improvement of sub-level caving mining methods during high-grade iron ore mining. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. №1. Р. 19–25. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/019>
3. Мельник О.В. Тенденції та перспективи розвитку металургійних підприємств України. *Ефективна економіка*. 2017. № 8. – URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7629> (дата звернення: 29.03.2023)
4. Ляденко Т.В. Особливості виробничо-збутової діяльності вітчизняних залізрудних підприємств на сучасному етапі їх розвитку. *Ефективна економіка*. 2019. №4. – URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/4_2019/36.pdf (дата звернення: 29.03.2023) <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.4.34>
5. Гончарук О.В., Рябко О.І., Оверковський Б.М. Гірничо-металургійний комплекс України: сучасні тенденції та результати. *Економіка та управління підприємствами*. 2021. №55. С. 86–97. <https://doi.org/10.32843/infrastructure55-15>
6. Україна має геологічний козир, але не використовує його: бізнес огляд. – URL: <https://ukr.media/business/206089/> (дата звернення: 29.03.2023)
7. Tarasyutin V.M. Geotechnology features of high quality martite ore from deep mines of Kryvyi Rih basin. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2015. №1. Р. 54–60.
8. Pysmennyi S., Fedko M., Shvaher N., Chukharev S.. Mining of rich iron ore deposits of complex structure under the conditions of rock pressure development. *E3S Web of Conferences*, 2020. №201. Р. 01022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101022>
9. Khomenko O., Kononenko M., Netecha, M. Industrial research of massif zonal fragmentation around mine workings. *Mining Of Mineral Deposits*. 2016. №10(1), Pp. 50–56. <http://doi.org/10.15407/mining10.01.050>
10. Косенко А. Удосконалення технології розробки покладів багатих залізних руд у складних геомеханічних умовах глибоких горизонтів шахт Кривбасу. *Polish journal of science*, 2020. №33(1). С. 45–51.
11. Stupnik M., Kalinichenko O., Kalinichenko V., Pysmennyi, S. Morhun O. Choice and substantiation of stable crown shapes in deep-level iron ore mining. *Mining of Mineral Deposits*. 2018. №12(4). Р. 56–62. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.056>

12. Kononenko M., Khomenko O., Sudakov A., Drobot S., Lkhagva, Ts. Numerical modelling of massif zonal structuring around underground working. *Mining of mineral deposits*. 2016. №10(3). 101-106. <https://doi.org/10.15407/mining10.03.101>
13. Chitombo G.P. Cave mining — 16 years after Laubscher's 1994 paper "Cave mining – state of the art" Proceedings of the second. *International Seminar on Block and Sublevel Caving [Caving 2010]*, (Perth, Australia, 20–22 April 2010) – Perth, Australian Centre for Geomechanics, 2010. P. 45-61.
14. Khomenko O., Kononenko M., Danylchenko M. Modeling of bearing massif condition during chamber mining of ore deposits. *Mining Of Mineral Deposits*. 2016. №10(2). P. 40-47. <https://doi.org/10.15407/mining10.02.040>
15. Brown E.T. *Block Caving Geomechanics*. Queensland, 2002. 515 p.
16. Khomenko O., Kononenko M., Lyashenko V. Safety Improving of Mine Preparation Works at the Ore Mines. *Occupational Safety In Industry*. 2018. №5. P. 53-59. <http://doi.org/10.24000/0409-2961-2018-5-53-59>
17. Pysmennyi, S., Shvager, N., Shepel, O. Kovbyk, K., Dolgikh O. (2020). Development of resource-saving technology when mining ore bodies by blocks under rock pressure. *E3S Web of Conferences*, 2020. №166. 02006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016602006>
18. Stupnik M., Kalinichenko V., Pysmennyi S., Kalinichenko O. Fedko M. Method of simulating rock mass stability in laboratory conditions using equivalent materials. *Mining of Mineral Deposits*. 2016. №10(3), 46–51. <https://doi.org/10.15407/mining10.03.046>
19. Khomenko, O., Kononenko, M., Kosenko, A. *Processes of underground mining of ore deposits*. Dnipro: DUT, 2022. 206 p. <https://doi.org/10.33271/dut.002>
20. Kozyrev A., Fedotova I. Management of geomechanical processes – the basis for selecting the optimal technologies for the development of mineral deposits. *E3S Web of Conferences*, 2018. №56. P. 02005 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185602005>
21. Stupnik M.I., Kalinichenko V.O., Kolosov V.O., Pozdniakov I. B. Key aspects of the formation of underground points for maintenance and refueling of mining self-propelled equipment. *Розробка родовищ*. 2014. №8. С. 199–202.
22. Stupnik M., Kalinichenko V., Kalinichenko O. Pochtarev A. Technological measures to enhance efficiency of mining ore from stopes applying self-propelled equipment. *E3S Web of Conferences*, 2021. №280 P. 08010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128008010>
23. Khomenko O., Kononenko M. Geo-energetics of Ukrainian crystalline shield. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. №3. Pp. 12–21. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/3>
24. Raimzhanov B.R., Khakimov S.I., Khamzayev S.A. Sublevel Mining System with Artificial Pillars Made of a Hardening Backfills for The Development of Veins in Difficult Geomechanical Conditions. *Texas Journal of Multidisciplinary Studies*. 2021. №3. P. 98–104.
25. Avdeev A.N., Sosnovskaya E.L. Investigation of the stress-strain state of constructive elements of the development system sblijennix krutopadayushix jil. *Bulletin of the Siberian Branch of the Earth Science Section of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2015. №1(50). P. 67-75.
26. Potvin Y., Wesseloo J. Towards an understanding of dynamic demand on ground support. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2013. №113(12). P. 913–922.
27. Chilala G.S., de Assuncao J., Harris R., Stevenson R.M. "Initial Effects of Improved Drilling and Blasting Techniques on Downhole Stability at the Bulyankhulu Mine in Akatsia," in Y. Potvin (ed.). *Proceedings of the International Workshop on Design Methods in Underground Mining*. 2015. P. 241–254.
28. Ping Wang, Huiqiang Lia, Yan Lib. Bo Cheng. Stability analysis of backfilling in subsiding area and optimization of the stoping sequence. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013. №5(6). P. 478–485.
29. Бабец Є.К., Сиротюк С.В., Царіковський В.В. та ін. *Визначення та контроль допустимих розмірів конструктивних елементів систем розробки залізних руд*. К.: Мінпромполітики, 2010. 121 с.

References

1. Bodyuk A.V. (2016). Geological and economic aspects of the dual definition of ferruginous quartzites and their deposits [Heoloho-ekonomichni aspekty dvoystostivnyachen' zalizystykh kvartsytiv ta yikh rodovysch. Heoekolohiya ta okhrona pratsi]. *Geoecology and labor protection*, No. 30, 160–171. (in Ukraine). <https://doi.org/10.20535/2079-5688.2016.30.70008>
2. Kosenko A.V. (2021). Improvement of sub-level caving mining methods during high-grade iron ore mining. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. No. 1. 19–25. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/019>
3. Melnyk O.V. (2017). Trends and prospects for the development of metallurgical enterprises of Ukraine. Efficient economy [Tendentsiyi ta perspektyvy rozvytku metalurhiynykh pidpryyemstv ukrayiny]. Efficient

economy, No. 8. (in Ukraine) – URL:<http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7629> (access date: 03/29/2023).

4. Lyadenko T.V. (2019). Peculiarities of production and marketing activities of domestic iron ore enterprises at the current stage of their development. *Efficient economy*, No. 4. (in Ukraine) – URL:http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/4_2019/36.pdf (access date: 03/29/2023). <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.4.34>

5. Honcharuk O.V., Ryabko O.I., Overkovskiy B.M. (2021). Mining and metallurgical complex of Ukraine: modern trends and results [Hirnycho-metallurhiyny kompleks Ukrayiny: suchasni tendentsiyi ta rezul'taty]. *Economics and enterprise management*, No. 55, 86–97. (in Ukraine). <https://doi.org/10.32843/infrastructure55-15>

6. Ukraine has a geological trump card, but does not use it: a business overview [Ukrayina maye heolohichnyy kozyr, ale ne vykorystovuye yoho: biznes ohlyad] (in Ukraine) – URL:<https://ukr.media/business/206089/> (access date: 03/29/2023).

7. Tarasyutin V.M. (2015). Geotechnology features of high quality martite ore from deep mines of Kryvyi Rih basin. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, No. 1, pp. 54–60.

8. Pysmennyi S., Fedko M., Shvager N., Chukharev S. (2020). Mining of rich iron ore deposits of complex structure under the conditions of rock pressure development. *E3S Web of Conferences*, No. 201, 01022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101022>

9. Khomenko O., Kononenko M., Netecha M. (2016). Industrial research of massif zonal fragmentation around mine workings. *Mining Of Mineral Deposits*, No. 10(1), 50–56. <http://doi.org/10.15407/mining10.01.050>

10. Kosenko A. (2020). Improvement of the technology of development of rich iron ore deposits in complex geomechanical conditions of deep horizons of mines of Kryvbas [Udoskonalennya tekhnolohiyi rozrobky pokladiv bahatykh zaliznykh rud u skladnykh heomekhanichnykh umovakh hlybokyykh horyzontiv shakht Kryvbasu]. *Polish journal of science*, No. 33(1), 45–51. (in Ukraine).

11. Stupnik M., Kalinichenko O., Kalinichenko V., Pysmennyi S., Morhun O. (2018). Choice and substantiation of stable crown shapes in deep-level iron ore mining. *Mining of Mineral Deposits*, No. 12(4), 56–62. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.056>

12. Kononenko M., Khomenko O., Sudakov A., Drobot S., & Lkhagva, Ts. (2016). Numerical modelling of massif zonal structuring around underground working. *Mining of mineral deposits*, No. 10(3), 101–106. <https://doi.org/10.15407/mining10.03.101>

13. Chitombo G.P. (2010). Cave mining – 16 years after Laubscher's 1994 paper “Cave mining – state of the art” Proceedings of the second. *International Seminar on Block and Sublevel Caving [Caving 2010]*, (Perth, Australia, 20–22 April 2010) – Perth, Australian Centre for Geomechanics, 45–61.

14. Khomenko, O., Kononenko, M., & Danylchenko M. (2016). Modeling of bearing massif condition during chamber mining of ore deposits. *Mining Of Mineral Deposits*, No. 10(2), 40–47. <https://doi.org/10.15407/mining10.02.040>

15. Brown E.T. (2002). *Block Caving Geomechanics*. Queensland, 515 p.

16. Khomenko O., Kononenko M., Lyashenko, V. (2018). Safety Improving of Mine Preparation Works at the Ore Mines. *Occupational Safety In Industry*, (5), 53–59. <http://doi.org/10.24000/0409-2961-2018-5-53-59>

17. Pysmennyi S., Shvager N., Shepel O. Kovbyk, K., Dolgikh O. (2020). Development of resource-saving technology when mining ore bodies by blocks under rock pressure. *E3S Web of Conferences*, No. 166, p. 02006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016602006>

18. Stupnik M., Kalinichenko V., Pysmennyi S., Kalinichenko O., Fedko M. (2016). Method of simulating rock mass stability in laboratory conditions using equivalent materials. *Mining of Mineral Deposits*, No. 10(3), pp. 46–51. <https://doi.org/10.15407/mining10.03.046>

19. Khomenko O., Kononenko M., Kosenko A. (2022). *Processes of underground mining of ore deposits*. Dnipro, DUT. 206 p. (in Ukraine). <https://doi.org/10.33271/dut.002>

20. Kozyrev A., Fedotova I. (2018). Management of geomechanical processes – the basis for selecting the optimal technologies for the development of mineral deposits. *E3S Web of Conferences*, No. 56, 02005 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185602005>

21. Stupnik M.I., Kalinichenko V.O., Kolosov V.O., V. Pozdniakov I.B. (2014). Key aspects of the formation of underground points for maintenance and refueling of mining self-propelled equipment. *Development of deposits*, No. 8. 199–202.

22. Stupnik M., Kalinichenko V., Kalinichenko O. Pochtarev A. Technological measures to enhance efficiency of mining ore from stopes applying self-propelled equipment. *E3S Web of Conferences*, No. 280, p. 08010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128008010>

23. Khomenko O., Kononenko M. (2019). Geo-energetics of Ukrainian crystalline shield. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, No. 3, pp. 12–21. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/3>

24. Raimzhanov B.R., Khakimov S.I., Khamzayev S.A. (2021). Sublevel Mining System with Artificial Pillars Made of a Hardening Backfills for The Development of Veins in Difficult Geomechanical Conditions. *Texas Journal of Multidisciplinary Studies* No. 3. 98–104.

25. Avdeev A.N., Sosnovskaya E.L.(2015). Investigation of the stress-strain state of constructive elements of the development system sblijennix krutopadayushix jil. *Bulletin of the Siberian Branch of the Earth Science Section of the Russian Academy of Natural Sciences*, No. 1(50), 67–75.
26. Potvin Y., Wesseloo J. (2013). Towards an understanding of dynamic demand on ground support. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, No. 113(12), 913–922.
27. Chilala G.S., de Assuncao J., Harris R., Stevenson R.M.(2015). “Initial Effects of Improved Drilling and Blasting Techniques on Downhole Stability at the Bulyankhulu Mine in Akatsia,” in Y. Potvin (ed.). *Proceedings of the International Workshop on Design Methods in Underground Mining*, 241–254.
28. Ping Wang, Huiqiang Lia, Yan Lib. Bo Cheng (2013). Stability analysis of backfilling in subsiding area and optimization of the stoping sequence. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, No 5(6), 478–485.
29. Babets Ye. K., Sirotuk S.V., Tsarikovskiy V.V. et al. (2010). *Determination and control of the allowable dimensions of structural elements of iron ore mining systems. [Vyznachennya ta kontrol' dopustymykh rozmiriv konstruktyvnykh elementiv system rozrobky zaliznykh rud]*. M.: Minprompolityky, 121 p. (in Ukraine)

Надійшла до редакції 13.04.2023

Kosenko A. V., Khorolskyi A. O., Khomenko O. Ye., Kononenko M. M.

GEOMECHANICAL SUBSTANTIATION OF DEVELOPMENT OF THICK AND VERY THICK DEPOSITS OF RICH IRON ORE IN CONDITIONS OF SIGNIFICANT DEPTHS

Purpose. Improving the quality of the mined ore mass and reducing the operating costs for the extraction of minerals by taking into account the geomechanical state of the ore-rock massif.

Methods. A complex method that includes analysis and generalization of previous studies, mine instrumental observations, numerical modeling by the finite element method, analytical studies and statistical data processing.

Results. It has been established that the key factors influencing the choice of stable parameters of the structural elements of the stope panels of the stope blocks are: the parameters of the stress-strain state of the stope horizon, determined by the depth of mining, the thickness and dip of the ore deposit, the shape and size of the shear zone of host rocks; the procedure for working out stope panels according to the thickness and strike of the stope block; intensity of development of stocks of compensation spaces. At the same time, the stability of transport drifts and junctions with orts-arrivals depends on the length of their location before the contact of the host rocks of the lying side with the ore deposit, the thickness of the ore deposit and the geological macrostructure of the rocks of the sides, as well as the number of contacts of the stope panel with collapsed host rocks. The maximum possible stable parameters of exposures of compensation chambers, which are formed by explosive breaking of borehole charges, depending on the thickness of the ore deposit and the location of their center from the rocks of the hanging side, have been established.

Scientific novelty. For the depth range of 1200–1500 m, the dependences of the stress distribution across the pull of the ore deposit on the horizon of mining have been obtained. Power-law dependences of the equivalent span width of the bottom of the stope panel, equivalent spans of stable horizontal and vertical outcrops on the location of the center of the stope panel along the thickness of the ore deposit on the host rocks of the hanging side have been established.

Practical significance. The obtained dependencies allow choosing the most rational technological schemes for the mining of rich iron ore deposits, taking into account the stress-strain state of the ore-rock mass and the location of the stope panel according to the thickness of the deposit.

Keywords: rich iron ore, stress-strain state, ore-rock massif, initial stress state, mining operations, worked out area.

Відомості про авторів

Косенко Андрій Володимирович, кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник відділу управління станом гірничого масиву, Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ВФГП ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, andreyvladimirovich@email.ua.

Хорольський Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу управління станом гірничого масиву, Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної

механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ВФГП ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, khrolskiyaa@ukr.net

Хоменко Олег Євгенович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (НТУ «ДП»), Дніпро, Україна, rudana.in.ua@gmail.com

Кононенко Максим Миколайович, доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних систем та енергомеханічних комплексів (НТУ «ДП»), Дніпро, Україна, kmn211179@gmail.com

Kosenko Andrii Volodymyrovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Junior Researcher of Department of Rock Mass Condition Control, Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine (BPMP of IGTM of the NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, andreyvladimirovich@email.ua.

Khorolskyi Andrii Oleksandrovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher of Department of Rock Mass Condition Control, Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine (BPMP of IGTM of the NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, khrolskiyaa@ukr.net

Khomenko Oleh Yevhenovych, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Mining Engineering and Education Department, Dnipro University of Technology (DU of T), Dnipro, Ukraine, rudana.in.ua@gmail.com

Kononenko Maksym Mykolaiovych, Doctor of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of the Transport systems and energy-mechanical complexes department, Dnipro University of Technology (DU of T), Dnipro, Ukraine, kmn211179@gmail.com.

УДК 622.411.322: 533.15

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-105-114>

Мінєєв С.П., Прусова А.А., Янжула О.С., Мінєєв О.С.

ДИНАМИКА ЗМІН КОЕФІЦІЄНТА ФОЛЬМЕРІВСЬКОЇ ДИФУЗІЇ МЕТАНУ, АДСОРБОВАНОГО У МІКРОСОРБЦІЙНІЙ СТРУКТУРІ ПРУЖНОЇ ЗОНИ ОПОРНОГО ТИСКУ ВУГІЛЬНОГО ПЛАСТА

Мета роботи. Встановити можливі зміни коефіцієнта фольмерівської дифузії метану у мікросорбційній структурі пружної зони опорного тиску вугільного пласта.

Методика. Враховувалася енергія сорбційного зв'язку метану з вугіллям, енергія активації фольмерівської дифузії у пористому просторі вугілля, а також напружений стан пружної зони та його вплив на зміну фольмерівської пористості. При розрахунках варіювалися такі параметри, як діаметр фольмерівських мікропор і протяжність спадної гілки епюри опорного тиску.

Результати. Апроксимація розрахунків дозволила встановити, як парні залежності коефіцієнта фольмерівської дифузії від перелічених параметрів, так і його багатофакторний зв'язок з ними. Був зроблений висновок, що дифузійний процес метану в пружній зоні опорного тиску не заблокований гірським тиском, як рахувалось раніше, а активно розвивається. При цьому дифузія вільного метану буде обумовлена встановленою закономірністю змінення коефіцієнта фольмерівської дифузії у пружній зоні опорного тиску вугільного пласта.

Розрахунки показали, що в міру віддалення від максимуму опорного тиску коефіцієнт фольмерівської дифузії метану у вугільному пласті зростає, що обумовлено зниженням тиску гірських порід у спадній гілці епюри опорного тиску. Однак це зростання не є сильним внаслідок слабкої стисливості пор. Тому для пор одного діаметра коефіцієнт фольмерівської дифузії в пружній зоні опорного тиску вугільного пласта для даних горногеологічних умов можна вважати за константу. Для глибин, наприклад, 1000 м і діаметрів пор 10 Å значення коефіцієнта фольмерівської дифузії буде дорівнювати, приблизно, $3,77 \times 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$.

Наукова новизна. Виконані розрахунки коефіцієнта фольмерівської дифузії адсорбованого у мікропорах вугілля метану в пружній зоні опорного тиску вугільного пласта, котра, як звісно, знаходиться в умовах значних компресійних напружень. Встановлене явище підтверджує те, що газовіддачу метану обумовлює не тільки фільтрація вільного газу, но і фольмерівська дифузія адсорбованого метану.

Практичне значення. Оскільки запаси адсорбованого метану, як відомо, є основними запасами метану у вугіллі. Тому встановлена у статті закономірність дозволяє точніше обчислювати об'єми метану, що буде виділятися з вугільного масиву при гірничодобувних роботах для оцінки безпечних умов відпрацювання вугільних родовищ та при розробці технологій видобутку шатного метану.

Ключові слова: адсорбований метан, мікроструктура вугільного пласта, фольмерівські пори, область опорного тиску, пружна зона, коефіцієнт фольмерівської дифузії.

Вступ. В даний час при розробці високоефективних технологій видобутку вугілля та шахтного метану головною актуальною задачею є встановлення закономірностей дифузійно-фільтраційних потоків масопереносу метану у вуглепородному масиві. При цьому однією із важливіших областей у вуглепородному масиві при веденні гірничих робіт є пружна область опорного тиску, котра обумовлює об'єми та закономірності виділення метану у вироблений простір гірничого масиву. Багато років вважалося, що оскільки ця зона знаходиться під значним гірничим тиском, то в ній, априорі, блокується масоперенос метану за рахунок реалізації компресійного механізму деформування структури вугілля. Однак дані останніх досліджень показали, що механізм масопереносу метану у пружній зоні опорного тиску більш складний через різноманітність ієрархічної структури вугілля [1, 2], яка обумовлює різні типи дифузії у вугільному пласті, зокрема, фольмерівську дифузію [3]. Остання важлива тим, що ця дифузія зв'язує твердотільну дифузію [4] з дифузією вільного метану. При цьому вона долає сили міжфазної взаємодії метану з вугіллям, котрі є важливими в розв'язуванні газодинамічних явищ у гірничому масиві. Тому, в роботі була поставлена мета: дослідити зміну коефіцієнта фольмерівської

дифузії метану, що десорбується з мікросорбційної структури пружної зони вугільного пласта - від максимуму опорного тиску до незайманого масиву при веденні гірничих робіт.

Мета роботи. Встановити закономірність зміни коефіцієнта фольмерівської дифузії метану у мікросорбційній структурі пружної зони опорного тиску вугільного пласта.

Методика. Відомо, що ієрархічну мікроструктуру вугільного середовища, яка формує у себе різноманітні десорбційні канали, можна представити схемою, яка зображена на рисунку 1. З урахуванням цієї схеми десорбційний процес метану при його газовіддачі з вугільного середовища буде реалізовуватися таким чином. Оскільки основні об'єми сорбованого метану знаходяться в мікропорах вугілля, то його газовіддача буде спрямована до області найменшого сорбційного тиску. Тобто в початковий період десорбція спрямована до супермікропор та мезопор (рис. 1) по закону твердотільної дифузії. Далі цей процес буде йти до міжшарового проміжку по закону фольмерівської дифузії. В міжшаровому проміжку буде мати місце вільна дифузія, а в макротріщинах – фільтраційний процес вільного метану (рис. 1).

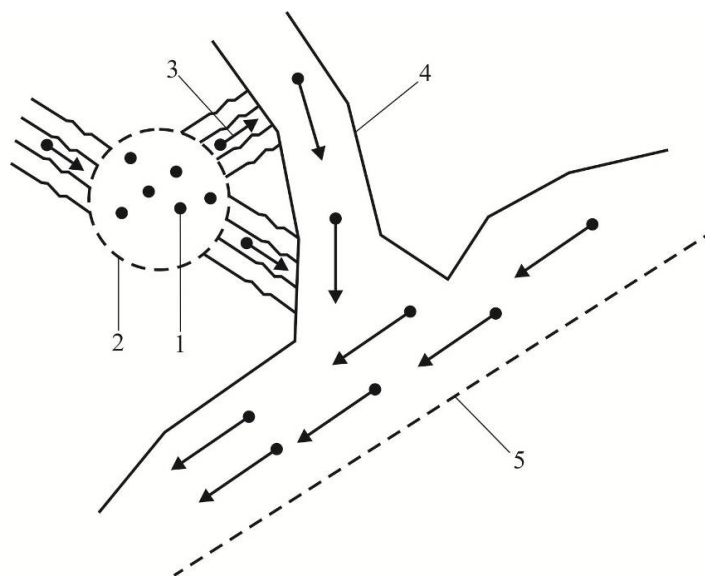


Рисунок 1 – Схема десорбційних каналів при газовіддачі метану з ієрархічної структури вугільного середовища, де: 1 – молекула метану; 2 – стінка мікропори; 3 – супермікропори та мезопори, де має місце фольмерівська дифузія; 4 – міжшаровий проміжок; 5 – макротріщина.

За зоною максимуму опорного тиску фольмерівські пори будуть стискуваними. Розміри цих пор залежать від напруженого стану в цієї зоні. При цьому діаметр фольмерівських пор можна встановити із співвідношення [5]:

$$d_{\phi} = d_{\phi 0} \sqrt{\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon'_{\gamma H}}} \quad (1)$$

де $d_{\phi 0}$ – діаметр фольмерівської пори в непорушеному вугільному масиві;

$\varepsilon_i, \varepsilon'_{\gamma H}$ – пористість вугілля, відповідно, в розвантаженому та нерозвантаженому масиві на глибині H у породах питомою вагою - γ (Н/м²). Останні описуються експоненціальними функціями, представленими у роботі [6].

Як показали розрахунки по формулі (1) діаметри фольмерівських пор в зоні опорного тиску змінюються в межах (12-8) Å. При цьому основними параметрами, які описують стан адсорбованого в цих порах метану є, як відомо [1], енергія адсорбції – Q , енергія активації фольмерівської дифузії – E_{af} та температура пласта – T . Для найменших фольмерівських пор ці параметри дорівнюють $Q = 9100$ Дж/моль, $E_{af} = 6500$ Дж/моль [7]. При більших порах ці параметри можна апроксимувати експоненціальними функціями у вигляді [7]:

$$Q(d_\phi) = D_Q + A_Q \exp(-d_\phi / t_Q); \quad (2)$$

$$E_{af}(d_\phi) = D_E + A_E \exp(-d_\phi / t_E), \quad (3)$$

де перша складова в (2)- (3), встановлює значення параметра, коли діаметр пори прагне до безконечності;

A_i – амплітуда зміни параметра;

t_i – прудкість зміни параметра при змінненні діаметра пори.

В цілому, коефіцієнт фольмерівської дифузії можна встановити по формулі [8]:

$$D_\phi = D_{0\phi} \times \sqrt{T} \exp\left(\frac{Q - E_{af}}{R_g T}\right), \quad (4)$$

де D_ϕ – коефіцієнт фольмерівської дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$;

$D_{0\phi}$ – предекспоненціальний множник, $\text{м}^2/(\text{с} \cdot ^\circ\text{K})$;

Q – енергія адсорбції, Дж /моль;

R_g – газова постійна, Дж/(моль $\cdot$ $^\circ\text{K}$);

E_{af} – енергія активації фольмерівської дифузії, Дж / моль;

T – температура, $^\circ\text{K}$.

Середня температура, наприклад, на глибинах, порядку 1000 м, буде дорівнювати $T = 307,9^\circ\text{K}$ [9].

Предекспоненціальний множник $D_{0\phi}$ в формулі (4) буде також залежить від діаметра пор. Його чисельні значення представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Чисельні значення параметра $D_{0\phi}$ для деяких пор [7].

$D_{0\phi} \times 10^{11}, \text{м}^2/(\text{с} \times ^\circ\text{K})$	Діаметри пор, Å		
	8	10	12
	3,21	4,44	5,75

Таким чином, співвідношення (4) з урахуванням апроксимаційних залежностей (2) - (3) та даних таблиці 1 дозволяють встановити коефіцієнт фольмерівської дифузії метану за зоною максимуму опорного тиску для різних діаметрів пор. При цьому діапазон змінення діаметрів фольмерівських пор у пружній зоні опорного тиску на різній відстані від її максимуму можна встановити по формулі (1).

Результати. Результати проведеного розрахунку зміни коефіцієнта фольмерівської дифузії метану у вугільній порі з початковим діаметром 12Å в пружній області опорного тиску представлені на рисунку 2.

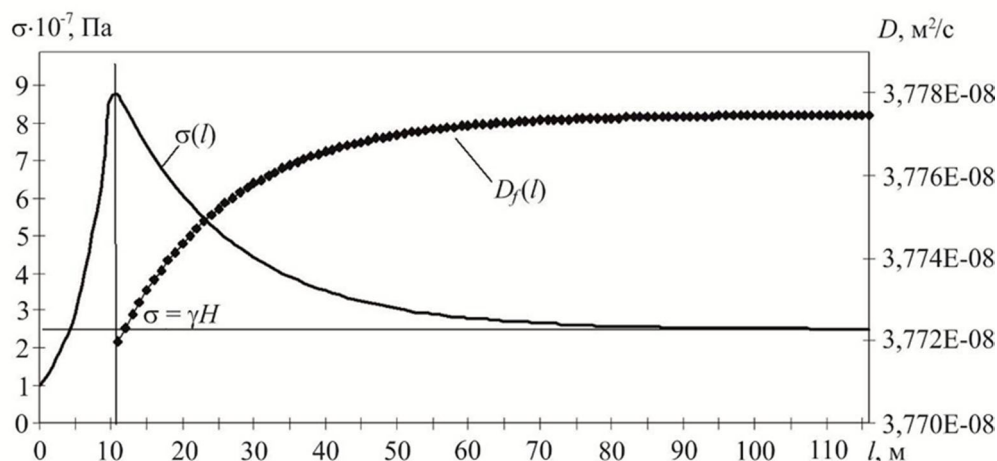


Рисунок 2 – Закономірність зміни коефіцієнта фольмерівської дифузії метану D_f у вугільній порі діаметром 12 Å в пружній зоні опорного тиску $\sigma(l)$

Як показують дані рисунка 2, коефіцієнт фольмерівської дифузії метану зі збільшенням відстані від максимуму опорного тиску – b змінюється слабо. Однак у цьому випадку є велика довжина ділянки стабілізації. Тому апроксимацію вираза (4) проводили експоненційною функцією, подібною формулам (2) та (3) у вигляді:

$$D_f = D_{0f} + A_D \exp(-b/t_D). \quad (5)$$

Залежність коефіцієнта фольмерівської дифузії метану від відстані максимуму опорного тиску вглиб масиву, тобто протяжність спадаючої гілки опорного тиску, при різних діаметрах фольмерівських пор наведено на рисунку 3.

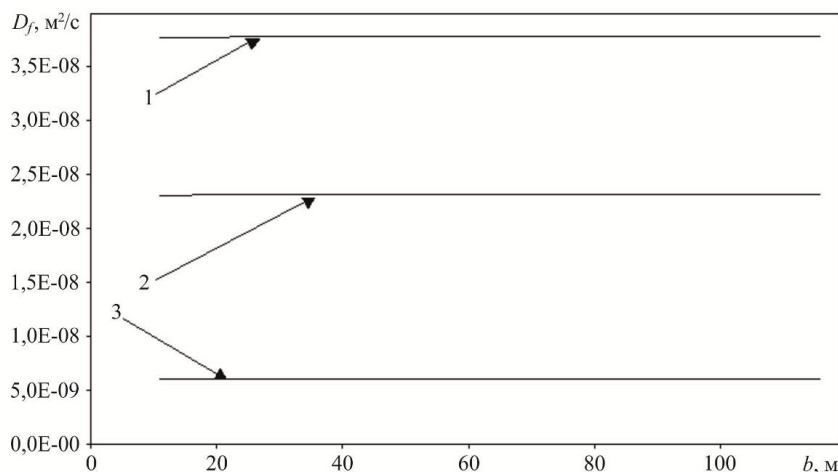


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта фольмерівської дифузії від протяжності спадаючої гілки опорного тиску за різних діаметрів пор: 1- 12 Å; 2- 10 Å; 3- 8 Å.

Результати апроксимації графіків на рисунку 3 функцією (5) представлені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати апроксимації залежності коефіцієнта фольмерівської дифузії від параметра відстані максимуму опорного тиску вглиб масиву – b .

Діаметр пор, Å	Параметри апроксимації		
	$D_{0\phi}$, м ² /с	A_D , м ² /с	$t_{D,M}$
12	$3,77747 \cdot 10^{-8}$	$-8,65587 \cdot 10^{-11}$	15,99238
10	$2,31433 \cdot 10^{-8}$	$-1,09129 \cdot 10^{-10}$	15,9937
8	$6,10691 \cdot 10^{-9}$	$-1,5151 \cdot 10^{-10}$	16,021

Відповідно до алгоритму, що викладений вище, дані таблиці 2 апроксимувалися з метою отримання залежності коефіцієнта фольмерівської дифузії від діаметра фольмерівських мікропор. Робилося це за допомогою експоненційної функції у формі (5), де параметри апроксимації для зручності були замінені функціями, які мали вид:

$$D_{0\phi} = D_1 + A_1 \exp(-d_\phi / t_1); \quad (6)$$

$$A_d = D_2 + A_2 \exp(-d_\phi / t_2); \quad (7)$$

$$t_d = D_3 + A_3 \exp(-d_\phi / t_3). \quad (8)$$

Результати апроксимації даних таблиці 2 функціями (6) - (8) представлені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати апроксимації залежності фольмерівської дифузії метану у вугіллі від діаметра мікропор

Параметр апроксимації	Значення
D_1	$1,2679 \cdot 10^{-7}$
D_2	$-6,08444 \cdot 10^{-11}$
D_3	15,99231
A_1	$-2,2182 \cdot 10^{-7}$
A_2	$-1,12714 \cdot 10^{-9}$
A_3	5,2485702
t_1	13,14218
t_2	3,17427
t_3	0,66023

Після цього, згідно з алгоритмом розрахунку, проводилося дослідження залежності коефіцієнта фольмерівської дифузії метану у вугіллі від протяжності спадної гілки опорного тиску. Результати розрахунку коефіцієнта фольмерівської дифузії метану у вугіллі при різних протяжностях спадаючої гілки опорного тиску для пор діаметром 12 Å представлені на рисунку 4.

Для того, щоб описати отримані закономірності залежністю від протяжності спадаючої гілки епюри опорного тиску була проведена аналогічна виразам (6) - (8) апроксимація отриманих даних, що змінюються з протяжністю спадаючої гілки опорного тиску. Як показали результати апроксимації, такі параметри, як D_1 , A_1 та t_1 у (6) – (8) не залежать від протяжності спадаючої гілки епюри опорного тиску, що визначають

граничну величину, якої прагне коефіцієнт фольмерівської дифузії метану при відстані, що прагне до нескінченності.

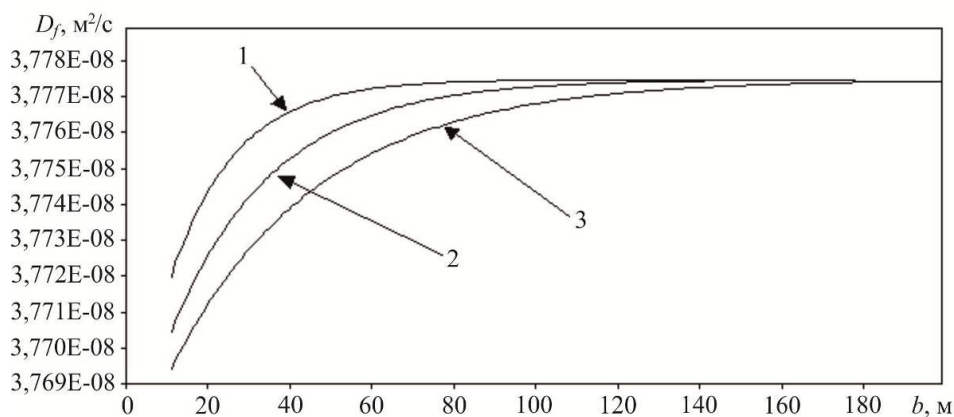


Рисунок 4— Змінення коефіцієнта фольмерівської дифузії метану у вугіллі при різній протяжності спадаючої гілки опорного тиску – b: 1- b=100м; 2- b=150м; 3- b=200м.

Для отримання остаточної залежності коефіцієнта фольмерівської дифузії метану у вугіллі від діаметрів мікропори, відстані від максимуму опорного тиску вглиб масиву апроксимуючі функції задавалися в наступному вигляді:

$$D_i = D_{li} + A_{li} \exp(-b/t_{li}); \quad (9)$$

$$A_i = D_{2i} + A_{2i} \exp(-b/t_{2i}); \quad (10)$$

$$t_i = D_{3i} + A_{3i} \exp(-b/t_{3i}), \quad (11)$$

Результати апроксимації функцій (9) - (11) представлені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Узагальнені параметри апроксимації для визначення коефіцієнта фольмерівської дифузії метану

Параметр апроксимації	Індекс i	
	2	3
D_{li}	$-6,1124 \cdot 10^{-11}$	-24,72178
D_{2i}	$-1,15121 \cdot 10^{-9}$	83,26867
D_{3i}	3,15165	-0,90912
A_{li}	$9.6757 \cdot 10^{-14}$	27,32296
A_{2i}	$1,21563 \cdot 10^{-11}$	12,23113
A_{3i}	0,00909	0,82605
t_{li}	-94,17467	-250,72274
t_{2i}	-146,3866	108,32334
t_{3i}	-109,76187	-155,82118

Підстановкою даних таблиці 4 в формули (9) – (11), встановили значення апроксимуючих параметрів, що у виразах (6) – (8):

$$D_1 = 1,27 * 10^{-07}; \quad (12)$$

$$D_2 = -6,11 * 10^{-11} + 9,68 * 10^{-14} \exp(-b/-94,17); \quad (13)$$

$$D_3 = -24,72 + 27,32 \exp(-b/-250,72); \quad (14)$$

$$A_1 = -2,22 * 10^{-07}; \quad (15)$$

$$A_2 = -1,15 * 10^{-9} + 1,22 * 10^{-11} \exp(b/146,39); \quad (16)$$

$$A_3 = 83,27 + 12,23 \exp(-b/108,32); \quad (17)$$

$$t_1 = 13,14218; \quad (18)$$

$$t_2 = 3,15 + 0,009 \exp(b/109,76); \quad (19)$$

$$t_3 = -0,91 + 0,83 \exp(b/155,82). \quad (20)$$

Підстановкою формул (12) – (20) в (6) – (8) були встановлені такі вирази для параметрів формули (4) у вигляді апроксимаційної залежності (5):

$$D_{0\phi} = 1,27 * 10^{-07} - 2,22 * 10^{-07} \exp(-d_\phi / 13,14218) \quad (21)$$

$$A_d = -6,11 * 10^{-11} + 9,68 * 10^{-14} \exp(-b/-94,17) +$$

$$+ (-1,15 * 10^{-9} + 1,22 * 10^{-11} \exp(b/146,39)) * \quad (22)$$

$$* \exp(-d_\phi / (3,15 + 0,009 \exp(b/109,76)));$$

$$t_d = -24,72 + 27,32 \exp(-b/-250,72) +$$

$$+ (83,27 + 12,23 \exp(-b/108,32)) * \quad (23)$$

$$* \exp(-d_\phi / (-0,91 + 0,83 \exp(b/155,82))).$$

В свою чергу, підставляючи апроксимаційні залежності (21) – (23) у (5) встановлюємо закономірність зміни коефіцієнта фольмерівської дифузії метану у пружній зоні опорного тиску вугільного пласта з урахуванням діаметра фольмерівських мікропор - d_ϕ і протяжності спадної гілки епюри опорного тиску - b .

Обговорення. Раніше рахувалось, що у пружній зоні опорного тиску вугільного пласта дифузія адсорбованого метану з мікроструктурі вугілля блокується компресійними силами гірського тиску. Однак проведені розрахунки коефіцієнта фольмерівської дифузії метану показали, що в цієї зоні, де має місце стискування пор, фольмерівська дифузія, як і твердотільна [1, 2, 10] все-таки розвивається. Тобто в пружній області опорного тиску дифузійний процес адсорбованого у мікроструктурі вугілля метану не буде заблокований, а розвивається повноцінно – від активації твердотільної дифузії до розвитку фольмерівської, котра призводить до вільної дифузії метану у вугіллі. Таким чином, в пружній зоні має місце масоперенос метану від непорушеного гірського масиву до області максимуму опорного тиску. Причому, оскільки як відомо, адсорбований метан пов'язан з мікроструктурою вугілля силами міжфазної взаємодії, то визволятися він буде при досягненні енергії активації десорбції імпульсним шляхом. Це може приводити к розвитку газодинамічних і пожежонебезпечних явищ. Тому оцінку викидонебезпечності

вуглепородного масиву необхідно призводити не тільки по привибійній зоні опорного тиску [5], но також і по оцінці дифузійних процесів у пружній зоні. Зв'язку з цим, в теперішній час актуальним є розробка методів прогнозу газодинамічної небезпеки всієї зони опорного тиску вугільного пласта. При розробці цих методів необхідно враховувати результати даної роботи, які приведені у висновках.

Висновки.

1. Визначена закономірність зміни коефіцієнта фольмерівської дифузії метану, адсорбованого у мікроструктурі пружної зони опорного тиску вугільного пласта, при різних діаметрів фольмерівських мікропор і протяжності спадної гілки епюри опорного тиску, яка описується співвідношеннями (5), (21 – (23), що ураховують енергію сорбційного зв'язку метану з вугіллям та енергію активації фольмерівської дифузії.

2. Встановлено, що в міру віддалення від максимуму опорного тиску коефіцієнт фольмерівської дифузії метану у вугільному пласті зростає, що обумовлено зниженням тиску гірських порід у спадній гілці епюри опорного тиску. Це зростання не є сильним внаслідок слабкої стисливості пор. Наприклад, на глибині 1000 м коефіцієнт фольмерівської дифузії у разі протяжності спадаючої гілки епюри опорного тиску 200 м становить $3,775 \times 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$, а при протяжності спадаючої гілки 100 м – $3,772 \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$.

3. Виконані розрахунки показали, що для однієї глибини розробки вугільного родовища та пор одного діаметра коефіцієнт фольмерівської дифузії в пружній зоні опорного тиску вугільного пласта можна вважати за константу. Її значення визначається із встановленої в роботі закономірності.

Список літератури

1. Минеев, С.П. Активация десорбции метана в угольных пластах / С.П. Минеев, А.А. Прусова, М.Г. Корнилов – Днепропетровск: Вебер, 2007. 252 с.
2. Минеев, С.П. Свойства газонасыщенного угля / С.П. Минеев Днепропетровск: НГУ, 2008. – 220 с.
3. Ходот В.В. Физико-химия газодинамических явлений в шахтах / В.В. Ходот, М.Ф. Яновская, Ю.С. Премыслер и др. – М.: Наука, 1973. 140 с.
4. Prusova A., Minieiev O., Ryzhova S. Simulation of the desorption process of methane adsorbed in a coal rock, taking into account intermolecular sorption interactions in the system “methane-coal”. In: E3S Web of Conferences, International Conference Essays of Mining Science and Practice, 109. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900073>.
5. Мінеєв С.П., Прусова А.А., Янжула О.С., Сачко Р.М. Розрахунок зміни коефіцієнта фольмерівської дифузії метану, що десорбується з вугілля, привибійної зони вугільного пласта на великих глибинах / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2021, № 156. С. 36- 45.
6. Минеев С.П. Кинетика структурных изменений в зоне опорного давления напряженного газонасыщенного угольного пласта / С.П. Минеев, А.А. Прусова // ФТПРПИ. 1992, №2. С. 53- 60.
7. Минеев С.П. Коэффициенты фольмеровской диффузии метана в угольном пласте / С.П. Минеев, А.А. Прусова, М.Г. Корнилов, О.В. Витушко // Межвед. сб. науч. тр. «Геотехническая механика», Днепропетровск, 2010, Вып. 87. С. 157- 162.
8. Малышев, Ю.Н. Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов / Ю.Н. Малышев, К.Н. Трубецкой, А.Т. Айруни. М.: АГН, 2000. 519 с.
9. Методика геофизических исследований скважин Донбасса / И.А. Гаркаленко, В.Ю. Зайченко, А.Ф. Михедько, Н.П. Развалов. – Киев: Наукова думка, 1971. 156 с.
10. Минеев С.П. Прогноз и предотвращение выбросов угля и газа на шахтах Украины / С.П. Минеев. - Мариуполь: Східний видавничий дім, 2016. 254 с.

References

1. Minieiev, S.P., Prusova, A.A. and Kornilov, M.G. (2007), *Aktivatsiya desorbtsii metana v ugolnykh plastakh* [Activation of desorption methane in coal seams], Veber, Dnepropetrovsk, Ukraine.
2. Minieiev, S.P. (2009), *Svoystva gazonasyshchennogo uglja* [Properties of gas-saturated coal], NMU, Dnepropetrovsk, Ukraine.

3. Khodot, V.V., Yanovskaya, M.F. and Promysler, Yu.S. (1973), *Fiziko-khimiya gazodinamicheskikh yavleniy v shakhtakh* [Physical-chemistry of gas-dynamic phenomena in shakhty], Nauka, Moscow, Russia.
4. Prusova A., Minieiev O., Ryzhova S. Simulation of the desorption process of methane adsorbed in a coal rock, taking into account intermolecular sorption interactions in the system "methane-coal". In: E3S Web of Conferences, International Conference Essays of Mining Science and Practice, 109.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900073>.
5. Minieiev, S.P., Prusova, A.A., Yanzhula, O.S. and Sachko, R.M. (2021), "Calculation of the change in the Vollmer diffusion coefficient of methane desorbed from coal in the near-outcrop area of a coal seam at great depths", *Geotekhnicheskaya mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 156, 36-45.
6. Mineev, S.P. and Prusova, A.A. (1992), "Kinetics of structural changes in the bearing Pressure zone of a gas-saturated reservoir", *FTPRPI*, no 2, 53-60.
7. Minieiev, S.P., Prusova, Kornilov M.G. and Vitushko, O.V. (2010), "Vollmer diffusion coefficient of methane desorbed in a coal seam", *Geotekhnicheskaya mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 87, 157-162.
8. Malyshev, Yu.N., Trubietskoy, K.N. and Ayruny, A.T., (2000), *Fundamental'no prikladnyye metody resheniya problemy metana ugol'nykh plastov* [Fundamentally applied methods for solving the problem of coal bed methane], Academy of Mining Sciences, Moscow, Russia.
9. Garkalenko, I.A., Zaychenko, V.Yu., Mikhed'ko, A.F. and Razvalov, N.P. (1971), *Metodika geofizicheskikh issledovaniy skvazhin Donbassa* [Methodology for geophysical research of wells in Donbass], Naukova dumka, Kiyev, Ukraine.
10. Mineev, S.P. (2016), *Prognoz i predotvrashcheniye vybrosov uglja i gaza na shakhtakh Ukrainy* [Forecast and prevention of coal and gas emissions from Ukraines mines], Skhidny vidavniy Dim, Mariupol, Ukraine.

Надійшла до редакції 21.06.2023

Minieiev S.P., Prusova A.A., Yanzhula O.S., Minieiev O.S.

DYNAMICS OF CHANGES IN THE VOLMER DIFFUSION COEFFICIENT OF METHANE ADSORBED IN THE MICROSORPTION STRUCTURE OF THE RESISTANT PRESSURE ELASTIC ZONE OF A COAL LAYER

Purpose. Set the possible change in the coefficient of Volmer diffusion of methane in the micro sorption structure of the elastic zone of the supporting pressure of the coal seam.

Methodology. The energy of the sorption bond of methane with the coals, the activation energy of the Volmer diffusion in the porous expanse of coal, as well as the stresses of the elastic zone and its effect on the change of the Volmer porosity, was taken into account. In the calculations, such parameters as the diameter of the Volmer micropores and the length of the descending branch of the support pressure diagram were varied.

Results. Approximation of calculations made it possible to establish both the pairwise dependences of the Volmer diffusion coefficient on the listed parameters and its multifactorial relationship with them. It was concluded that the diffuse process of methane in the elastic support pressure zone is not blocked by rock pressure, as previously thought, but is actively developing. In this case, the diffusion of free methane will be determined by the established pattern of change in the Volmer diffusion coefficient in the elastic zone of the coal seam bearing pressure. Calculations showed that as the distance from the maximum reference pressure increases, the Volmer diffusion coefficient of methane in the coal seam increases, which is due to a decrease in rock pressure in the descending branch of the reference pressure graph. However, this growth is not strong due to the weak compressibility of pores. Therefore, for pores of the same diameter, the Volmer diffusion coefficient in the elastic zone of the supporting pressure of the coal seam for the given mining geological conditions can be considered a constant. For depths of, for example, 1000 m and pore diameters of 10 Å, the value of the Volmer diffusion coefficient will be approximately $3.77 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

Scientific novelty. Calculations of the Volmer diffusion coefficient of methane adsorbed in the micropores of coal in the elastic zone of the supporting pressure of the coal seam, which, of course, is under significant compressive stresses, have been performed. The established phenomenon confirms that methane gas release is determined not only by free gas filtration, but also by Volmer diffusion of adsorbed methane.

Practical significance. Since adsorbed methane reserves are known to be the main methane reserves in coal, the regularity established in the article makes it possible to more accurately calculate the volumes of methane that will be released from the coal massif during mining operations for the assessment of safe working conditions for coal deposits and for the development of technologies for the production of shale methane.

Keywords: adsorbed methane, microstructure of a coal seam, Volmer pores, area of supporting pressure, elastic zone, Volmer diffusion coefficient.

Відомості про авторів

Мінєєв Сергій Павлович – д-р техн. наук, професор, завідувачий відділом, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), вул. Сімферопольська, 2 а, 49005, м. Дніпро, Україна; e-mail: sergmineev@gmail.com.

Прусова Алла Андріївна – канд. техн. наук, с.н.с., Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), вул. Сімферопольська, 2 а, 49005, м. Дніпро, Україна.

Янжула Олексій Сергійович – кандидат технічних наук, Директор дирекції з технічного розвитку та інвестицій Вугільного департаменту «Метінвест Холдингу», 49005 м. Дніпро, Україна

Мінєєв Олександр Сергійович – к.т.н., доцент НТУ «Дніпровська політехніка» м. Дніпро, Україна. Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка» МОН України, пр. Яворницького 19, 49005 м. Дніпро, Україна

Minieiev Serhii Pavlovych - Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Simferopolska Str., 2a, 49005, Dnipro, Ukraine; e-mail: sergmineev@gmail.com.

Prusova Alla Andriivna – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Simferopolska Str., 2a, 49005, Dnipro, Ukraine.

Yanzhula Oleksii Serhiiovych – Candidate of Technical Sciences, Director of the Directorate for Technical Development and Investments of the Coal Deportation of Metinvest Holding, 49005, Dnipro, Ukraine.

Minieiev Oleksandr Serhiiovych - Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor of Dnipro University of Technology of MES of Ukraine, Yavornytskoho Avenue, 19, 49005, Dnipro, Ukraine.

УДК 622.273.21

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-115-126>**М.В. Петльований, К.С. Сай, О.О. Борисовська, А.А. Хорольський****АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ЗАКЛАДНИХ МАСИВІВ У ТЕХНОГЕННИХ ПУСТОТАХ**

Мета. Вивчення та формування переліку найбільш розповсюджених видів закладних матеріалів на основі аналізу досвіду успішного здійснення закладних робіт для розвитку напрямів закладання техногенних пустот при розробці родовищ корисних копалин в Україні.

Методика. В роботі використано теоретичний аналіз, систематизацію та узагальнення інформації щодо проблеми досліджень. Вивчалися особливості способів закладання техногенних пустот і досвід використання закладних матеріалів у різних країнах світу, де набуло розповсюдження закладання виробленого простору. Вивчалися дані державної статистики, місць видалення відходів (МВВ), регіональної доповіді про стан довкілля, екологічного паспорта одного з регіонів-лідерів із накопичення промислових відходів.

Результати. Визначено, що недостатньо приділено уваги аналізу та вивченню різних видів промислових відходів, їх можливому використанню як потенційних закладних матеріалів для заповнення техногенних пустот саме для територій України. Проаналізовані основні переваги та недоліки існуючих в гірничій практиці видів закладання техногенних пустот. Зазначено, що найбільш перспективним є застосування твердіючого закладання з позиції геотехнічної стійкості та надійності штучного масиву. Визначено, на основі аналізу досвіду успішного здійснення закладних робіт, пріоритетний перелік найбільш розповсюджених видів закладних матеріалів. На прикладі регіона-лідера накопичення промислових відходів з урахуванням поширеного досвіду використання закладних матеріалів окремо за видами вивчено об'єми накопичення та займані площі.

Наукова новизна. Встановлено найбільш практичні й характерні види закладних матеріалів природного та техногенного походження, що можуть першочергово розглядатись для розвитку напрямів закладання техногенних пустот в Україні.

Практичне значення. Вивчення видів відходів природного та техногенного походження і параметрів їх накопичення є важливим кроком для початку розвитку ефективних напрямів закладання техногенних пустот й подальшого відновлення порушених територій.

Ключові слова: порушені території, техногенні пустоти, закладання, закладний матеріал.

Вступ. Питання збереження навколишнього середовища внаслідок комплексного видобування корисних копалин все більше набувають актуальності, адже відбуваються негативні трансформації довкілля – забруднюються та деградуються ґрунти, відчужуються цінні земельні площі, виникають деформації земної поверхні, забруднюються водойми та атмосферне повітря [1-3]. Крім того, поява техногенних ландшафтів впливає на соціальну напруженість у гірничодобувних регіонах, сприяючи депресивним настроям у суспільстві.

Розвиток таких крупних секторів економіки України як гірничодобувна та переробна галузі, металургія, енергетика призводить до утворення значної й найбільшої кількості відходів на земній поверхні. Так, за 2020 рік з 462 млн т утворених відходів кількість відходів за вищезазначеними галузями склала 430 млн т, при цьому утилізовано лише близько 94 млн т, що складає 21,9% [4]. В країнах Європейського Союзу рівень утилізації відходів значно вищий та знаходиться на рівні 70-99%.

Відомим напрямком утилізації відходів у світовій та українській практиці є будівельна галузь – отримання сировини для будівельних матеріалів (цементів, заповнювачів тощо) та будівництво доріг різного призначення [5, 6]. Більш масштабна утилізація промислових відходів, за даними світової практики, досягається шляхом їх використання як закладних матеріалів техногенних пустот при розробці корисних копалин [7, 8]. Однак, в Україні досвід закладних робіт є незначним і застосовується

лише на двох гірничих підприємствах. Особливо важливим є збереження територій після відпрацювання родовищ для країн з інтенсивним розвитком гірничодобувної діяльності, що мають значну площу населення.

В Україні кількість порушених земель за даними Держгеокадастру становить 142,7 тис. га, серед яких лідерами є такі області: Дніпропетровська (37,7 тис. га), Донецька (25,3 тис. га), Львівська (10,7 тис. га) та Луганська (10,3 тис. га). Очевидно, що найбільшого впливу завдає гірничодобувна галузь, яка широко розвинена в цих областях. Рівень рекультивації є досить низьким і склав за 2020 рік лише 51,2 га [9].

Для післявоєнного відновлення України потреба у нових земельних площах для будівництва нових промислових і цивільних інфраструктурних об'єктів набиратиме значущої важливості. Тому, перед державними органами та приватним бізнесом у гірничодобувній галузі ставляться відповідальні виклики щодо кооперації та синергійної взаємодії зі здійснення ефективних заходів відновлення порушених гірничими роботами територій. Особливо це важливо у регіонах із значними гірничодобувними потужностями – Дніпропетровській, Донецькій, Луганській, Запорізькій та Львівській областях. Проблеми збільшення рівня утилізації промислових відходів й усунення негативного впливу утворених значних техногенних пустот мають вельми актуальне значення для раціонального природокористування й збереження довкілля. Невід'ємною частиною вирішення цих питань є доскональний аналіз видів та місць розташування накопичених промислових відходів природного та техногенного походження на території України, що можуть в перспективі використовуватись як закладні матеріали техногенних пустот для відновлення порушених гірничими роботами територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В Україні вивченню питань видів промислових відходів, що потенційно можуть бути використані як закладні матеріали для формування закладних масивів у техногенних пустотах, присвячена обмежена кількість досліджень. Проте, існує певне число наукових напрацювань щодо окремих елементів технологій закладання – закладних матеріалів, способів закладання, методик розрахунку.

Так, розроблено засоби охорони підготовчих виробок вугільних шахт на основі використання рядової шахтної породи від проведення гірничих виробок зі спеціальними конструктивними особливостями [10]. Шахтні породи використовуються як певний закладний матеріал в охоронній конструкції та частково утилізуються без їх видачі на земну поверхню. Розроблено спосіб формування закладного масиву з шахтних порід присікання вугільного пласта на основі застосування вдосконалених технологічних схем селективного відпрацювання вугільних пластів. Отже, закладним матеріалом є шахтні породи, вихід яких на земну поверхню з подальшим складуванням у разі застосування технології зменшується на 40% [11]. Запропоновані підходи щодо раціоналізації обсягів закладання виробленого простору при розробці рудних родовищ на основі відходів виробництва шляхом порівняння сум, які кожна додаткова одиниця продукції додаватиме до валового доходу, з одного боку, і до валових витрат з іншого. Виконано аналітичні розрахунки закладних сумішей на основі доменних шлаків [12]. Науковцями проведені дослідження та випробування на лабораторній установці транспортабельних властивостей закладних сумішей з різними складами заповнювача, що включає подрібнені гірські породи, відвальний доменний шлак, вапняково-доломітний відсів, пісок, суглинок у різних пропорціях. Як в'язучий матеріал у всіх випробовуваних сумішах використовувався мелений гранульований шлак [13].

Авторами проведені дослідження можливості використання комбінованого в'язучого матеріалу з мелених доменних граншлаків та відсіву флюсового вапняку, дроблених відвальних гірських порід. Досліджувались фізико-механічні та мікроструктурні особливості закладних масивів [14]. В іншій роботі запропоновано при застосуванні камерного варіанту із закладанням виробленого простору при

відпрацюванні рудних запасів шахтою Кривбасу в якості твердіючої суміші застосовувати полімерне закладання на основі доменного шлаку, що дозволить зменшити її собівартість [15].

Зазначені дослідження відносяться до конкретних випадків щодо аспектів закладання вироблених просторів. Проте, серед розповсюдженого різноманіття різних видів промислових відходів, їх можливому використанню як потенційних закладних матеріалів для заповнення техногенних пустот саме для територій України не проводилось та не приділялось уваги. Відсутня інформаційно-аналітична база потенційних закладних матеріалів.

Метою роботи є вивчення та формування переліку найбільш розповсюджених видів закладних матеріалів на основі аналізу досвіду успішного здійснення закладних робіт для розвитку напрямів закладання техногенних пустот при розробці родовищ корисних копалин в Україні.

Методика досліджень. В роботі використано теоретичний аналіз, систематизацію та узагальнення даних. Вивчалися особливості способів закладання техногенних пустот та досвід використання закладних матеріалів у провідних країнах світу, де набуло розповсюдження закладання виробленого простору, таких як Китай, Австралія, США, Канада, Фінляндія, Україна. Проаналізовано склади закладних сумішей рудників і шахт для виявлення найбільш пріоритетних видів матеріалів природного та техногенного походження, що можуть використовуватись як компоненти для закладання техногенних пустот. Вивчалися дані державної статистики, місць видалення відходів (МВВ), регіональної доповіді про стан довкілля, екологічного паспорта одного з регіонів-лідерів із накопичення промислових відходів.

Виклад основного матеріалу. Закладання техногенних пустот, утворених внаслідок антропогенного впливу від видобутку корисних копалин, є ефективним та дієвим методом поліпшення стану навколишнього природного середовища. Це вирішує наступний комплекс різнопланових завдань:

- *технологічні* – ліквідація техногенних пустот та їх небезпеки, досягнення геотехнічної стійкості масиву;

- *економічні* – прибуток від використання відновлених земель, зменшення плати екологічних податків підприємств при використанні їх відходів;

- *екологічні* – ефективне відновлення земної поверхні для різноспрямованого її використання, зменшення об'ємів накопичених відходів у регіоні, поступове звільнення земельних ділянок, зменшення забруднення довкілля;

- *соціальні* – поліпшення якості життя на навколишніх територіях, соціальна відповідальність держави і підприємств щодо довкілля та здоров'я населення, поступове усунення депресивних техногенних ландшафтів.

У світовій та вітчизняній практиці ведення закладних робіт при розробці родовищ корисних копалин розповсюдження набули 4 види закладання – механічне, гідравлічне, твердіюче та ін'єкційне. Далі виконано аналіз їх основних переваг і недоліків (Табл. 1).

Аналіз переваг та недоліків існуючих і найбільш поширених способів закладання техногенних пустот (Табл. 1) дозволяє стверджувати, що для відновлення порушених гірничими роботами територій земної поверхні (шахтних пустот, зон зрушень, кар'єрних розробок) найбільш доцільним, на погляд авторів, є застосування твердіючого закладання. Земна поверхня, що підлягає відновленню під різноспрямоване використання та закладний масив, розташований під нею, потребують, перш за все, геотехнічної стійкості та надійності. Використання для формування закладного масиву декількох видів промислових відходів дозволить їх утилізувати й зменшити навантаження на довкілля від їх накопичення. Саме висока якість закладного масиву забезпечується при закладанні твердіючими сумішами. Висока вартість закладних робіт

може бути нівельована раціональним підходом з вибору пріоритетних об'єктів закладання, місць розташування промислових відходів та застосування певних технологічних переваг способу закладання.

Таблиця 1 – Переваги та недоліки поширених видів закладання техногенних пустот

Вид закладання	Основні переваги	Основні недоліки
Механічне	1. Простота виконання технологічних процесів. 2. Порівняно незначна вартість закладних робіт.	1. Пустотність закладного масиву та вірогідність деформацій. 2. Значний коефіцієнт фільтрації закладного масиву. 3. Утилізація переважно одного виду промислових відходів.
Гідравлічне	1. Висока швидкість заповнення пустот. 2. Відсутність пилоутворення при транспортуванні матеріалу. 3. Рівномірність заповнення виробленого простору.	1. Висока вартість закладних робіт. 2. Незначна міцність. 3. Відсутність монолітності масиву. 4. Високі вимоги до гранулометричних характеристик матеріалу та відведення води. 5. Утилізація переважно одного виду промислових відходів.
Твердіюче	1. Висока якість та міцність закладного масиву. 2. Монолітність закладного масиву. 3. Низький коефіцієнт фільтрації. 4. Мінімальна усадка закладного масиву. 5. Відсутність пилоутворення при транспортуванні матеріалу. 6. Утилізація декількох видів промислових відходів.	1. Висока вартість закладних робіт. 2. Складність виконання технологічних процесів. 3. Ймовірність схоплювання суміші при технологічних перервах. 4. Сегрегація крупних фракцій закладного матеріалу.
Ін'єкційне	1. Різноманіття умов застосування. 2. Подача в'язучого розчину у необхідну область сипкого масиву. 3. Використання кількох компонентів.	1. Висока вартість закладних робіт. 2. Наявність пустот закладного масиву. 3. Нерівномірність розподілу в'язучого матеріалу. 4. Обмежена міцність.

Твердіюче закладання складається з в'язучого компонента, інертного компонента, мікронаповнювача (за необхідністю) та води. При змішуванні компонентів з водою відбувається реакція гідратації в'язучої речовини, що призводить до твердіння й утворення штучного монолітного каменю. Вода окрім забезпечення процесу гідратації виконує функцію транспортування компонентів до місця укладання. Зазначені переваги твердіючого закладання дозволили його ефективно й успішно використовувати на деяких гірничодобувних підприємствах України.

Найбільшого багаторічного досвіду при розробці залізних руд Білозерського родовища із закладанням пустот твердіючими сумішами здобуло ПрАТ «Запорізький залізорудний комбінат» [16]. Щорічно для закладання підземних пустот на поверхневому закладному комплексі готується 1,0-1,2 млн м³ закладної суміші. Завдяки застосуванню твердіючого закладання в підземних пустотах щорічно утилізується в якості закладних матеріалів близько 1,8 млн т промислових відходів, з яких 850 тис. т доменних гранульованих шлаків, 330 тис. т відходів флюсового виробництва, 220 тис. т доменних відвальних шлаків, 350 тис. т відвальних шахтних порід. При таких об'ємах закладних матеріалів очевидно, що потрібна достатня за запасами мінерально-сировинна база.

Станом на сьогодні видобуто близько 150 млн т залізної руди, об'єм утворених та заповнених пустот при щільності руди $3,9 \text{ т/м}^3$ складає близько 40 млн м^3 .

Також твердіюче закладання тривалий час застосовувалось на шахті «Смолінська» з видобутку уранових руд, що входить до складу ДП «Східний гірничо-збагачувальний комбінат». На сьогодні шахта готується до закриття. Щорічно утилізувалось до 150 тис. т доменних гранульованих шлаків та до 375 тис. т дроблених гірських порід. З піщаного кар'єру, що розташовувався поруч із шахтою, додатково поставлялось до 350 тис. т піску в якості додаткового інертного наповнювача. Об'єм закладних робіт становив $0,5 \text{ млн м}^3/\text{рік}$ [17].

Для можливості реалізації заповнення техногенних пустот твердіючим закладанням є важливим складання наступних основних факторів:

1. *Наявність достатніх запасів мінерально-сировинної бази закладних матеріалів у безпосередній близькості до об'єкта закладання.* При прийнятті рішення щодо закладання техногенних пустот твердіючим закладанням в регіоні повинні бути достатні запаси потенційних закладних матеріалів, бажано промислових відходів, для їх використання як в'язучих та інертних матеріалів у процесі технології закладання. При цьому відходи за фізичними та хімічними властивостями повинні бути придатними для їх використання в якості в'язучих й інертних матеріалів і бути безпечними для довкілля.

2. *Прогнозні об'єми закладних матеріалів більші за об'єм утворених пустот.* Як правило, техногенні пустоти, що утворюються при видобутку корисних копалин, характеризуються значними об'ємами, які оцінюються в мільйони кубометрів. Потрібно враховувати більший об'єм закладного матеріалу з урахуванням можливих процесів його ущільнення у процесі закладання пустот, ніж безпосередній об'єм утворених пустот.

3. *Прийнятна вартість закладних матеріалів.* Важливим аспектом, окрім достатніх об'ємів забезпечення мінерально-сировинною базою логістично привабливих потенційних закладних матеріалів, є їх вартість. Для приготування закладних сумішей можуть бути використані як матеріали природних родовищ (наприклад, пісок, вапняки), так і промислові відходи природно-техногенного походження. Проте, вартість промислових відходів на порядок нижча, ніж матеріалів природних родовищ, адже підприємство-накопичувач відходів зацікавлене в їх утилізації, що позитивно вплине на формування ціни закупівлі певного виду відходів.

На території України накопичено багато різновидів промислових відходів внаслідок економічної діяльності підприємств різних галузей економіки. Серед безлічі варіантів накопичених промислових відходів для застосування у твердіючому закладанні мають певні їх види. Для розвитку напрямів закладання техногенних пустот доцільно виконати аналіз закордонного досвіду та виявити найбільш придатні й широко розповсюджені види закладних матеріалів, що застосовуються на практиці.

Вивчався досвід використання закладних матеріалів на рудниках низки країн світу, де набуло розповсюдження закладання виробленого простору підземних пустот. Проаналізовано склади закладних сумішей 25 рудників та шахт різних країн, таких як Китай, Австралія, США, Канада, Швеція, Україна та Казахстан для виявлення найбільш пріоритетних видів матеріалів природного та техногенного походження, що можуть використовуватись як компоненти для закладання техногенних пустот. У Китаї виявлено найбільше застосування технологій закладання на шахтах та рудниках [18, 19], що пов'язано зі значною щільністю населення та об'єктів інфраструктури, де небезпека просідання земної поверхні може призвести до катастрофічних наслідків. На Рисунку 1 наведено діаграми найбільш розповсюджених закладних матеріалів, що використовуються як в'язучий матеріал та інертний заповнювач.

Аналіз Рисунка 1а показує, що пріоритетними матеріалами для в'язучих речовин слугують матеріали техногенного походження, якими є цемент, мелені доменні

гранульовані шлаки та зола-виносу. Розповсюдження інертних матеріалів (Рис. 16) показує, що розглянуті рудники та шахти у 85% випадків використовують в пріоритеті матеріали техногенного походження, що викликано близькістю місць їх накопичення до родовища, що розробляється, та відповідністю фізичних і хімічних властивостей встановленим вимогам. Використання природних матеріалів спостерігається у випадках, коли поблизу родовища відсутні накопичення техногенних відходів.

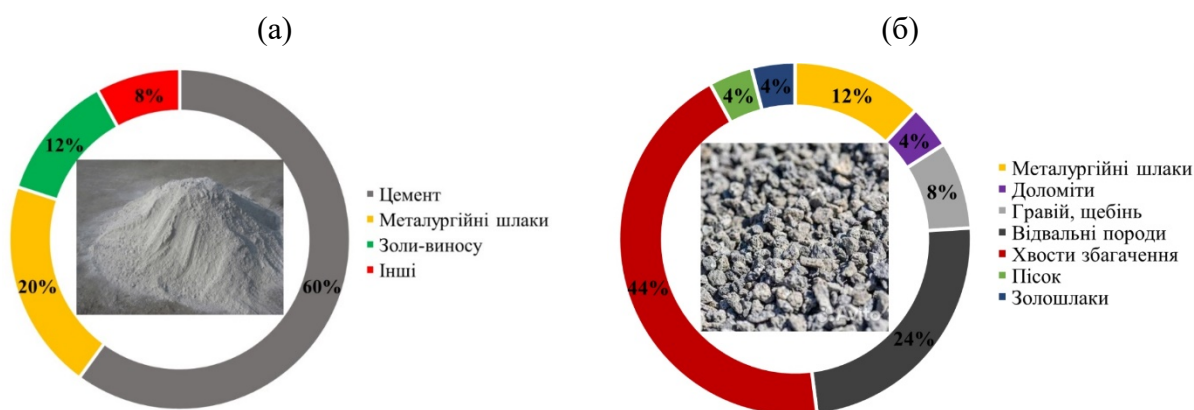


Рисунок 1 – Діаграми розповсюдження закладних матеріалів при твердіючому закладанні підземних пустот: (а) в'яжучі матеріали; (б) інертні наповнювачі

Отже, для розвитку напрямів закладання пустот при розробці родовищ корисних копалин в Україні найбільш пріоритетними матеріалами для використання в якості в'яжучих речовин слід розглядати відходи техногенного походження – мелені металургійні шлаки та золи-виносу; як інертні заповнювачі – відвальні породи, хвости збагачення, металургійні шлаки, золошлаки. Використання таких матеріалів як цемент, гравій, щебінь, пісок характеризуватимуться витратністю і рекомендується їх розглядати як часткову заміну вищезазначених матеріалів.

Вищевиділена група природно-техногенних матеріалів в значних об'ємах присутня у провідних промислових регіонах, де розвинена гірничодобувна, переробна, енергетична та металургійні галузі. Металургійні шлаки, золи-виносу, відвальні породи, хвости збагачення, золошлаки відносяться за класифікацією відходів за небезпечністю до IV класу небезпеки і є малонебезпечними, що підвищує їх цінність для закладання техногенних пустот. Перелік пріоритетних потенційних закладних матеріалів техногенних пустот та джерел їх утворення для гірничодобувних підприємств України наведено у Таблиці 2.

На прикладі регіона-лідера накопичення промислових відходів Дніпропетровської області вивчено основні типи природних та техногенних промислових відходів, що потенційно можуть розглядатись як закладні матеріали. Тим більше, що поруч розташовані шахти та діючі й закриті кар'єри. Вивчалися дані реєстру місць видалення відходів (МВВ), регіональної доповіді про стан довкілля області та екологічний паспорт однієї області щодо накопичення промислових відходів станом на 2019 рік [20, 21]. На території області виявлені потужні накопичення техногенних відходів: 33 крупних відвали розкривних і шахтних порід, 31 хвостовий та шламосховища збагачення різних руд, 9 відвалів металургійних шлаків та 3 золошлаковідвали. Комплексний аналіз параметрів основних накопичень виявлених природних та техногенних відходів показав, що в результаті діяльності підприємств гірничо-металургійного, металургійного та енергетичного комплексів на території Дніпропетровської області їх накопичено

близько 15 млрд т, розподіл яких наведено на Рисунку 2. Займані площі складають близько 16 тис. га, а їх розділення наведено на Рисунку 3.

Таблиця 2 – Перелік пріоритетних матеріалів природного та техногенного походження, перспективних до використання як закладних компонентів

Потенційні закладні матеріали	Походження	Клас небезпеки відходів	Джерело утворення	Місце утворення
Розкривні та шахтні породи	природне	IV	Шахти та кар'єри	Породний відвал
Металургійні шлаки	техногенне	IV	Металургійні комбінати	Шлаковий відвал
Хвости і шлами збагачення	техногенне	IV	Гірничо-збагачувальні комбінати	Хвостосховище
Золошлаки та суха зола-виносу	техногенне	IV	Теплові електростанції	Золошлаковідвал

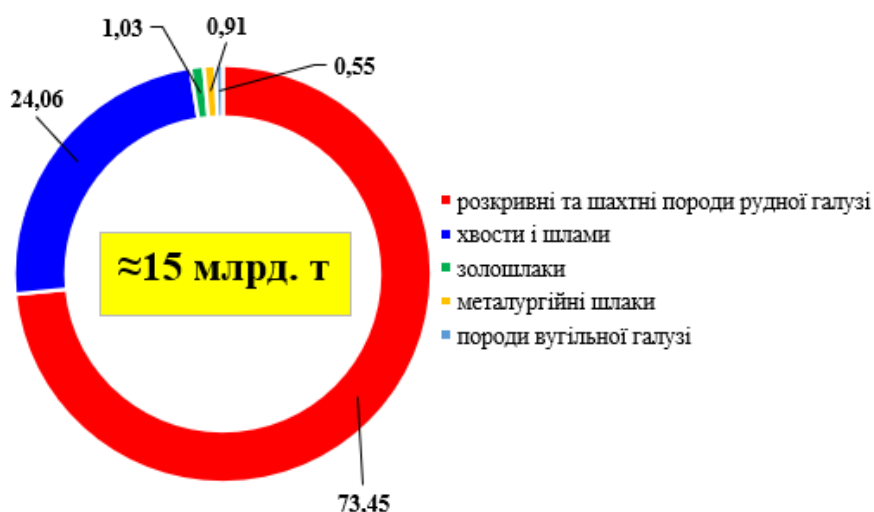


Рисунок 2 – Розподіл накопичених відходів природного та техногенного походження за об'ємами накопичення (млн т)



Рисунок 3 – Розподіл накопичених відходів природного та техногенного походження за зайнятими площами (га)

Розподіл за видами формування (насипні, наливні) всіх відходів становить: 70,7 і 29,3% – за обсягом накопичень; 10,4 і 89,6% – відповідно за займаною площею. Аналіз Рисуноків 2 і 3 дозволяє зробити висновок, що передові позиції за об'ємами накопичення та зайнятими площами займають хвостові та шламосховища й розкривні та шахтні породи.

Таким чином, тільки на прикладі Дніпропетровської області виявлено колосальні запаси потенційних закладних матеріалів, що можуть бути використані для закладання техногенних пустот. Вивчення видів відходів природного та техногенного походження й параметрів їх накопичення є важливим кроком для початку розвитку ефективних напрямів закладання техногенних пустот і подальшого відновлення порушених територій.

Висновки. В роботі на підставі проведеного теоретичного аналізу, узагальнення та систематизації інформації за темою досліджень отримані наступні результати:

1. Аналіз проведених досліджень показав, що, незважаючи на розповсюджене різноманіття різних видів промислових відходів, їх можливому використанню як потенційних закладних матеріалів для заповнення техногенних пустот саме для територій України не приділялось уваги. Відсутня інформаційно-аналітична база потенційних закладних матеріалів.

2. Проаналізовані основні переваги та недоліки існуючих в гірничій практиці видів закладання техногенних пустот. Зазначено, що для відновлення порушених гірничими роботами територій земної поверхні найбільш перспективним є застосування твердіючого закладання, адже земна поверхня, що підлягає відновленню під різноспрямоване використання та закладний масив, розташований під нею, потребують геотехнічної стійкості та надійності.

3. На підставі аналізу досвіду застосування закладних робіт на світових і вітчизняних шахтах визначено, що найбільш пріоритетними матеріалами для використання в якості в'язучих речовин слід розглядати відходи техногенного походження – мелені металургійні шлаки та золи-виносу, як інертних заповнювачів – відвальні породи, хвости збагачення, металургійні шлаки, золошлаки. Використання таких матеріалів як цемент, гравій, щебінь, пісок характеризуватимуться витратністю і рекомендується їх розглядати як часткову заміну вищезазначених матеріалів. Отже, для здійснення закладних робіт при видобуванні корисних копалин слід звертати увагу на наявність мінерально-сировинної бази.

4. На прикладі Дніпропетровської області як регіона-лідера з накопичення промислових відходів із урахуванням поширеного досвіду використання закладних матеріалів окремо за видами вивчено об'єми накопичення та займані площі відходів, що потенційно можуть розглядатись як закладні матеріали. Об'єми накопичення складають близько 15 млрд т, а займані площі – 16 тис. га.

Вдячність. Робота виконана в рамках наукових досліджень за грантовим проєктом 2021.01/0306 від Національного фонду досліджень України.

Список літератури

1. Guo, D., Hou, H., Long, J., Guo, X., & Xu, H. (2022). Underestimated environmental benefits of tailings resource utilization: Evidence from a life cycle perspective. *Environmental Impact Assessment Review*, (96), 106832. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106832>
2. Tibane, L.V., & Mamba, D. (2022). Ecological risk of trace metals in soil from gold mining region in South Africa. *Journal of Hazardous Materials Advances*, (7), 100118. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100118>
3. Batur, M., & Babii, K. (2022). Spatial assessment of air pollution due to mining and industrial activities: a case study of Kryvyi Rih, Ukraine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012004>

4. Кваша, Т., Паладченко, О., & Молчанова, І. (2020). *Перспективні світові наукові та технологічні напрями досліджень у сфері «Відходи»*. Київ: УкрІНТЕІ, 103 с. <https://doi.org/10.35668/978-966-479-113-4>
5. Lèbre, É., Corder, G.D., & Golev, A. (2017). Sustainable practices in the management of mining waste: a focus on the mineral resource. *Minerals Engineering*, (107), 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.12.004>
6. Liu, J., Yu, Q., Zuo, Z., Yang, F., Duan, W., & Qin, Q. (2017). Blast furnace slag obtained from dry granulation method as a component in slag cement. *Construction and Building Materials*, (131), 381-387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.040>
7. Li, M., Zhang, J., Li, A., & Zhou, N. (2020). Reutilisation of coal gangue and fly ash as underground backfill materials for surface subsidence control. *Journal of Cleaner Production*, (254), 120113. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120113>
8. Bai, E., Guo, W., Tan, Y., & Yang, D. (2018). The analysis and application of granular backfill material to reduce surface subsidence in China's northwest coal mining area. *PLOS ONE*, 13(7), e0201112. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201112>
9. Hunko, L., & Berezhna, K. (2021). Problems regarding treatment of disturbed land in Ukraine. *Zemleustriy, Kadastr i Monitoring Zemel'*, (2), 1-14. <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2021.02.06>
10. Негрій, С.Г. (2020). Дослідження особливостей процесу передачі навантажень в конструкції з рядової породи. *Технічна інженерія*, 2(86), 171-178. [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-171-178](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-171-178)
11. Малашкевич, Д.С. (2021). *Розробка технологічних схем селективного відпрацювання пластів із залишенням породи у виробленому просторі (на прикладі шахт Західного Донбасу)*. Дніпро: ЛізуновПрес, 270 с.
12. Хорольський, А.А. (2022). Обґрунтування обсягів робіт із закладки виробленого простору твердіючими сумішами на основі відходів гірничого виробництва. *Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології*, 162-165.
13. Кулиш, С.А., Короленко, М.К., & Карапа, І.А. (2016). Исследования и испытания транспортабельных свойств закладочных смесей. *Збірник наукових праць Науково-дослідного гірничорудного інституту Державного вищого навчального закладу «Криворізький національний університет»*, (56), 205-209.
14. Кузьменко, А.М., Петлєваний, М.В., & Усатий, В.Ю. (2015). *Твердеющая закладка при отработке рудных залежей в сложных горно-геологических условиях*. Днепропетровск: Национальный горный университет, 140 с.
15. Письменний, С.В., & Білюк, В.О. (2021). Дослідження складу твердіючих сумішей при відпрацюванні покладів камерними системами розробки з закладкою. *Розвиток промисловості та суспільства*, 7.
16. Bazaluk, O., Petlovanyi, M., Lozynskyi, V., Zubko, S., Sai, K., & Saik, P. (2021). Sustainable underground iron ore mining in Ukraine with backfilling worked-out area. *Sustainability*, 13(2), 834. <https://doi.org/10.3390/su13020834>
17. Ляшенко, В.І., Дудченко, А.Х., & Ткаченко, А.А. (2008). Научно-технические основы природоохранных технологий подземной разработки урановых месторождений. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*, (4), 34-42.
18. Chen, S., Yin, D., Cao, F., Liu, Y., & Ren, K. (2015). An overview of integrated surface subsidence-reducing technology in mining areas of China. *Natural Hazards*, 81(2), 1129-1145. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2123-x>
19. Zhang, J., Li, M., Taheri, A., Zhang, W., Wu, Z., & Song, W. (2019). Properties and application of backfill materials in coal mines in China. *Minerals*, 9(1), 53. <https://doi.org/10.3390/min9010053>
20. *Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Дніпропетровській області за 2019 рік*. (2020). Дніпро: Департамент екології та природних ресурсів Дніпропетровської облдержадміністрації, 320 с.
21. *Екологічний паспорт Дніпропетровської області за 2019 рік*. (2020). Дніпро: Дніпропетровська облдержадміністрація, 233 с.

References

1. Guo, D., Hou, H., Long, J., Guo, X., & Xu, H. (2022). Underestimated environmental benefits of tailings resource utilization: Evidence from a life cycle perspective. *Environmental Impact Assessment Review*, (96), 106832. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106832>
2. Tibane, L.V., & Mamba, D. (2022). Ecological risk of trace metals in soil from gold mining region in South Africa. *Journal of Hazardous Materials Advances*, (7), 100118. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100118>

3. Batur, M., & Babii, K. (2022). Spatial assessment of air pollution due to mining and industrial activities: a case study of Kryvyi Rih, Ukraine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 970(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012004>
4. Kvasha, T., Paladchenko, O., & Molchanova, I. (2020). *Promising global scientific and technological directions of research in the field of "Waste"* [Perspektyvni svitovi naukovi ta tekhnologichni napriamy doslidzhen u sferi "Vidkhody"]. Kyiv: UkrINTEI, 103 p. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.35668/978-966-479-113-4>
5. Lèbre, É., Corder, G.D., & Golev, A. (2017). Sustainable practices in the management of mining waste: a focus on the mineral resource. *Minerals Engineering*, (107), 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.12.004>
6. Liu, J., Yu, Q., Zuo, Z., Yang, F., Duan, W., & Qin, Q. (2017). Blast furnace slag obtained from dry granulation method as a component in slag cement. *Construction and Building Materials*, (131), 381-387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.040>
7. Li, M., Zhang, J., Li, A., & Zhou, N. (2020). Reutilisation of coal gangue and fly ash as underground backfill materials for surface subsidence control. *Journal of Cleaner Production*, (254), 120113. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120113>
8. Bai, E., Guo, W., Tan, Y., & Yang, D. (2018). The analysis and application of granular backfill material to reduce surface subsidence in China's northwest coal mining area. *PLOS ONE*, 13(7), e0201112. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201112>
9. Hunko, L., & Berezhna, K. (2021). Problems regarding treatment of disturbed land in Ukraine. *Zemleustriy, Kadastr i Monitoring Zemel'*, (2), 1-14. <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2021.02.06>
10. Nehrii, S.H. (2020). Study of the peculiarities of the load transfer process in structures made of ordinary rock [Doslidzhennia osoblyvosti protsesu peredachi navantazhen v konstruktsii z riadovoi porody]. *Tekhnichna inzheneriia*, 2(86), 171-178. (in Ukrainian). [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-171-178](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-171-178)
11. Malashkevych, D.S. (2021). *The development of technological schemes for the selective working out of layers with the rock remaining in the produced space (on the example of the mines of Western Donbass)* [Rozrobka tekhnologichnykh skhem selektyvnoho vidpratsiuvannia plastiv iz zalyshenniam porody u vyroblenomomu prostori (na prykladi shakht Zakhidnoho Donbasu)]. Dnipro: LizunovPres, 270 p. (in Ukrainian).
12. Khorolskyi, A.A. (2022). Justification of the scope of work on paving the created space with hardening mixtures based on mining waste [Obgruntuvannia obsiahiv robit iz zakladky vyroblenoho prostoru tverdiuchymy sumishamy na osnovi vidkhodiv hirnychoho vyrobnytstva]. *Povodzhennia z vidkhodamy v Ukraini: zakonodavstvo, ekonomika, tekhnolohii*, 162-165. (in Ukrainian).
13. Kulish, S.A., Korolenko, M.K., & Karapa, Y.A. (2016). Research and testing of the transportable properties of filling mixtures [Issledovaniya i ispytaniya transportabelnykh svoystv zakladochnykh smesey]. *Zbirnyk naukovykh prats Naukovo-doslidnoho hirnychorudnoho instytutu Derzhavnoho vyshchoho navchalnoho zakladu "Kryvorizkyi natsionalnyi universytet"*, (56), 205-209. (in Russian).
14. Kuzmenko, A.M., Petlevanyy, M.V., & Usatyy, V.Yu. (2015). *Hardening backfill when mining steep ore deposits in difficult mining and geological conditions* [Tverdeyushchaya zakladka pri otrabotke rudnykh krutykh zalezhey v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh]. Dnepropetrovsk: Natsionalnyy gornyy universitet, 140 p. (in Russian).
15. Pysmennyi, S.V., & Biliuk, V.O. (2021). Study of the composition of hardening mixtures during the development of deposits by chamber development systems with a backfill [Doslidzhennia skladu tverdiuchykh sumishei pry vidpratsiuvanni pokladiv kamernymy systemamy rozrobky z zakladkoiu]. *Rozvytok promyslovosti ta suspilstva*, 7. (in Ukrainian).
16. Bazaluk, O., Petlovanyi, M., Lozynskyi, V., Zubko, S., Sai, K., & Saik, P. (2021). Sustainable underground iron ore mining in Ukraine with backfilling worked-out area. *Sustainability*, 13(2), 834. <https://doi.org/10.3390/su13020834>
17. Lyashenko, V.I., Dudchenko, A.Kh., & Tkachenko, A.A. (2008). Scientific and technical foundations of environmental technologies for underground mining of uranium deposits [Nauchno-tekhnicheskiye osnovy prirodookhrannykh tekhnologiy podzemnoy razrabotki uranovykh mestorozhdeniy]. *Ekolohiia dovyklytia ta bezpeka zhyttiediialnosti*, (4), 34-42. (in Russian).
18. Chen, S., Yin, D., Cao, F., Liu, Y., & Ren, K. (2015). An overview of integrated surface subsidence-reducing technology in mining areas of China. *Natural Hazards*, 81(2), 1129-1145. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2123-x>
19. Zhang, J., Li, M., Taheri, A., Zhang, W., Wu, Z., & Song, W. (2019). Properties and application of backfill materials in coal mines in China. *Minerals*, 9(1), 53. <https://doi.org/10.3390/min9010053>
20. *Regional report on the state of the natural environment in the Dnepropetrovsk region for 2019* [Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha v Dnepropetrovskii oblasti za 2019 rik] (2020). Dnipro: Departament ekolohii ta pryrodnykh resursiv Dnepropetrovskoi oblderzhadministratsii, 320 p. (in Ukrainian).

21. *Environmental passport of the Dnipropetrovsk region for 2019* [Ekolohichnyi pasport Dnipropetrovskoi oblasti za 2019 rik]. (2020). Dnipro: Dnipropetrovska obladerzh-administratsiia, 233 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції 07.06.2023

M. Petlovanyi, K. Sai, O. Borysovska, A. Khorolskyi

ANALYSIS OF THE USE OF INDUSTRIAL WASTE FOR THE FORMATION OF BACKFILL MASS IN MAN-MADE VOIDS

Purpose. The objective of this study is to examine and compile a list of the most common types of backfill materials based on the analysis of successful backfilling practices in the development of technogenic cavities in mineral deposits in Ukraine.

Methodology. The study employed theoretical analysis, information systematization, and data synthesis related to the research problem. It investigated the characteristics of different backfilling methods and the experience of using backfill materials in various countries where backfilling practices have been implemented. The study relied on data from government statistics, waste disposal sites, regional environmental reports, and the environmental passport of a leading region in industrial waste accumulation.

Results. The study determined that insufficient attention has been given to the analysis and study of various types of industrial waste and their potential utilization as backfill materials for filling technogenic cavities in Ukraine. The main advantages and disadvantages of existing backfilling methods commonly used in mining practice have been analyzed. Among these methods, solidifying backfilling was found to be the most promising in terms of geotechnical stability and reliability of the artificial mass. Based on the analysis of successful backfilling practices, a priority list of the most common types of backfill materials has been made. Additionally, the study examined the volumes of waste accumulation and occupied areas for different types of backfill materials using a leading region as an example.

Scientific novelty. The study has identified the most practical and characteristic types of natural and technogenic backfill materials that can be considered for the development of backfilling practices for technogenic cavities in Ukraine.

Practical significance. The study of natural and technogenic waste materials, their accumulation parameters, and characteristics is an important step towards the development of effective backfilling practices for technogenic cavities and subsequent restoration of disturbed territories.

Keywords: disturbed territories, technogenic cavities, industrial waste, backfilling, backfill material.

Відомості про авторів

Петльований Михайло Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна; e-mail: petlovanyi.m.v@nmu.one

Сай Катерина Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна; e-mail: sai.k.s@nmu.one

Борисовська Олена Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна; e-mail: borysovska.o.o@nmu.one

Хорольський Андрій Олександрович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу управління станом гірничого масиву Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна; e-mail: andreykh918@gmail.com

Mykhailo Petlovanyi – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mining Engineering and Education, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine; e-mail: petlovanyi.m.v@nmu.one

Kateryna Sai – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mining Engineering and Education, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine; e-mail: sai.k.s@nmu.one

Olena Borysovska – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Ecology and Technologies of Environmental Protection, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine; e-mail: borysovska.o.o@nmu.one

Andrii Khorolskyi – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Department of Rock Mass Condition Control, Branch for Physics of Mining Processes of the Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine; e-mail: andreykh918@gmail.com

УДК 351.862

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-127-133>

Савченко А.М., Стефанович І.С., Стефанович П.І.

ЕКСПЕРТНА ОЦІНКА ВИРОБНИЧОГО ТА ПРОФЕСІЙНОГО РИЗИКУ

Анотація. В короткій формі вказано, що під професійним ризиком розуміється ризик, який охоплює кожну з усіх небезпек, що можуть існувати у компанії під час розвитку звичайної діяльності, що профілактика цих ризиків складається з набору планів запобігання та заходів, які проводяться на заводах, фабриках, в компаніях для запобігання ризикових ситуацій. Таким чином потрібно усунути або зменшити небезпеку чи ризик, який діяльність представляє для працівника.

Виробничий ризик показаний, що він визначається як ризик, пов'язаний з виробництвом продукції, товарів, послуг із здійсненням будь-яких видів виробничої діяльності, в процесі якої підприємці стикаються з проблемами неадекватного використання сировини, підвищення собівартості, збільшення втрат робочого часу, неефективним використанням нових методів виробництва. Вказані основні причини виробничого ризику компанії, виробника продукції.

В короткій формі дано роз'яснення якісної і кількісної оцінки ризиків, вимоги до експертної комісії і самих експертів.

Існує багато різних методів оцінки виробничих та професійних ризиків. Серед них навряд чи можна виділити деякий універсальний метод, який підійшов би усім організаціям. Тому, вибір способу оцінки ризику фахівці роблять самостійно.

У цій статті розглядаються можливості застосування методів експертної оцінки в аналізі виробничих та професійних ризиків. Коротко викладені Методи експертної оцінки які можна розділити на дві групи: індивідуальні і колективні, а також показано, що методи експертних оцінок це спосіб прогнозування та оцінки майбутніх результатів, дій на основі прогнозів фахівців.

Ключові слова. Якість, кількість, ризик, ймовірність, експертна оцінка, охорона праці, досвід, метод.

Метою роботи є розвиток теорії і методів комплексного аналізу рівня небезпеки складних технічних систем на основі експертної оцінки ризиків для підвищення рівня техногенної безпеки небезпечних виробничих об'єктів.

Вступ. Сучасна модель системи управління охороною праці, збереженню професійного здоров'я та безпеки на підприємствах організована згідно зі стандартом OHSAS і основана на методології: планувати – виконувати – перевіряти – діяти. Реалізація даної методології передбачає розробку конкретних методик, спрямованих на виявлення і зниження виробничих та професійних ризиків.

Згідно з ДСТУ 2293-99 «ризик – це ймовірність заподіяння шкоди з урахуванням її тяжкості». Тому у ряді країн і у Україні різко зростає актуальність вивчення питань виробничих та професійних ризиків. Це обумовлено, по-перше, необхідністю активізації профілактичних заходів, спрямованих на збереження здоров'я працівників, по-друге, правовими наслідками, пов'язаними з урахуванням рівня виробничого ризику при оцінці якості управління охороною праці в даній виробничій системі.

Основна частина. Професійний ризик пов'язаний з порушенням здоров'я людини в результаті несприятливого впливу професійних факторів з урахуванням важкості наслідків, що виникають. Таким чином це втрата спроможності до повноцінного існування і вона пов'язана з тимчасовою або постійною непрацездатністю через професійне захворювання або виробничу травму. Тобто він базується на сукупності нещасних випадків, небезпек, ризиків та ситуації вразливості працівника в навколишньому середовищі, яке здійснює його діяльність або робота.

Виробничий ризик це ризик які може бути в непередбаченій ситуації і можуть негативно позначитися на результатах діяльності заводу, компанії, підприємства. Вони

можуть виникати при здійсненні самого виробничого процесу так і при проведенні лабораторних розробок, випробувань, в процесі виробництва і реалізації продукції, а також при транспортуванні і обслуговуванні різних виробничих об'єктів. Таким чином-виробничі ризики – це різні непередбачувані, а можливо, і передбачувані несприятливі обставини, це ймовірність ушкодження здоров'я працівника під час виконання ним трудових обов'язків.

Основними причинами виробничого ризику можливо назвати наступне:

- скорочення обсягів виробництва й збуту продукції порівняно з плановим рівнем через перебої у забезпеченні матеріальними ресурсами, недостатню забезпеченість робочою силою необхідної кваліфікації, простої обладнання, втрати робочого часу, зниження продуктивності праці, підвищення відсотка браку;
- зниження цін реалізації продукції та послуг порівняно з плановим рівнем через їх недостатню якість, несприятливі зміни ринкової кон'юнктури;
- зростання питомих витрат матеріальних, енергетичних, паливних ресурсів, витрат на транспортування, торговельних, накладних та інших побічних витрат;
- зростання фонду оплати праці через перевищення чисельності працюючих;
- зростання податкових платежів та інших відрахувань внаслідок зміни ставок оподаткування;
- значний фізичний та моральний знос основних фондів, виробничого обладнання.

Фундаментальною основою зниження (усунення) виробничих та професійних ризиків є всебічний аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які є головними причинами виникнення реальних, а також існування потенційних небезпек на підприємстві.

Тому, особливої уваги заслуговує процедура аналізу виробничих та професійних ризиків, що включає ідентифікацію і оцінку ризиків. І цю процедуру може робити різними методами і схемами.

Ризик можна оцінити якісно або кількісно. Якісно оцінений ризик характеризує походження потенційної небезпеки і показує самі небезпеки. Якщо при оцінці ризику вводиться система балів, яка більш менш суб'єктивно (чисельно) оцінює можливість події і наслідку його небезпеки, то можна говорити про напівкількісний метод оцінки. Напівкількісний метод зазвичай доповнює якісний аналіз. Його використовують також в початковій стадії кількісного аналізу.

Кількісна (чисельна) оцінка ризику по відношенню до якісної має ряд переваг : по-перше, дає основу об'єктивно судити про міру загрози; по-друге, дає можливість розробити ту, що відповідає мірі ризику систему управління виробництвом; по-третє, тільки чисельно оцінені ризики можна порівняти з нормативними вимогами, а також між собою, незважаючи на відмінну природу їх походження.

На практиці найчастіше застосовуються якісні методи, бо їх рахують простими. Яскравим прикладом якісного аналізу виробничих та професійних ризиків, являється метод, ґрунтований на застосуванні діаграм в системі координат вірогідність події (наслідку події), особливо коли відсутні необхідні дані або їх дуже мало. Такі діаграми представляються у вигляді матриць, які показують залежність рівня (категорії) ризику від співвідношення вірогідності події і тяжкості його наслідків. Якщо якісна оцінка ризику показує вірогідність і небезпеку наслідків, то необхідні параметри визначаються за системою балів або пунктів. Цей метод оцінки ризиків широко використовується в Україні в практиці розробки і функціонування систем управління охороною праці [1]. Згідно з цим методом оцінку ризиків в організаціях проводить, як правило, сам керівник підприємства, часто із залученням незалежних експертів, від кваліфікації і досвіду яких залежить якість і повнота виконаної роботи. Очевидним недоліком цього методу є його абсолютна суб'єктивність: експерт, ґрунтуючись тільки на своїх знаннях, досвіді,

відчуттях, вирішує, до якої категорії віднести вірогідність і тяжкість небажаних наслідків. Величина ризику (R) визначається як твір вірогідності (P) події на його наслідки (S) і рахують за формулою: $R = P \times S$. Зрозуміло, що різні експерти оцінюватимуть одну і ту ж ситуацію по-різному, і можливо, що один і той же експерт через деякий час оцінить той же ризик на тому ж робочому місці по-іншому.

Тоді є питання про коректність вживаних експертних методів оцінки виробничих та професійних ризиків: по-перше, експерти спеціально не підбираються, більше того, часто є зацікавленими особами, що найсуворіше заборонено при проведенні експертної оцінки; по-друге, оцінка проводиться, як правило, у рамках одного туру, що не допускає обговорення і узгодження оцінок; по-третє, відсутня відповідна математична обробка результатів. Щоб розібратися в цьому питанні, зупинимось детальніше на методах експертної оцінки і, зокрема, можливості застосування їх для оцінки виробничих та професійних ризиків.

Сьогодні стали невід'ємною частиною науково-практичної діяльності *Методи експертної оцінки* виробничих та професійних ризиків. А чому? Бо для вирішення поставлених завдань, ухвалення обґрунтованих і зважених рішень необхідно спиратися на професійний досвід, знання і інтуїцію фахівців (експертів), що часто є єдиним і незамінним засобом для досягнення поставленої мети.

Методи експертної оцінки можна розділити на дві групи: *індивідуальні і колективні*.

Індивідуальні методи експертної оцінки в основному застосовують для оцінки добре відомого об'єкту за відпрацьованими і перевіреними на практиці критеріями. Поняття індивідуальної оцінки тут використовується в тому сенсі, що кожен учасник експертної комісії робить оцінку незалежно від інших членів комісії. Аудит такого типу більшою чи меншою мірою є рутинною роботою, яка не вимагає глибоких знань про суть аналізованого ризику. У зв'язку з цим індивідуальна оцінка експертів допустима у випадках, коли необхідно зробити малозначні висновки або прийняти маловажні рішення. Для керівництва підприємством така оцінка може бути застосовна у випадках, коли проводять перевірку безпеки праці, дотримання норм пожежної безпеки і тому подібне. Оцінка експертів в таких перевірках обмежується виведеннями "є" - "ні" або "відповідає" - "не відповідає", які вказують в задалегідь розробленому опитному листі.

Колективні методи експертної оцінки, які характеризуються відкритим обговоренням проблем і оцінок і колективним ухваленням рішення є найбільш об'єктивними при оцінці виробничого і професійних ризиків. У цьому сенсі найбільш прийнятним є метод Делфи, відповідно до якого процедура оцінки розбивається на декілька турів, а також проводиться узгодження оцінок. Але, цей метод є більше трудомістким, оскільки процедура його проведення включає декілька етапів: - формулювання мети експертизи і розробка процедури опитування; - відбір і формування групи експертів; - проведення опитування; - аналіз і обробка інформації, отриманої від експертів; - ухвалення рішення відповідно до результатів.

При використанні цього методу експерти спеціально підбираються, тобто враховується рівень їх кваліфікації (професійна освіта), стаж роботи, спеціальність і досвід практичної роботи і вони задалегідь надають інформацію про себе у формі "анкети самооцінки" за наступними характеристиками: компетентність; зацікавленість в участі в роботі експертної комісії; діловитість; об'єктивність. У разі виконання оцінки виробничих та професійних ризиків компетентність повинна включати: професійна освіта, у тому числі в області охорони праці; досвід розробки нормативної, технічної і методичної документації в області охорони праці; підготовку і перепідготовку в області охорони праці; досвід практичної роботи в області охорони праці та ін.

Зацікавленість експерта в роботі експертної комісії залежить від його індивідуальних особливостей, завантаженості основною роботою, цілей оцінки і можливостей використання результатів у своїй практичній діяльності. Вона повинна включати: участь у функціонуванні системи управління охороною праці в організації; участь в наукових семінарах і конференціях з охорони праці; наявність наукових робіт, публікацій в області охорони праці.

Діловитість експерта включає його зібраність, оперативність в роботі, здатність швидко перемикається з однієї проблеми на іншу, уміння працювати з людьми при рішенні завдань в конфліктній ситуації, здатність протистояти думці більшості при упевненості у своїй правоті, уміння чітко формулювати свої думки. Для цілей оцінки виробничих та професійних ризиків, як правило, буває досвід участі в проведенні наглядово-контрольних заходів, експертиз в області охорони праці.

Об'єктивність (неупередженість) експерта полягає у винесенні ним суджень, що характеризують дійсний стан даної проблеми, зокрема, оцінки виробничих та професійних ризиків. Упередженості бути не повинно. Слід враховувати чинник можливої суб'єктивної зацікавленості експертів зрештою. Експерт не має бути пов'язаний з оцінюваним об'єктом за ознаками участі в трудовому процесі. Він має бути неупереджений (відсутня матеріальна зацікавленість в діяльності на аналізованому робітнику місці).

Окрім експертної групи, формується робоча група, яка організовує і проводить засідання експертних груп, аналізує отримані результати і проводить розрахунок експертних оцінок.

Проведення оцінювання здійснюється в декілька турів. У першому турі експертам пропонуються питання, на які вони дають відповіді без аргументації. Результати опитування обробляються і повідомляються експертам. У другому турі експерти аргументують або змінюють свою первинну оцінку з поясненням причин коригування. Подальші тури здійснюються при дотриманні аналогічної процедури. Зазвичай після третього або четвертого туру значення оцінки стабілізуються, що служить критерієм припинення подальшого опитування.

Спосіб опитування експертів визначається робочою групою до формування експертної групи, щоб її структура, професійний склад і кількість експертів відповідали способу опитування. При цьому вибирається один з варіантів організації спілкування експертів: відсутність спілкування, заочне анонімне спілкування, заочне спілкування без анонімності, очне спілкування. За відсутності спілкування експерт висловлює свою думку, нічого не знаючи про інших експертів і про їх думки. Заочне анонімне спілкування означає, що експерт знайомиться з думками і аргументами інших експертів, але не знає, хто саме висловив те або інше положення. Заочне спілкування без анонімності робиться, наприклад, шляхом розсилок листів, опитувань по телефону або по Інтернету. Усі варіанти заочної експертизи хороші тим, що немає необхідності збирати експертів разом, отже, знаходити для цього зручне час і місце. Проте для досягнення погоджених відповідей необхідно більше часу. При очному спілкуванні експерти говорять, а не пишуть, як при заочних спілкуваннях, і тому устигають за той же час зробити істотно більше. Очне спілкування - ці збори, що йдуть за фіксованим регламентом. Воно має недоліки, пов'язані з можливостями негативного впливу на їх проведення соціально-психологічних властивостей і пристрастей учасників, а також нерівності їх професійної, посадової і наукової статусів.

Залежно від характеру досліджуваного об'єкту, від міри його формалізації, відповідності характеристик експертів вимогам, що пред'являються, порядок роботи з ними може бути різним, але в основному передбачає проходження наступних послідовних стадій: уточнення виду об'єкту, його параметрів і показників, що підлягають

експертній оцінці; уточнення формулювання питань і вживаної термінології; узгодження форми представлення результатів експертних оцінок; пред'явлення експертам анкет, опитних листів і інших роздавальних матеріалів. Потім передаються відповідні пояснення, в яких описується мета роботи, структура і порядок побудови роздавального матеріалу; самостійне заповнення експертами анкет.

Результати експертної оцінки обробляються робочою групою. Враховуючи, що колективні методи експертної оцінки є більше трудомісткими, ніж індивідуальні, вони рідше застосовуються у рамках окремих організацій при оцінці виробничих та професійних ризиків. Але ці методи незамінні у випадках, коли необхідно отримати кількісну оцінку ризиків.

Повертаючись до методології оцінки виробничих та професійних ризиків в організаціях за допомогою діаграм у вигляді матриць, ґрунтованих на вірогідності і наслідках подій, можна з упевненістю сказати, що в даному випадку використовуються індивідуальні методи експертної оцінки, які характеризуються, як вже було сказано вище, високою мірою суб'єктивності. Щоб посилити об'єктивність виробничих та професійних ризиків, можна додатково використати метод опитних анкет для працівників різних професій [2].

Цей метод, метод опитних анкет, застосовується у випадках, коли вимагається оцінити небезпеку виробництва або окремих робочих місць, ґрунтуючись на типових робітниках операціях, оцінити об'єкт на відповідність вимогам нормативів або стандартів, а також щоб об'єктивно оцінити і взяти до уваги думки і побажання самих працівників. Перевагою цього методу є те, що фахівець з охорони праці без спеціальної підготовки, аналізуючи інформацію, отриману з опитних анкет, може прийти до задовільного результату і отримати необхідні дані для проведення подальшої повнішої оцінки виробничих та професійних ризиків. Ефективність використання анкет залежить від компетенції і досвіду їх укладачів, тому їх необхідно постійно переглядати і доповнювати.

Самі *Опитні анкети* необхідно розробляти індивідуально для кожного виду діяльності (професії). У структурі анкети мають бути присутніми такі позиції, як оцінка робочого місця, робоче навантаження, характеристика приміщення, організація праці, а також показники, що дозволяють визначити професію працівника, професійний стаж, вік, підлогу і отримати іншу необхідну інформацію. У анкету потрібно включати питання, що зачіпають відношення працівників до виробничого та професійного ризику, присутніх в їх робочому середовищі: чи відповідає мікроклімат необхідним вимогам; чи існують фізичні (шум, вібрація та ін.), хімічні і біологічні чинники, психосоціальні проблеми і тому подібне. Якщо є присутнім фізичне навантаження, то в анкеті мають бути питання про тяжкість предмета, що піднімається або переміщуваного, або вантажу, кількість операцій за зміну, дискомфорт або больові відчуття в окремих частинах тіла до кінця зміни і інші відомості.

Висновок Оцінювачі вищевикладене, можливо зробити висновок, що, існуючі різноманітні формальні методи оцінки виробничих та професійних ризиків у багатьох випадках (реально в усіх нетривіальних ситуаціях) не можуть дати однозначних рекомендацій. Зрештою рішення приймає людина, керівник підприємства, вузу, керівник народного об'єкту господарювання і він несе за це відповідальність. Тому процедури експертного оцінювання бажано включати в аналіз виробничих та професійних ризиків у рамках новостворюваних, а також функціонуючих систем управління охороною праці.

Список літератури

1. А.П. Бочковський, Н.Ю. Сапожнікова. Менеджмент, маркетинг і логістика, навчальний посібник, Одеса, «Юридична література», 2016, 228с.
2. Бабець Є.К. Максимчук А.Г. Стасюк В.П., Чернов А.П. Основи менеджменту: Навчальний посібник. – К.: «ВД «Професіонал», 2007. 496 с.
3. Стефанович П.І., Гунченко О.М. Управління ризиками у системі управління охороною праці. Журнал "Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky". – том 6, номер 2А. Видавець - Academic Society Of Michal Baludansky Kosice Slovakia - Volume 6, № 2A/2018/
4. Журавська Н.Е., Стефанович П.І., Стефанович І.С. Аналіз виробничого ризику з допомогою експертної оцінки. Монографія. Monograph **Socio-economic and management concepts**: International Science Group. Boston:Primedia eLaunch, 2021. 660 p. Available at: DOI 10.46299/ISG.2021. MONO.ECON.
5. Kulikov P.M., Zhuravska N.Y., Savchenko A.M. Modern Possibilities of Management of Technogenic-Natural Systems of Heat-Energy Objects of Industrial and Construction Industry. Lecture Notes in Civil Engineering, 2020. Vol. 73. P. 115-121. (SCOPUS).

References

1. A.P. Bochkovskiy , N.Yu. Sapozhnikova . Management, marketing and logistics, training manual, Odessa, "Legal Literature", 2016. 228.
2. Babets E.K. Maksymchuk A.H. Stasiuk V.P., Chernov A.P. Basics of management: Study guide. - K.: "VD "Professional", 2007.496.
3. Stefanovych P.I., Gunchenko O.M. Risk management in the occupational health and safety management system . Magazine " **Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky** ". – volume 6, number 2A. Publisher - Academic Society Of Michal Baludansky Kosice Slovakia - Volume 6, No. 2A/2018/
4. Zhuravska N.E., Stefanovych P.I., Stefanovych I.S. Analysis of production risk with the help of expert assessment. Monograph. Monograph **Socio - economic and management concepts**: International Science Group. Boston : Primedia eLaunch , 2021. 660 p. Available at : DOI 10.46299/ISG.2021. MONO.ECON.
5. Kulikov P.M., Zhuravska N.Y., Savchenko A.M. Modern Possibilities of Management of Technogenic-Natural Systems of Heat-Energy Objects of Industrial and Construction Industry. Lecture Notes in Civil Engineering, 2020. Vol. 73. P. 115-121. (SCOPUS).

Надійшла до редакції 05.05.2023

A. Savchenko, I. Stefanovych, P. Stefanovych

EXPERT ASSESSMENT OF PRODUCTION AND PROFESSIONAL RISK

Purpose. To give expert assessment of production and professional risks at plants and factories.

Methodology. There are many different methods of assessing industrial and occupational risks. Among them, it is hardly possible to single out some universal method that would be suitable for all organizations. Therefore, specialists choose the method of risk assessment independently.

This article considers the possibilities of applying expert assessment methods in the analysis of industrial and professional risks. Methods of expert evaluation have been briefly outlined, which can be divided into two groups: individual and collective, and it has also been shown that the methods of expert evaluation are a way of forecasting and evaluating future results as well as the actions based on the forecasts of specialists.

Results. It has been indicated that occupational risk is a risk that covers each of all dangers that may exist in the company during the development of normal activities, that the prevention of these risks consists of a set of prevention plans and measures that are carried out in plants, factories and in companies to prevent risky situations. In this way, the danger or risk that the activity presents to the employee must be eliminated or reduced.

Practical significance. It has been shown that the production risk is defined as the risk associated with the manufacturing of products, goods, services, and with the implementation of any type of production activity, in the process of which entrepreneurs face the problems of inadequate use of raw materials, increase in cost price, increase in loss of working time, inefficient use of new methods of production. The main reasons for the production risk of a company or of a product manufacturer have been indicated. A brief explanation of qualitative and quantitative risk assessment, requirements for the expert commission and the experts themselves has been given.

Keywords: *quality, quantity, risk, probability, expert assessment, labor protection, experience, method.*

Відомості про авторів

Савченко Антоніна Михайлівна, старший викладач кафедри технології захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури, e-mail: asav2509@gmail.com

Стефанович Іван Станіславович, старший викладач кафедри технології захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури, e-mail: salevap9@gmail.com

Стефанович Павло Іванович, викладач кафедри технології захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури, e-mail: mr.stalker7@gmail.com

Savchenko Antonina, Senior Lecturer, Department of Occupational Safety and Environment, Kyiv National University of Construction and Architecture; e-mail: asav2509@gmail.com

Ivan Stefanovych, Senior Lecturer, Department of Occupational Safety and Environment, Kyiv National University of Construction and Architecture; e-mail: salevap9@gmail.com

Pavlo Stefanovych, Lecturer, Department of Occupational Safety and Environment, Kyiv National University of Construction and Architecture; e-mail: mr.stalker7@gmail.com

УДК 622.23.02

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-134-143>

Сергієнко О.І., Сергієнко Л.В.

ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ВИЗНАЧЕННЯ КУТІВ НАХИЛУ ПЛОЩАДКИ РУЙНУВАННЯ ПРИ ОБ'ЄМНОМУ НЕРІВНО-КОМПОНЕНТНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Мета Обґрунтування способу визначення кутів нахилу площадки руйнування при об'ємному нерівно-компонентному навантаженні.

Методика досліджень Математичне моделювання, аналітичні дослідження, аналізування параметрів дослідження, лабораторні дослідження.

Результати досліджень В статті обґрунтований спосіб визначення кутів нахилу площадки руйнування при об'ємному нерівно-компонентному навантаженні. Для визначення руйнуючих напружень, діючих на площадці руйнування, отримані формули для визначення кутів повороту площадки руйнування при об'ємному нерівно-компонентному навантаженні. Встановлені параметри напруженого стану та їх величини на момент руйнування зразків вугілля. Виконаний порівняльний аналіз отриманих теоретичних результатів з результатами лабораторного експерименту, де в зразках вугілля кути нахилу площини руйнування визначалися геометрично. При цьому, середнє значення похибки склало 2,6 %.

Наукова новизна Вперше представлені залежності для визначення кутів нахилу площадки руйнування при об'ємному нерівно-компонентному навантаженні від напруженого стану.

Практичне значення полягає у визначенні параметрів утворення техногенних тріщин в процесі руйнування гірських порід або вугілля в об'ємному нерівно-компонентному навантаженні. Завдяки кутам нахилу площадки руйнування можливо визначити значення параметрів руйнуючих напружень. За параметрами положення систем тріщин геологічних порушень у гірському масиві можливо визначити величини головних напружень.

Ключові слова: руйнування гірських порід, головні напруження, кути нахилу площадки руйнування, повні напруження, нормальні напруження, дотичні напруження, октаедричні напруження, параметр Лоде.

Актуальність. Відомо, що тріщинуватість гірських порід при розробці родовищ корисних копалин може мати першорядне значення. Так, тріщинуватість може полегшити виїмку вугілля з пластів, що розробляються, а вибір раціональних параметрів дегазаційних свердловин по відношенню до розташування систем тріщин сприяє підвищенню їх терміну експлуатації та поліпшенню коефіцієнта дегазації гірського масиву. Не дивлячи на позитивний вплив, тріщинуватість гірських порід у більшості випадків сприяє розвитку небезпечних гірничо-геологічних умов і явищ, таких як гірські удари, зсув порід покрівлі, обвали та обвалення.

При веденні очисних робіт у підроблюваному вуглепородному масиві утворюється техногенна тріщинуватість, параметри якої залежать від напружено-деформованого стану гірського масиву. Як показує досвід ведення очисних робіт в складних гірничо-геологічних умовах, періодичність обвалень підроблюваного вуглепородного масиву має нерівномірний характер, особливо в місцях різного ступеня порушеності. Це говорить про суттєвий вплив техногенної тріщинуватості на процес локального обвалення гірських порід у привибійний простір.

Отже, вивчення процесу розповсюдження техногенних тріщин у гірському масиві та руйнування гірських порід при веденні очисних робіт для підвищення безпеки та продуктивності праці є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження по визначенню кутів нахилу площини руйнування проводились інститутом фізики гірничих процесів національної академії наук України. Так в роботі [1] представлена формула для

визначення кута нахилу віднесеного до максимального головного напруження σ_1 : $\alpha = 45^\circ + \rho$, де ρ – кут внутрішнього тертя породи або вугілля.

Згідно роботі [2], автором встановлено, що зсувні тріщини мають найбільш небезпечну орієнтацію, коли кут їхнього нахилу до напрямку стискаючого напруження σ_1 , складає: $\alpha = 0,5 \cdot \arctg(1/f)$, де f – коефіцієнт тертя берегів тріщини. При цьому, для різних гірських порід отримані різні кути проростання тріщин: для пісковиків: $\alpha = 60^\circ$, $\rho = 30^\circ$, аргілітів $\alpha = 65^\circ$ $\rho = 38^\circ$. Також встановлено, що, незважаючи на наявність тріщин у гірських породах, вторинні тріщини розвиваються під кутом до максимального головного напруження.

В роботі [2] встановлений механізм деформування та руйнування вугілля в умовах, що моделюють напружено-деформований стан пласта-супутника при веденні очисних робіт та закономірності впливу різної орієнтації природних (тектонічних) тріщин на вторинне тріщино-утворення при розвантаженні пласта-супутника.

Автори роботи [4] визначають кути нахилу найбільш вірогідної площадки руйнування у точці ґрунтового масиву, опираючись на плоский напружений стан.

Незважаючи на велику кількість досліджень з вивчення процесу розповсюдження тріщин у вуглепородному масиві, процес руйнування порід і вугілля в гірському масиві вимагає розгляду об'ємного напруженого стану, зокрема визначення кутів нахилу площини руйнування в просторі.

Мета статті (постановка завдання) Обґрунтування способу визначення кутів нахилу площадки руйнування при об'ємному нерівно-компонентному навантаженні.

Для досягнення поставленої мети у роботі сформульовані наступні задачі:

- 1) Обґрунтувати доцільність визначення кутів нахилу площадки руйнування при об'ємному нерівно-компонентному навантаженні;
- 2) Створити геометричну модель і встановити аналітичну залежності для визначення кутів нахилу площадки руйнування при об'ємному нерівно-компонентному навантаженні вуглепородного масиву;
- 3) Виконати порівняльний аналіз одержаних результатів дослідження з лабораторним експериментом.

Виклад основного матеріалу. В процесі деформування тіл під навантаженням, утворюється площадка руйнування, на якій спостерігаються руйнуючі напруження: нормальні та дотичні. Ці нормальні та дотичні напруження створюють в сукупності повні руйнуючі напруження, визначення яких пов'язано з визначенням кутів нахилу площадки руйнування. Завдяки визначення положення площадки руйнування є можливість визначити процес розвитку тріщини у будь яких тілах.

Руйнування твердих тіл відбувається внаслідок їх деформування під дією граничних розтягуючих, стискаючих та дотичних напружень. Якщо на тіло діє навантаження, відбувається зростання тріщин, порушується його цілісність і настає незворотний поділ тіла на частини. Залежно від характеру розподілу напружень процес руйнування буває лише двох типів: відрив і зсув. На утворених під час руйнування вільних поверхнях обов'язково діють розтягувальні або дотичні напруження, при цьому зовнішнє навантаження може бути стискаючим. Незважаючи на те, що зовнішнє навантаження є стискаючим, тіло руйнується під впливом дотичних і нормальних розтягувальних напружень, що діють на площадках руйнування. Що стосується варіанта з компонентами нормальних стискаючих напружень на цих площадках, то їхня дія перешкоджає руйнуванню.

Сили, що діють на площині руйнування (рис. 1), утворені векторами нормального σ_n та дотичного напружень τ_n , і розраховуються за формулами теорії Мора:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \quad (1)$$

$$\tau_n = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \quad (2)$$

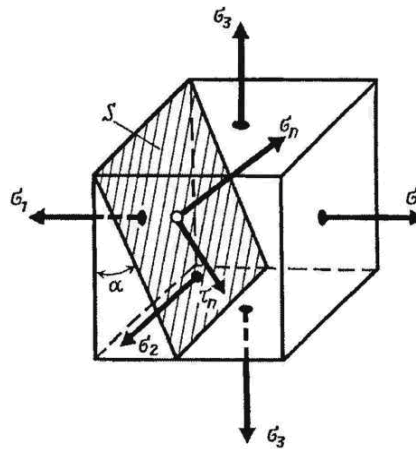


Рисунок 1 – Орієнтація напружень в елементарному об'ємі

Висновок критерію Мору проводиться з урахуванням умов рівноваги трикутної призми (рис. 1), утвореної шляхом поділу елементарного паралелепіпеда похилою площиною S , яка незалежно від кута нахилу, а завжди паралельна одній з головних осей.

Повні S , нормальні σ_n та дотичні τ_n напруження на площадці руйнування, з урахуванням усіх компонент напружень, визначаються за формулами:

$$S^2 = \sigma_1^2 \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_2^2 \cdot \cos^2 \beta + \sigma_3^2 \cdot \cos^2 \gamma \quad (3)$$

$$\sigma_n = \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_2 \cdot \cos^2 \beta + \sigma_3 \cdot \cos^2 \gamma \quad (4)$$

$$\tau_n = \sqrt{S^2 - \sigma_n^2}, \quad (5)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження, Па;

α, β, γ – кути нахилу нормалі площини руйнування до осей координат, які пов'язані між собою виразом:

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1 \quad (6)$$

Раніше при вирішенні задач геомеханіки, значення кутів нахилу нормалі площадки руйнування до осей головного напруження (α, β, γ) задавалися. Але різним значенням компонент напружень відповідають різні кути нахилу площадки руйнування, які необхідно визначати. Так, при гідростатичному навантаженні ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$), кути нахилу площадки руйнування мають однакову величину $\alpha = \beta = \gamma \approx 54,74^\circ$. Напруження, які діють на площині руйнування при цих кутах, називають октаедричними (σ_o, τ_o).

У статті пропонуються залежності для визначення кутів нахилу площадки руйнування при різних значеннях головних напружень ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$). Кути нахилу площадки руйнування до осей координат головних напружень отримані за допомогою геометричної моделі, яка представлена двома кресленнями (рис. 2 а,б).

На рисунку 2б нормаль OD , яка опущена на площину, перетинає трикутник ABC в точці перетину висот (AK , BN , CM). Далі знаходяться пріоритетні відрізки OD , OA , OB , OC та визначаються кути нахилу площадки руйнування за наступними залежностями:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{OD}{OA}\right), \quad (7)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{OD}{OB}\right), \quad (8)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{OD}{OC}\right) \quad (9)$$

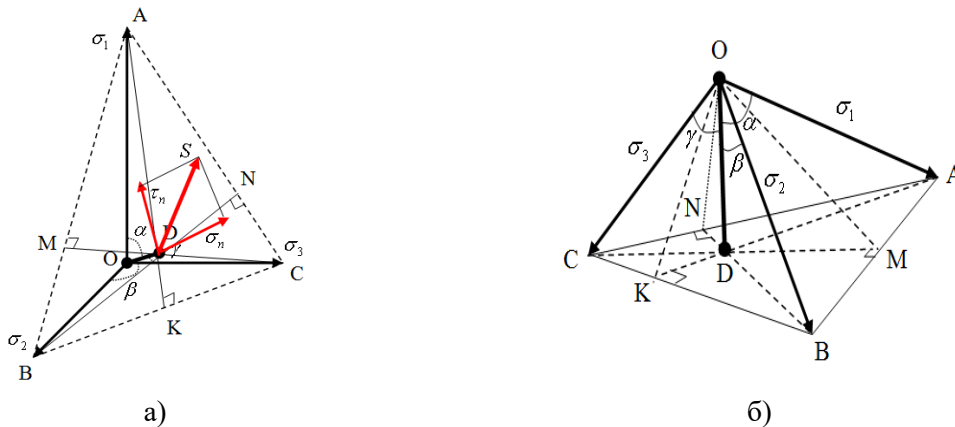


Рисунок 2 – Геометрична модель площині руйнування в об’ємному напруженому стані.

Після цього отримані залежності (7–9) з урахування головних напружень σ_1 , σ_2 , σ_3 приймають наступний вигляд:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\sigma_2 \cdot \sigma_3}{\sqrt{\sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2 + \sigma_1^2 \cdot \sigma_3^2 + \sigma_2^2 \cdot \sigma_3^2}}\right), \quad (10)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{\sigma_1 \cdot \sigma_3}{\sqrt{\sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2 + \sigma_1^2 \cdot \sigma_3^2 + \sigma_2^2 \cdot \sigma_3^2}}\right), \quad (11)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sqrt{\sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2 + \sigma_1^2 \cdot \sigma_3^2 + \sigma_2^2 \cdot \sigma_3^2}}\right). \quad (12)$$

Таким чином, були отримані залежності (10–12) для визначення кутів нахилу площадки руйнування для різного об’ємного напружено-деформованого стану. Завдяки отриманим залежностям можливо визначити положення площини руйнування у будь якій точці напруженого гірського масиву. Це дасть можливість встановити повну картину розповсюдження техногенної тріщинуватості. Також вирішити зворотне завдання по визначенню величин параметрів головних напружень по положенню систем тріщин геологічних порушень у гірському масиві.

Обговорення результатів. В роботі [5, 6] були представлені лабораторні результати по дослідженню механізму руйнування вугілля в умовах різного об’ємного напружено-деформованого стану. Для лабораторного експерименту використовувалася установка нерівно-компонентного тривісного стиснення, яка дозволяє у трьох взаємно

перпендикулярних напрямках створювати незалежні напруження, подібні до величин у гірському масиві [7]. Випробування проводили на зразках вугілля кубічної форми з розміром ребра 55 мм.

На рисунку 3 а, б показані результати навантаження зразків вугілля №1, № 2 за програмою $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, а на рисунку 3 в, г відповідно зразків №3, №4 за програмою $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

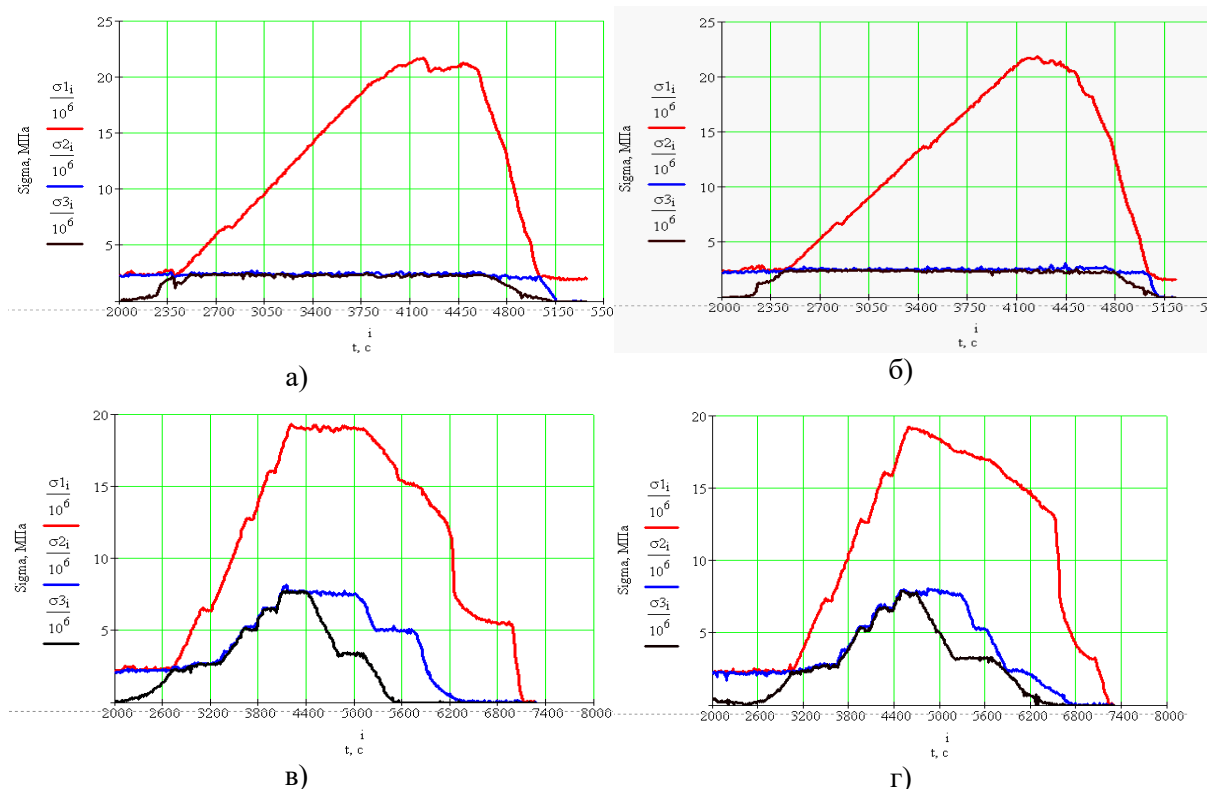


Рисунок 3 – Програма навантаження зразків вугілля

Далі по параметру Лодє був встановлений перехід з одного виду напруженого стану у другий. Так, по першому режиму навантаження (рис. 4 а, б) відбувається перехід від узагальненого стиснення до узагальненого розтягування, а по другому (рис. 4 в, г) – від узагальненого стиснення до узагальненого зсуву, або між ними.

Параметр Лодє показав, що почався процес руйнування зразків вугілля. При цьому, були визначені, на момент руйнування зразка, величини компонент головних напружень і кути нахилу площадки руйнування для заданих програм навантаження.

На рисунку 5 показана зміна кутів нахилу площадки руйнування зразків вугілля від напруженого стану у процесі навантаження. Руйнування зразку вугілля почне відбуватися тоді, коли бокові напруження не зможуть перешкоджати цьому процесу.

Таким чином встановлено, що руйнування зразків вугілля відбувається під кутами нахилу для режиму навантаження:

1. $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$: $\alpha \approx 75^\circ \div 83^\circ$, $\beta \approx 74^\circ \div 83^\circ$, $\gamma \approx 22^\circ \div 10^\circ$;
2. $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$: $\alpha \approx 80^\circ \div 81^\circ$, $\beta \approx 68^\circ \div 67^\circ$, $\gamma \approx 25^\circ$.

У таблиці 1 представлені параметри напруженого стану та їх величини на момент руйнування зразків вугілля, а також графічна інтерпретація положення площини руйнування у просторі.

У таблиці 2 представлені значення кутів нахилу площадки руйнування за отриманою залежністю та результатами лабораторного експерименту.

Для встановлення достовірності отриманої залежності по визначенню кутів нахилу був виконаний порівняльний аналіз отриманих теоретичних результатів з результатами лабораторного експерименту, де в зразках вугілля кути нахилу площини руйнування (α , β , γ) визначалися геометрично. При цьому, середнє значення похибки склало 2,6 %.

Встановлено, що теоретично отримані значення кутів нахилу площини руйнування (α , β , γ) для зразків вугілля, з використанням формул (10–12), повністю геометрично співпадає з результатами лабораторних досліджень, що дає можливість у будь якій точці гірського масиву визначити його об'ємний напружено-деформований стан ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) та повну картину розповсюдження техногенних тріщин у напруженому масиві.

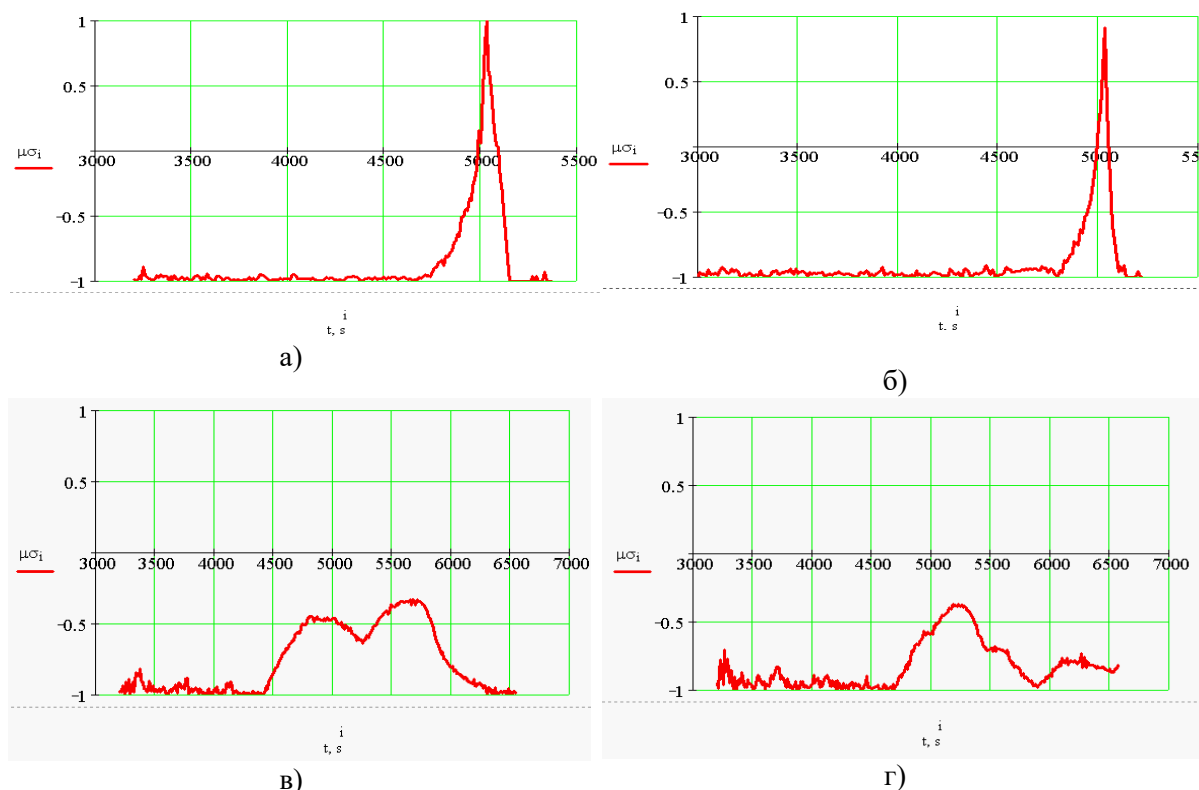


Рисунок 4 – Зміна параметру виду напруженого стану (параметр Лоде) для зразків вугілля: а) зразок №1; б) зразок №2; в) зразок №3; г) зразок №4.

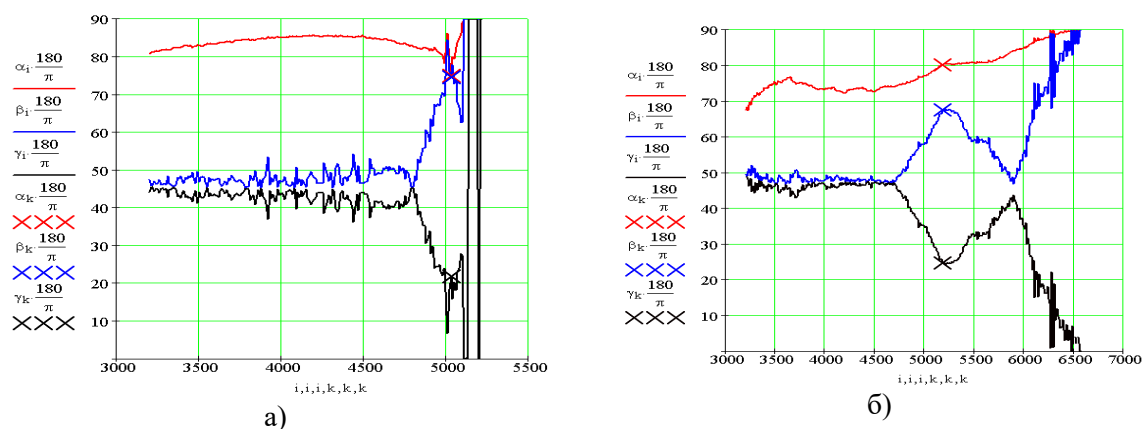
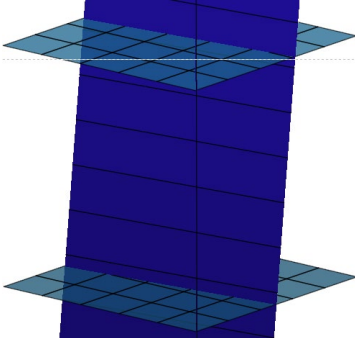
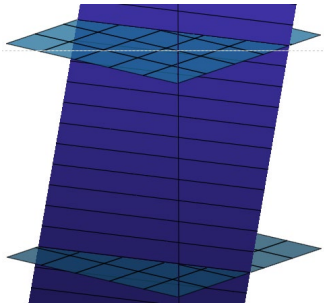
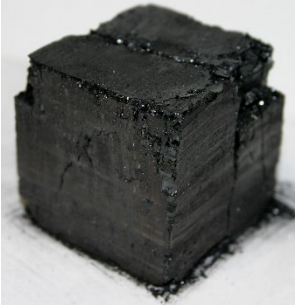
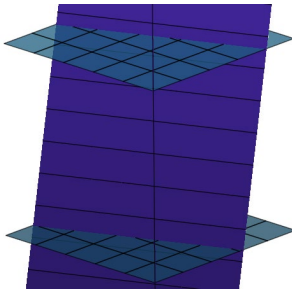
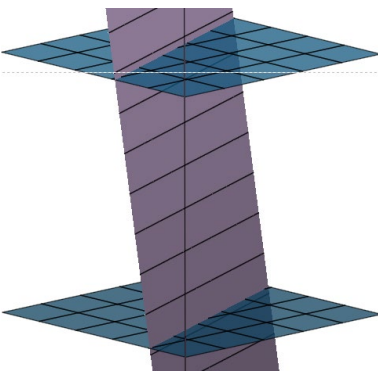


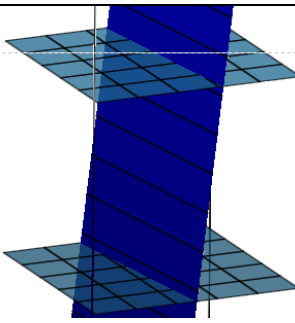
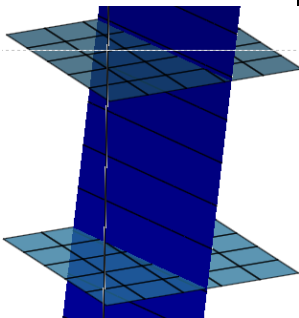
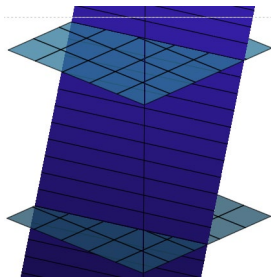
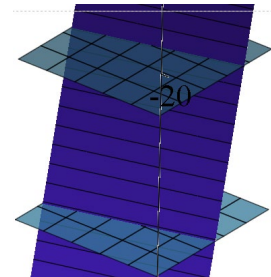
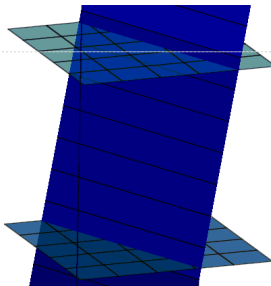
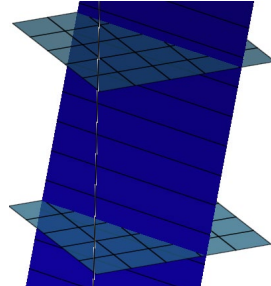
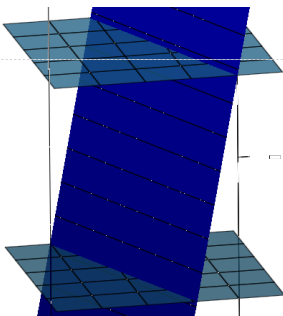
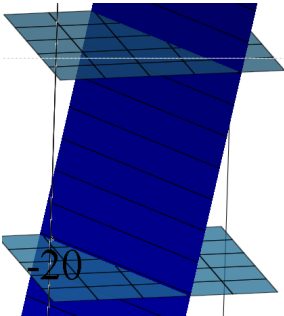
Рисунок 5 – Зміна кутів нахилу площадки руйнування зразків вугілля від напруженого стану у процесі навантаження

Позначкою (x) відмічений початок процесу руйнування зразку: а) №2, б) №4.

Таблиця 1 – Параметри напруженого стану та їх величини на момент руйнування зразків вугілля

№	Параметри напруженого стану та їх величини на момент початку руйнування зразків вугілля			Положення площини руйнування у просторі по відношенню до граней зразків	Зразок вугілля після випробування
1	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа		
	2.197	2.194	0.266		
	S , МПа	σ_n , МПа	τ_n , МПа		
	0.454	0.321	0.321		
	α , °	β , °	γ , °		
	83.152	83.142	9.715		
2	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа		
	2.092	2.027	0.582		
	S , МПа	σ_n , МПа	τ_n , МПа		
	0.935	0.785	0.509		
	α , °	β , °	γ , °		
	75.036	74.545	21.781		
3	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа		
	19.265	7.773	3.395		
	S , МПа	σ_n , МПа	τ_n , МПа		
	5.32	4.482	2.866		
	α , °	β , °	γ , °		
	80.826	66.726	25.22		
4	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа		
	17.664	7.797	3.283		
	S , МПа	σ_n , МПа	τ_n , МПа		
	5.166	4.354	2.781		
	α , °	β , °	γ , °		
	80.279	67.51	24.717		

Таблиця 2 – Значення кутів нахилу площадки руйнування за отриманою залежністю та результатами лабораторного експерименту

№	Кути нахилу площадки руйнування	Теоретичні значення кутів площадки руйнування, град	Виміряні геометричні значення кутів площадки руйнування, град	Положення площини руйнування у просторі по відношенню до граней зразків (Теоретичне визначення)	Положення площини руйнування у просторі по відношенню до граней зразків (Геометричне вимірювання по зразкам)
1	$\alpha, ^\circ$	83.152	83.801		
	$\beta, ^\circ$	83.142	80.963		
	$\gamma, ^\circ$	9.715	10.988		
2	$\alpha, ^\circ$	75.036	77.512		
	$\beta, ^\circ$	74.545	74.737		
	$\gamma, ^\circ$	21.781	19.918		
3	$\alpha, ^\circ$	80.826	80.644		
	$\beta, ^\circ$	66.726	66.585		
	$\gamma, ^\circ$	25.22	25.426		
4	$\alpha, ^\circ$	80.279	79.654		
	$\beta, ^\circ$	67.51	67.608		
	$\gamma, ^\circ$	24.717	24.907		

Висновки

1. Руйнування зразків вугілля відбувається під кутами нахилу для режиму навантаження $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$: $\alpha \approx 75^\circ \div 83^\circ$, $\beta \approx 74^\circ \div 83^\circ$, $\gamma \approx 22^\circ \div 10^\circ$; для режиму навантаження $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$: $\alpha \approx 80^\circ \div 81^\circ$, $\beta \approx 68^\circ \div 67^\circ$, $\gamma \approx 25^\circ$.

2. Значення кутів нахилу площини руйнування (α , β , γ), які отримані для зразків вугілля за встановленими залежностями (10–12), повністю співпадають з результатами лабораторних досліджень. Середнє значення похибки склало 2,6 %. Це дає можливість, при наявності відомих параметрів напружено-деформованого стану ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), визначити повні (S), нормальні (σ_n) і дотичні напруження (τ_n), а також положення площини руйнування (α , β , γ), у будь-якої точці гірського масиву та встановити повну картину розповсюдження техногенних тріщин.

3. Аналіз дослідження показав, що при наявності відомих параметрів положення систем тріщин геологічних порушень у гірському масиві, можливо визначити величини головних напружень ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), тобто вирішити обернену задачу.

Список літератури

1. А.Д. Алексеев, Н.В. Недодаев. Предельное состояние горных пород. Киев: Наукова думка, 1982. 198 с.
2. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Недра, 1974. 640 с.
3. Сергієнко Л.В. Обґрунтування параметрів прогнозу зон скупчення метану у пластах-супутниках в умовах тектонічної порушеності. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Дніпро 2016р., 22с.
4. Богомоллова О.А., Жиделев А.В. Определение угла наклона наиболее вероятной площадки разрушения в точке грунтового массива. Construction and Geotechnics. 2020. Т. 11, No 1. С. 20–29. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.02
5. Лобков Н.И., Сергиенко А.И., Сергиенко Л.В. Исследование динамического разрушения образцов угля при объемном сжатии. Збірник матеріалів конференції “Геотехнології і охорона праці у гірничій промисловості”. КП ДонНТУ. Донецьк: ООО “Цифровая типография”, 2009. С.17-23.
6. Сергиенко Л.В., Гладкая Е.В., Молодецкий А.В. Исследование механизма разрушения угля в условиях, моделирующих напряженно-деформированное состояние пласта-спутника при ведении очистных работ. Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. Днепропетровск, 2015. Вып. 124 С.106 –114.
7. Алексеев А.Д. Физика угля и горных процессов. Киев: Наукова думка, 2010. 424 с.

References

1. A.D. Alekseev, N.V. Nedodaev. Predelnoe sostoianie gornykh porod. Kiev Naukova dumka, 1982. 198 s. (in Russian)
2. Herepanov G.P. Mekhanika khrupkogo razrusheniia. M. Nedra, 1974. 640. (in Russian).
3. Serhiyenko L.V. Obgruntuvannya parametriv prohnozu zon skupchennya metanu u plastakh-sputnykakh v umovakh tektonichnoyi porushenosti. Avtoreferat dysertatsiyi na zdobuttya naukovooho stupenya kandydata tekhnichnykh nauk. Dnipro. (in Ukraine)
4. Bogomolova O.A., ZHidelev A.V. Opredelenie ugla naklona naibolee veroiatnoi ploshchadki razrusheniia v tochke gruntovogo massiva. Construction and Geotechnics. 2020. T. 11, No 1. . 20–29. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.02(in Russian).
5. Lobkov N.I., Sergienko A.I., Sergienko L.V. Issledovanie dinamicheskogo razrusheniia obraztsov uglia pri obieemnom szhatii. Zbrnik materialv konferents Geotekhnolog okhorona prats u grnichi promislovost. K DonNTU. Donetsk ООО TSifrovaia tipografiia, 2009..17-23. (in Russian)
6. Sergienko L.V., Gladkaia E.V., Molodetskii A.V. Issledovanie mekhanizma razrusheniia uglia v usloviiakh, modeliruiushchikh napriazhenno-deformirovannoe sostoianie plasta-sputnika pri vedenii ochistnykh rabot. Geotekhnicheskaiia mekhanika Mezhd. sb. nauchn. tr. IGTМ NAN Ukrainy. Dnepropetrovsk, 2015. Vyp. 124 .106 114. (in Russian)
7. Alekseev A.D. Fizika uglia i gornykh protsessov. Kiev Naukova dumka, 2010. 424. (in Russian)

Надійшла до редакції 09.05.2023

Serhiienko A., Serhiienko L.

JUSTIFICATION OF THE METHOD FOR DETERMINING THE ANGLES OF INCLINE OF A DESTRUCTION AREA UNDER A VOLUME UNEQUAL-COMPONENT LOAD

Purpose. Justification of the method for determining the angles of inclination of a destruction platform in the case of a volume uneven-component load.

Methodology. Mathematical modeling, analytical studies, analysis of research parameters, laboratory studies.

Results. The article substantiates the method for determining the angles of inclination of the fracture site under a volume uneven-component loading. To determine the destructive stresses acting on the fracture site, the formulas have been obtained for determining the angles of rotation of the fracture site under volumetric uneven-component loading. The parameters of the stress state and their values at the moment of destruction of the coal samples have been established. A comparative analysis of the obtained theoretical results with the results of a laboratory experiment has been carried out, where the angles of inclination of the fracture plane in the coal samples have been determined geometrically. At the same time, the average value of the error is 2.6%.

Scientific novelty. The dependences for determining the angles of inclination of the fracture site in the case of volume unequal-component loading from the stress state have been presented for the first time.

Practical significance consists in determining the parameters of the formation of man-made cracks in the process of destruction of rocks or coal in a volumetric unequal-component load. Due to the angles of inclination of the destruction site, it is possible to determine the value of the parameters of the destructive stresses. According to the parameters of the position of the crack systems of geological disturbances in the rock massif, it is possible to determine the values of the principal stresses.

Keywords: rock failure, principal stresses, angles of inclination of the failure platform, total stresses, normal stresses, tangential stresses, octahedral stresses, Lode parameter.

Відомості про авторів

Сергієнко Олександр Іванович – к.т.н, доцент кафедри управління гірничим виробництвом і охорона праці, Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», (Юридична адреса: пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., 85300. Фактична адреса: вул. Потебні, 56, м. Луцьк, Волинська обл., 43000, Україна). E-mail: oleksandr.serhiienko@donntu.edu.ua

Сергієнко Ліана Валеріївна – к.т.н, провідний фахівець відділу докторантури, аспірантури. Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», (Юридична адреса: пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., 85300. Фактична адреса: вул. Потебні, 56, м. Луцьк, Волинська обл., 43000, Україна). E-mail: liana.serhiienko@donntu.edu.ua

Serhiienko Oleksandr - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mining Management and Labour Protection, Donetsk National Technical University, (Legal address: 2, Shybankova Square, Pokrovsk, Donetsk oblast, 85300. Actual address: 56, Potebni Street, Lutsk, Volyn oblast, 43000, Ukraine).

E-mail: oleksandr.serhiienko@donntu.edu.ua

Serhiienko Liana - Candidate of Technical Sciences, leading specialist of the department of doctoral and postgraduate studies. Donetsk National Technical University, (Legal address: 2, Shybankova Square, Pokrovsk, Donetsk oblast, 85300. Actual address: 56, Potebni Street, Lutsk, Volyn oblast, 43000, Ukraine).

E-mail: liana.serhiienko@donntu.edu.ua

УДК 004.031.43:62-501/-502:620.91

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-144-151>

М.В. Ступак, В.В. Поцєпась, Д.І. Григоренко

АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ З ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПІДСТАНЦІЇ 35/10 КВ

Мета. Підвищення зв'язності та, як результат, зниження часу отримання телеметричної інформації на ділянці розподільчої електромережі за допомогою розробки апаратного комплексу з моніторингу та передачі інформації.

Методи. Дослідження проведені на основі системного та елементно-структурного підходів з елементами імітаційного моделювання, програмування та аналітичних розрахунків.

Результати. Результати роботи несуть прикладний характер. В рамках проведеного дослідження предметної галузі було запропоновано використовувати інформаційно-комунікаційні технології для підвищення рівня оперативного реагування на нештатні ситуації при роботі електричних трансформаторних понижуючих підстанцій. Для підстанції були розраховані параметри системи захисту струмів короткого замикання, виходячи з значень яких обрано пристрій захисту з інтерфейсними шинами зв'язку, які дозволяють застосувати підхід Інтернету Речей, Промислового Інтернету Речей та Інтернету Енергії для побудови в подальшому автоматизованої інформаційної системи. Апаратний синтез, обрані засоби автоматизації та наведені схеми дозволяють в подальшому реалізувати повноцінну систему моніторингу та управління трансформаторною підстанцією.

Наукова новизна. Запропоновано на рівні технічної реалізації концепцію універсальної системи збору і передачі інформації для розподільчих електроенергетичних систем.

Практичне значення. В роботі запропоновано апаратну систему збору та передачі даних, яка може бути застосована в енергосистемах для підключення та телеметрії пристроїв релейного захисту.

Ключові слова: автоматизація, синтез, підстанція, Modbus, TCP, моніторинг, інтерфейс, реагування, Інтернет Енергії, Інтернет Речей.

Вступ. В століття цифрових технологій будь-який енергетичний процес описується набором тисяч параметрів які змінюються як по відомих законах так і випадковим чином. Моніторинг та аналіз всіх параметрів надзвичайно складний і не може виконуватись людиною. Сучасні технології дозволяють автоматизувати або значно спростити збір та обробку режимних параметрів.

Завдання збору та передачі інформації виконують системи збору і передачі і інформації (СЗПІ). Для їх реалізації використовуються різноманітні технології. Зі збільшенням кількості можливих джерел та засобів збереження інформації виникає завдання їх підтримки. Іноді, вимірювальні мікропроцесорні пристрої від різних виробників підтримують не всі інтерфейси зв'язку та протоколи передачі даних а для збереження даних з різних джерел використовуються бази даних, що найкраще підходять для збереження даних конкретного типу. Об'єднання всіх пристроїв та засобів збереження даних в єдину інформаційну систему стає дуже складним та вимагає постійної підтримки.

Основна частина. В роботі в якості об'єкту дослідження виступає реально діюча понижуюча трансформаторна підстанція з вузловою схемою приєднання. Підстанція 35/10 кВ призначена для постачання електроенергії побутовим споживачам [1]. Для впровадження автоматизованої системи збору інформації необхідно провести аналіз характеристик підстанції, розрахувати характеристики релейного захисту та обрати обладнання.

Функціональна схема електричних з'єднань підстанції наведена на рис. 1. До підстанції підключено дві лінії напругою 35 кВ – лінія №1 загальною довжиною 28 км та

лінія №2 – загальна довжина 37 км. Обидві лінії включають в себе ділянки різного виконання (повітря/кабель).

Шини 10 кВ підключені через два трансформатори:

- ТД–5000/35.5/11;
- ТДН–15000/35/10.5.

Кожен трансформатор підключено через вимикач ВМП-10-1000-20.

Секціонування шин 10 кВ виконано вимикачем ВМП-10П. Загалом до шин 10 кВ підключено 28 приєднань [1]. Кожне приєднання обладнане:

- вимикачем ВМП-10;
- роз'єднувачем РШ-10/600;
- ВТС ТВЛМ-10/400 (ТВЛМ-10/200, ТВЛМ-10/1000, ТВЛМ-10/300).

Для вимірювання напруги на шинах 35 і 10 кВ встановлені ВТН.

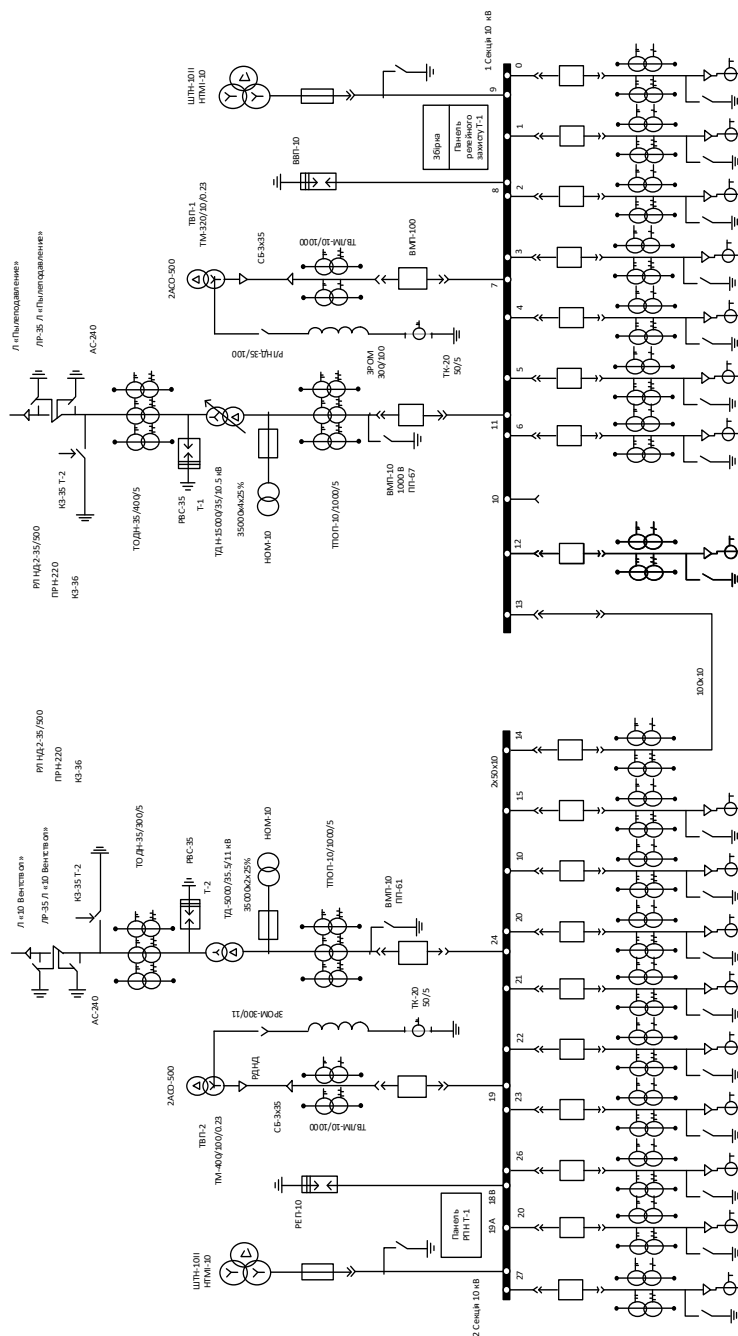


Рисунок 1 – Функціональна схема електричних з'єднань підстанції 35/10 кВ

Система збору і передачі інформації (СЗПІ) в енергетиці визначає технічні та програмні засоби, що забезпечують збір та передачу інформації а саме:

- Мікропроцесорні пристрої для вимірювання, первинної обробки та тимчасового збереження інформації;
- Середовище передачі інформації (канали зв'язку);
- Сервери(в даному випадку ABB REF615), для обробки та зберігання інформації;
- Програмне програмні технології, що забезпечують обробку, передачу, збереження інформації.

Структура типової моделі інформаційних зв'язків СЗПІ представлена на рис. 2.

**Рисунок 2** – Модель інформаційних зв'язків СЗПІ

Наступним етапом роботи є розрахунок струмів КЗ, що дасть нам можливість обрати відповідне обладнання захисту, а саме пристрій релейного захисту та автоматики, який би дозволяв основі отриманої інформації реалізувати можливість збору інформації та подальшу її передачу через мережу Ethernet.

Всі ЛЕП підстанції обладнані: максимально-струмовим захистом, струмовою відсічкою, дистанційним захистом та автоматикою повторного включення.

Трансформатори підстанції обладнані: диференційним захистом трансформатора, газовим захистом, максимально-струмовим захистом та струмовою відсічкою.

Підстанція обладнана наступною протиаварійною автоматикою: автоматикою вводу резерву, автоматикою частотного розвантаження, автоматикою запобігання завантаження обладнання, автоматикою обмеження підйому частоти, автоматикою обмеження підйому навантаження, автоматикою обмеження зниження частоти, автоматикою обмеження зниження навантаження та пристроєм резервування відмови вимикача [1].

Для розрахунку КЗ виберемо найгірший варіант: трифазне КЗ на шинах за трансформаторами при увімкненому секційному вимикачі. Схема заміщення для такого випадку виглядатиме наступним чином (рис. 3).

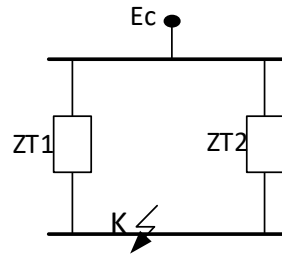


Рисунок 3 – Схема заміщення для розрахунків струмів КЗ

Виберемо базисні значення:

$$U_6 = 10,5 \text{ кВ}; S_6 = 5 \text{ МВА}; E^* = 1,1 \text{ в. о.};$$

Знайдемо опори трансформаторів. Для спрощення розрахунку будемо використовувати лише реактивний опір. Опір трансформаторів розраховується за формулою [3]:

$$x_{T1} = \frac{U_{к.Т1} \cdot S_6}{100 \cdot S_{Н.Т1}} = \frac{7,5 \cdot 5}{100 \cdot 5} = 0,075 \text{ в. о.}$$

$$x_{T2} = \frac{U_{к.Т2} \cdot S_6}{100 \cdot S_{Н.Т2}} = \frac{8 \cdot 5}{100 \cdot 15} = 0,027 \text{ в. о.}$$

Еквівалентний опір шукаємо відповідно до схеми заміщення на рис.1.2 [3]:

$$x_e = \frac{x_{T1} \cdot x_{T2}}{x_{T1} + x_{T2}} = \frac{0,075 \cdot 0,027}{0,075 + 0,027} = 0,02 \text{ в. о.}$$

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{5}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 0,275 \text{ кА}$$

$$I_{п0*} = \frac{E^*}{x_e} = \frac{1,1}{0,02} = 55,917 \text{ в. о.}$$

$$I_{п0} = I_6 \cdot I_{п0*} = 0,275 \cdot 55,917 = 15,373 \text{ кА}$$

Знайдемо ударний струм для напруги 10.5 кВ (сторона НН трансформаторів)[2]:

$$k_{уд} = 1,85; \quad T_a = 0,06 \text{ с};$$

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot k_{уд} \cdot I_{п0} = \sqrt{2} \cdot 1,85 \cdot 15,373 = 40,221 \text{ кА}$$

З метою забезпечення можливості впровадження дистанційних засобів автоматизації та моніторингу стану роботи та основних параметрів понижаючої трансформаторної підстанції, до складу обладнання необхідно додати пристрій релейного захисту з відповідним комунікаційним інтерфейсом. З аналіз предметної галузі та проведених розрахунків було прийнято рішення про введення в схему(рис 1) пристрою релейного захисту та автоматики (РЗА) REF 615 для зняття поточних значень струмів короткого замикання.

Пристрій може встановлюватись в радіальні, кільцеві і замкнуті розподільні мережі а також в мережі з розподіленою генерацією. На рис.4 наведена схема пристрою РЗ АВВ REF615 з подальшим трифазним включенням в панель релейного захисту Т-1 (рис. 1.1):

Основні функції пристрою, якими може бути обладнаний пристрій в різних конфігураціях [4]:

- Ненаправлений максимально-струмовий захист;
- Направлений захист від замикань на землю;
- Направлений захист від замикань на землю на основі виміру фазної напруги;
- Високоомний диференційний захист;
- Функції захисту та вимірів на основі контролю напруги та частоти;
- Контроль якості електроенергії.

Додаткові можливості ABB REF615:

- Modbus TCP/IP чи RTU/ASCII;
- IEC 60870-5-103;
- DNP3 TCP/IP чи послідовний;
- RTD/mA вимірювання та багатоцільовий захист;
- IEC 61850-9-2 LE;
- IEEE 1588 v2 синхронізація часу.

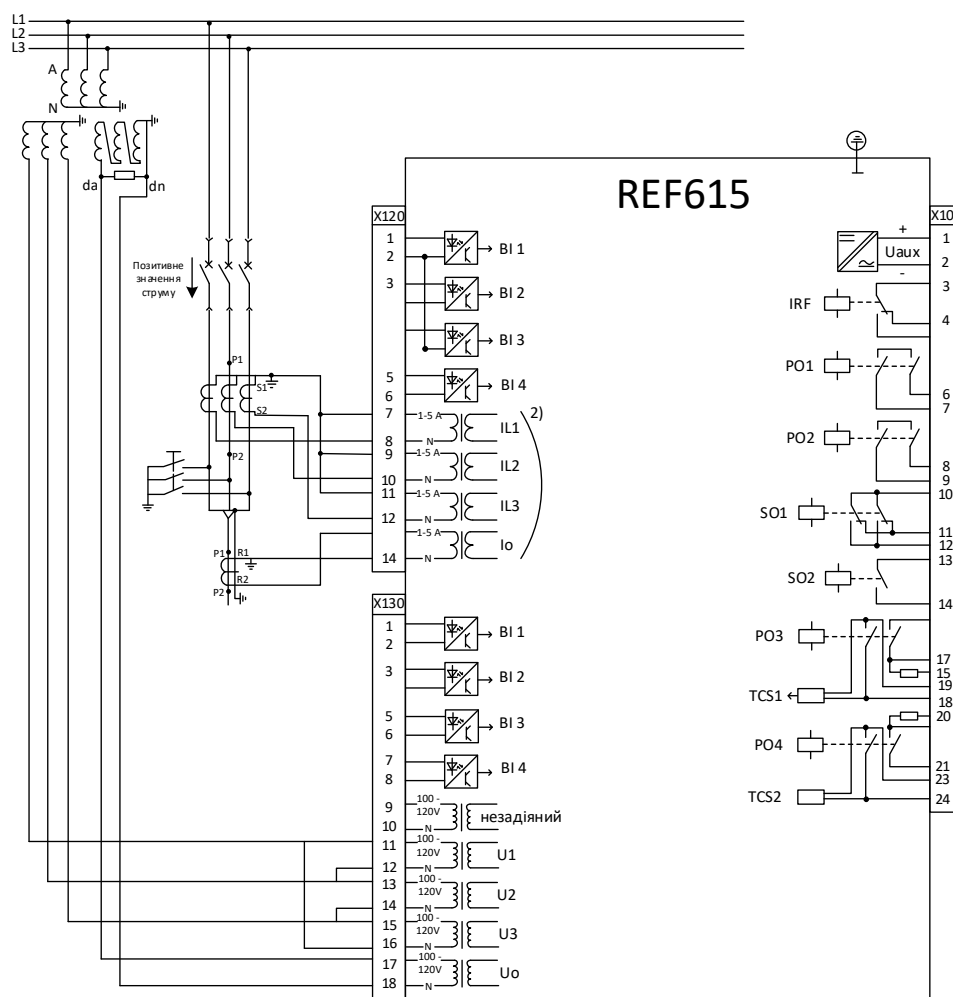


Рисунок 4 – Функціональна схема пристрою РЗ ABB REF615

Для подальшої інтеграції пристрою РЗА ABB REF615 в існуючу схему понижаючої підстанції необхідно узгодити інтерфейси підключення та визначити основний напрямок

інформаційних потоків, а також відповідний стандарт для розбудови телекомунікаційної інфраструктури.

Пристрої серії ABB в тому числі й P3A REF615 підтримують різноманітні протоколи обміну даними, включаючи MEK 61850 з підтримкою Редакції 2, шину процесу відповідно до MEK 61850-9-2 LE, MEK 60870-5-103, Modbus® і DNP3. Ці протоколи дозволяють отримувати робочі дані і здійснювати управління. Тим не менш, деякі функції зв'язку, наприклад горизонтальний зв'язок між пристроями, надаються тільки по протоколу MEK 61850. Якщо використовується підключення Modbus TCP, до пристрою можуть підключатися одночасно п'ять клієнтів. Крім того, можливе використання Modbus RTU і Modbus TCP паралельно, також, за необхідності можуть працювати паралельно, MEK 61850 та Modbus. Параметри інтерфейсів/протоколів наведені в табл. 1 [4].

Зважаючи на наведені характеристики необхідно обрати тип протоколу та інтерфейсного з'єднання з урахуванням фактично доступних для підключення шин даних, якими обладнано відповідні пристрої, що входять до комплексної автоматизованої системи збору і передачі телеметричної інформації. В даному випадку доцільно розглядати лише протоколи саме промислового спрямування, через реалізації на прикладному рівні моделі відкритих систем додаткових механізмів перевірки цілісності та достовірності даних.

Таблиця 1 – Параметри інтерфейсів REF615

Інтерфейси/ протоколи	Ethernet		Послідовний	
	100BASE- TX RJ-45	100BASE- FX LC	RS-232/RS- 485	Оптоволоконний ST
MEK 61850-8-1	+	+	-	-
MEK 61850-9-2 LE	+	+	-	-
Modbus RTU/ASCII	-	-	+	+
Modbus TCP/IP	+	+	-	-
DNP3(послідовний)	-	-	+	+
DNP3 TCP/IP	+	+	-	-
MEK 60870-5-103	-	-	+	+

Отже, виходячи з порівняльних характеристик, зупинимо свій вибір саме на протоколі Modbus TCP. Modbus - відкритий комунікаційний протокол, заснований на архітектурі ведучий - ведений (master-slave). Існують можливості передачі даних через послідовні лінії зв'язку RS-485, RS-422, RS-232, і мережі TCP / IP (Modbus TCP) [5]. Розглядаючи протокол Modbus в контексті відкритих систем OSI варто відзначити що даний протокол працює на прикладному (7) рівні з використанням інтерфейсів (1, фізичний рівень) RS-232 та RS-485, та формує відповідні кадри на каналному (2) рівні в режимах Modbus RTU та Modbus ASCII [6].

Вже на алгоритмічному рівні, в подальшій роботі для розробки та імплементації автоматизованої системи буде використовуватись платформа NODE-RED – візуальний редактор з відкритим кодом, який дозволяє через браузер побудувати схему взаємодії пристроїв між собою та зовнішніми системами. Дане рішення зручне як проміжне для зв'язку пристроїв різного типу між собою та/або з системою автоматизації або, наприклад, СУБД або іншою хмарою. Node-RED зручно використовувати на шлюзах між різними мережами пристроїв інтернету речей, що функціонують на власних, як правило, більш простих протоколах і традиційним інтернетом, побудованих на TCP/IP, UDP. Дана платформа дозволяє з'єднувати разом вузли, що надсилають повідомлення.

Висновки. Виходячи з проведеного аналізу для умов понижаючої трансформаторної підстанції 35/10 кВ запропоновано технологічну схему та обрано обладнання для реалізації системи автоматичного збору інформації та моніторингу про стан роботи трансформаторної підстанції. Для реалізації системи застосовано підхід та технології Промислового Інтернету Речей та Інтернету Енергії. На підставі проведених розрахунків обрано апаратну платформу, зокрема промисловий контролер з функцією захисту від струмів короткого замикання, який дозволяє передавати телеметричні дані в інформаційне середовище. Для підвищення надійності каналів зв'язку та забезпечення достовірності та цілісності телеметричної інформації запропоновано використання протоколу Modbus TCP. Подальший розвиток роботи полягатиме в створенні комп'ютерно-інтегрованої реалізації системи збору та моніторингу з використання середовища NODE-RED.

Список літератури

1. Національна енергетична компанія «Укренерго» [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://ua.energy>
2. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. 4-те вид., пероб. і доп. М. ЭНАС, 2012. 376 с.
3. Правила улаштування електроустановок: [арх. 22 серпня 2015] / Міненерговугілля України. 5-те вид., перероб. і доп. (станом на 22.08.2014) (чинне з 22.11.2014). Харків: [б. в.], 2012. 793 с.
4. Документація до пристрою ABB REF615 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://new.abb.com/medium-voltage/distribution-automation/numerical-relays/feeder-protection-and-control/reliion-for-medium-voltage/feeder-protection-and-control-ref615-iec>
5. Документація протоколу передачі даних Modbus [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://modbus.org>.
6. Modbus Protocol and its applications in IoT [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.daviteq.com/blog/en/modbus-protocol-and-its-applications-in-iot/>
7. Ступак М.В., Використання ПЛАТФОРМИ NODE-RED для застосунків ІоТ. «ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології: зб. доповідей Всеукр. наук.-практ. конф. молодих вчених, 1 грудня 2022 р. /ДВНЗ «ДонНТУ»; відп. ред. Г.В. Ступак. Луцьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2022. С. 59-61.

References

1. Natsionalna enerhetychna kompaniia «Ukrenerho» [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <https://ua.energy>
2. Spravochnyk po proektyrovaniyu elektricheskikh setei / pid red. D. L. Faibysovycha. – 4-te vyd., perob. i dop. – M. ENAS, 2012. 376.
3. Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok: [arkh. 22 serpnia 2015] / Minenerhovuhillia Ukrainy. – 5-te vyd., pererob. i dop. (stanom na 22.08.2014) (chynne z 22.11.2014). – Kharkiv: [b. v.], 2012. 793.
4. Dokumentatsiia do prystroiu ABB REF615 [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <https://new.abb.com/medium-voltage/distribution-automation/numerical-relays/feeder-protection-and-control/reliion-for-medium-voltage/feeder-protection-and-control-ref615-iec>
5. Dokumentatsiia protokolu peredachi danykh Modbus [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <https://modbus.org>.
6. Modbus Protocol and its applications in IoT [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <https://www.daviteq.com/blog/en/modbus-protocol-and-its-applications-in-iot/>
7. Stupak M.V., Vykorystannia PLATFORMY NODE-RED dlia zastosunkiv IoT. «TAK»: telekomunikatsii, avtomatyka, kompiuterno-intehrovani tekhnolohii: zb. dopovidei Vseukr. nauk.-prakt. konf. molodykh vchenykh, 1 hrudnia 2022 r. /DVNZ «DonNTU»; vidp. red. H.V. Stupak. – Lutsk: DVNZ «DonNTU», 2022. 59-61.

Надійшла до редакції 05.09.2023

M. Stupak, V. Potsepaiev, D. Hryhorenko

HARDWARE IMPLEMENTATION OF THE AUTOMATED INFORMATION COLLECTION SYSTEM FROM THE ELECTRICAL SUBSTATION 35/10 KV

Purpose. Increasing connectivity and, as a result, reducing the time of receiving telemetry information on the distribution network section by means of the development of a hardware complex for monitoring and information transmission.

Methodology. The research was carried out on the basis of system and elemental-structural approaches with elements of simulation modeling, programming and analytical calculations.

Results. The results of the work are applied. Within the framework of the conducted research of the subject area, it has been suggested to use information and communication technologies to increase the level of operational response to emergency situations during the operation of electric transformer step-down substations. The parameters of the short-circuit current protection system have been calculated for the substation, based on the values of which a protection device with communication interface buses has been selected, which allow applying the approach of the Internet of Things, the Industrial Internet of Things, and the Internet of Energy for the subsequent construction of an automated information system. Hardware synthesis, selected means of automation and the given schemes allow further implementation of a full-fledged system of monitoring and control of the transformer substation.

Scientific novelty. The concept of a universal system of information collection and transmission for distribution power systems has been proposed at the level of technical implementation.

Practical significance. The paper offers a hardware data collection and transmission system that can be used in power systems for connection and telemetry of relay protection devices.

Keywords: automation, synthesis, substation, Modbus, TCP, monitoring, interface, response, Internet of Energy, Internet of Things.

Відомості про авторів

Ступак Марина Володимирівна, аспірантка кафедри автоматики та телекомунікацій, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», maryna.stupak@donntu.edu.ua

Поцєпаєв Валерій Валерійович, к.т.н, доцент кафедри автоматики та телекомунікацій, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», valerii.potsepaiev@donntu.edu.ua

Григоренко Данило Ігорович, студент гр. АКТ-20, кафедри автоматики та телекомунікацій, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», danylo.hryhorenko.kita@donntu.edu.ua

Stupak Maryna Volodymyrivna, graduate student of the Department of Automation and Telecommunications, Donetsk National Technical University, maryna.stupak@donntu.edu.ua

Potsepaiev Valerii Valeriiovych, Ph.D., associate professor of the Department of Automation and Telecommunications, Donetsk National Technical University, valerii.potsepaiev@donntu.edu.ua

Hryhorenko Danylo Ihorovych, student АКТ-20, Department of Automation and Telecommunications, Donetsk National Technical University, danylo.hryhorenko.kita@donntu.edu.ua

УДК 622.268:622.831:334.45

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-152-165>

О.М. Ткачук, В.В. Гнатюк

ЗІСТАВЛЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОХОРОННИХ СПОРУД ПІДГОТОВЧИХ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК

Мета. Дослідити та зіставити деформаційні властивості охоронних споруд у вигляді ціликів вугілля та конструкцій із подрібненої породи для обґрунтованого вибору способу охорони, що дасть змогу забезпечити стійкість бічних порід у вуглепородному масиві та підготовчих виробок на виїмкових ділянках у вугільній шахті.

Методика досліджень. Для досягнення поставленої мети були виконані лабораторні дослідження на експериментальних зразках, які піддавалися одновісному стисненню. Для ціликів вугілля змінювалися їх товщина, для конструкцій із подрібненої породи – потужність породного шару за постійної площі поперечного перерізу.

Результати досліджень. В результаті виконаних досліджень визначено деформаційні властивості охоронних споруд, які зазнавали одновісного стиснення. Для ціликів вугілля при зміні їх товщини h_0 в 2 рази та дії зовнішнього статичного навантаження, яке змінювалося за лінійною залежністю, зафіксовано зменшення на 15% їхньої жорсткості. У межах безпечного деформаційного ресурсу, коли відносна деформація перебуває в діапазоні значень $0,18 \leq \lambda \leq 0,23$, забезпечується стійкість ціликів вугілля та їх несуча здатність. При цьому відносна зміна їхнього об'єму не повинна перевищувати 7-9%. Встановлено, що перевищення граничного рівня питомої потенціальної енергії деформації в середньому на 12-14% викликає руйнування ціликів. Для охоронних споруд із подрібненої породи при зростанні потужності породного шару з $h_0 = 0,032$ до $h_0 = 0,063$ і відносній зміні об'єму $0,35 \leq \delta V \leq 0,28$, значення коефіцієнта ущільнення вихідного матеріалу зменшується від $k_{\text{ущ}} = 1,5$ до $k_{\text{ущ}} = 1,42$ з одночасним збільшенням роботи стиснення та зростанням більш ніж на 20% питомої потенціальної енергії деформації, завдяки чому забезпечується жорсткість закладного матеріалу та несуча здатність охоронних споруд із подрібненої породи.

Наукова новизна. Встановлено закономірності формування деформаційних властивостей охоронних споруд в умовах одновісного стиснення з урахуванням зміни питомої потенціальної енергії деформації та відносної зміни їхнього об'єму.

Практичне значення. Для забезпечення стійкості бічних порід у вуглепородному масиві та підготовчих виробок на виїмкових ділянках у вугільній шахті, обґрунтовано доцільність застосування часткового або повного закладання виробленого простору з подрібненої породи, що дозволить обмежити переміщення бічних порід у виробленому просторі.

Ключові слова: охоронні споруди, одновісне стиснення, цілики вугілля, подрібнена порода, питома потенціальна енергія деформації, коефіцієнт ущільнення.

Вступ. Інтенсифікація очисних робіт зумовлює істотно важливі вимоги до таких виробничих технологій як підготовчі роботи, підтримання та охорона гірничих виробок. Аварійності сприяють складні гірничо-геологічні умови глибоких вугільних шахт та невідповідність застосовуваних способів охорони для підготовчих виробок та управління станом масиву тому рівню навантажень та посуванню очисних вибоїв, який забезпечують сучасні механізовані комплекси.

Незадовільний стан підготовчих виробок на виїмкових ділянках, розташованих у зоні впливу очисних робіт, є однією з основних причин зниження безпеки гірничих робіт та надійності функціонування системи провітрювання та підземного транспорту. Специфіка підтримання виробок у таких зонах, обумовлена підвищеною порушеністю порід покрівлі, тріщинуватістю вуглепородного масиву.

На сьогодні протяжність виробок, що перекріплюються, на діючих вугільних шахтах України становить близько 40% по відношенню до пройдених виробок. Незважаючи на значний обсяг ремонтних робіт та їхню високу трудомісткість (близько

82-86 чол.-зм. на 1000 т середньодобового видобутку), протяжність виробок із незадовільним станом залишається на рівні 24-26% від загальної протяжності виробок.

Досвід роботи вугільних шахт України показує, що наявні способи охорони та підтримання підготовчих виробок не завжди дозволяють вирішити задачу забезпечення їх експлуатаційного стану. Особливої значущості це завдання набуває для виробок, які розташовані в зоні впливу очисних робіт. Нормальні умови праці гірників у комплексно-механізованих вибоях та плановий видобуток з них, можливі тільки за умови забезпечення стійкості конвеєрних штреків по довжині виїмкових діляниць. Тому проблема забезпечення безпечного стану підготовчих виробок у глибоких вугільних шахтах залишається актуальною. Від успішного вирішення цього завдання багато в чому залежать обсяги видобутку вугілля, рентабельність та безпека роботи вугільних підприємств.

Аналіз існуючих досліджень та публікацій. Постійне збільшення глибини ведення гірничих робіт, протяжності підтримуваних виробок, відпрацювання вугільних пластів у складних гірничо-геологічних умовах, посилює геомеханічну обстановку у вуглепородному масиві, пов'язану із забезпеченням експлуатаційного стану штреків, застосування конструкції кріплень опорно-огорожувального типу, не в змозі забезпечити достатню стійкість підготовчих виробок. Про це свідчать витрати на ремонт і підтримку штреків, що постійно збільшуються [1].

Нині на деяких шахтах Донбасу для охорони підготовчих виробок використовують цілики вугілля розміром 5-20 м [2,3]. Відомо [4,5], що міцнісні та деформаційні властивості вугільних ціликів визначаються наявністю в них дефектів. У тріщинуватому масиві цілик перебуває у граничному напружено-деформаційному стані і його несуча здатність недостатня для підтримання підроблених порід.

Охорона підготовчих виробок за допомогою ціликів вугілля, з огляду на необхідність покриття дефіциту видобутку вугілля, призводить до нераціонального використання його запасів у надрах. При переході на більші глибини розробки, втрати у ціликах зростають [6].

Практика застосування безціликових способів охорони засвідчила, що за невідповідності характеристик кріплення або охоронних споруд (конструкцій) міцнісним і деформаційним характеристикам порід покрівлі та підшви, зміщення у вуглепородному масиві позаду очисного вибою становлять 600-1200 мм, що на 300-800 мм перевищує піддатливість рамного кріплення, встановленого у підготовчій виробки [7,13,16]. У таких умовах перед повторним використанням, штреки доводиться повністю перекріплювати. Темпи перекріплення нижчі за темпи просування очисних вибоїв. Повторне використання кріплення, яке дістається з виробки, всього близько 50% [8].

Традиційно для охорони підготовчих виробок на шахтах України застосовуються бутові смуги, органне кріплення, кушове кріплення, бутокостри та конструкції зі збірного залізобетону (БЗБТ). Досвід застосування тумб БЗБТ для охорони виробок показав, що через жорсткість кріплення за відносно невеликих величин зближення бічних порід відбувається руйнування цих конструкцій з втратою несучої здатності [9,15].

Застосування литих смуг можливе при суцільній системі розробки, що дозволяє забезпечити підтримку штреків у вироблених просторах при прямоточному провітрюванні лав і підвищити навантаження на очисний вибій [10]. Вважається [11], що до основних переваг литих смуг поряд з повною механізацією їх зведення віднесені висока несуча здатність, що забезпечує охорону виробок на пластах з покрівлями середньої обрушуваності, і ізоляція виробленого простору.

Стосовно розглянутого способу охорони виробок слід зазначити, що для порід схильних до здимання, жорсткі опори є концентраторами гірського тиску та окрім виконання основних функцій – ріжучого кріплення, призводять до погіршення стану виробок [9].

На низці шахт Донбасу успішно використовуються комбіновані способи підтримання підготовчих виробок у зоні впливу очисних робіт на основі анкерно-аркового кріплення у поєднанні з литими жорсткими смугами з цементно-мінеральних сумішей [12].

Дослідженнями ДонНТУ було встановлено, що закладний матеріал, розташований у виробленому просторі виїмкових ділянок, сприяє запобіганню розвитку зсувів розшарованої товщі у вуглепородному масиві та створює зони стійкості порід позаду очисного вибою, що сприятливо позначається на стійкості підготовчих виробок [14]. Маючи певні фізико-механічні особливості, закладні масиви з подрібненої породи виконують функції охоронних споруд і дозволяють обмежити переміщення бічних порід у виробленому просторі виїмкових ділянок. Однак для досягнення такого ефекту необхідно визначити деформаційні властивості закладних матеріалів та умови досягнення ними необхідної жорсткості. Очевидно, що для обґрунтованого вибору способу охорони підготовчих виробок, необхідно виконати дослідження деформаційних властивостей охоронних споруд.

Постановка завдання досліджень. В умовах одновісного стиснення експериментальних зразків, у вигляді ціликів вугілля та конструкцій із подрібненої породи, дослідити їх деформаційні властивості.

Матеріали та методи досліджень. Експериментальні моделі були представлені у вигляді ціликів вугілля та конструкцій із подрібненої породи. Моделі мали форму паралелепіпеда. Площа їх поперечного перерізу до одновісного стиснення залишалася постійною. Під час проведення дослідів змінювався параметр h_0 (м): для ціликів вугілля – товщина, конструкцій із подрібненої породи – потужність породного шару. Розміри експериментальних зразків представлені у табл. 1. Масштаб моделювання М1:25.

Таблиця 1 – Розміри експериментальних зразків

№ п/п	$h_0, \text{м}$	$a, \text{м}$	$b, \text{м}$	$S, \text{м}^2$	$V, \text{м}^3$
1	0,032	0,07	0,07	0,0049	0,00015
2	0,04				0,00019
3	0,046				0,00022
4	0,055				0,00026
5	0,063				0,0003

У дослідженнях забезпечувалися тотожності рівнянь рівноваги натури та моделі [15]. Межа міцності моделей на стиск визначався з виразу [15]

$$\sigma_{\text{СЖ}}^{\text{м}} = \frac{l_{\text{м}}}{l_{\text{н}}} \cdot \frac{\gamma_{\text{м}}}{\gamma_{\text{н}}} \cdot \sigma_{\text{СЖ}}^{\text{н}}, \quad (1)$$

де $\sigma_{\text{СЖ}}^{\text{м}} \sigma_{\text{СЖ}}^{\text{н}} \frac{\text{н}}{\text{м}^2}$ – межа міцності на стиск моделі та натури, $\frac{\text{н}}{\text{м}^2}$;

$l_{\text{м}}, l_{\text{н}}$ – лінійні розміри моделі та натури, м;

$\gamma_{\text{м}}, \gamma_{\text{н}}$ – густість матеріалу моделі та натури, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Характеристика матеріалу для експериментальних зразків у вигляді ціликів вугілля представлена в табл. 2. Коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$.

При підборі подрібненої породи використовували співвідношення [15]

$$tg\beta_{\text{м}} = tg\beta_{\text{н}}, \quad (2)$$

де $\beta_m = \beta_n = 23^\circ$ - кути внутрішнього тертя матеріалу моделі та натури, град.

Ситовий аналіз подрібненої породи виконано відповідно до [16]. Результати аналізу представлені у табл. 3. Насипна щільність подрібненої породи $\rho_{н.п.} = 1790 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, пористість $M = 15\%$. Коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,25$.

Таблиця 2 – Характеристика матеріалу для вугільного цілика

Об'єкт	Матеріал	$\gamma, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$\sigma_{\text{СЖ}}, \text{МПа}$
Модель	піщано-цементна суміш з додаванням каніфолі	1600	1,16
натура	вугілля	1300	12

Таблиця 3 – Дані ситового аналізу подрібненої породи для експериментальних зразків

Розмір фракції, мм	% у загальному об'ємі
>5	4
4-5	16
3-4	19
2-3	24
1-2	18
0,1-1	14
<0,1	5

Експериментальні зразки піддавалися одновісному стисненню на пресі П-50 у лабораторії гірничого тиску ДонНТУ. У ході виконання дослідів фіксували величину зовнішньої сили $F(\text{кН})$ та зміну висоти $h(\text{м})$ експериментальних зразків.

Відносна деформація λ експериментальних зразків визначалася за виразом [17]

$$\lambda = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (3)$$

Δh – величина поздовжньої деформації експериментального зразка, м.

Жорсткість $C, \left(\frac{\text{Н}}{\text{м}}\right)$ експериментальних зразків визначалася за виразом [17]

$$C = \frac{F}{\Delta h}. \quad (4)$$

Відносна зміна об'єму δV експериментальних зразків в умовах одновісного стиснення, визначалося як в [17]

$$\delta V = (1 - 2\nu)\lambda. \quad (5)$$

Модуль деформації $E_g \left(\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}\right)$ охоронних споруд визначали виходячи із закону Гука [17]

$$E_g = \frac{F}{S} \cdot \frac{h_0}{\Delta h}, \quad (6)$$

де $\frac{F}{S}$ - механічне напруження, яке в умовах одновісного стиснення вважається тиском, $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$; S – площа поперечного перерізу експериментального зразка, що контактує з плитами преса, м^2 .

Робота зовнішньої сили A (Дж), що витрачається на деформування зразків, можна визначити за виразом [17]

$$A = \frac{E_g \cdot S}{h} \cdot \frac{\Delta h^2}{2} = \frac{E_g \cdot V}{2} \lambda^2. \quad (7)$$

Кількість енергії U (Дж), що міститься в експериментальному зразку, визначається виразом [17, 18]

$$U = \frac{\sigma^2}{2E_g} \cdot V, \quad (8)$$

де $\frac{\sigma^2}{2E_g}$ – щільність енергії або питома потенціальна енергія деформації, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$

У цих дослідженнях враховувалася науково-технічна гіпотеза про те, що внутрішня потенціальна енергія тіл, що деформуються, має критичні рівні. При їх переході тіло, що деформується, змінює свою поведінку та напружено-деформований стан [19].

Результати досліджень. Розглянемо результати досліджень деформаційних властивостей експериментальних зразків у вигляді ціликів вугілля в умовах одновісного стиснення (табл.4).

Таблиця 4 – Деформаційні характеристики експериментальних зразків у вигляді ціликів вугілля в умовах одновісного стиснення

№ п/п	F , кН	Δh , м	h , м	δV	λ	σ , МПа	E_g , $\frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$	$\frac{\sigma^2}{2E_g}$, $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$	A , Дж	C , $10^6, \frac{\text{Н}}{\text{м}}$
1	32	0,006	0,026	0,07	0,18	6,5	34,6	0,61	83,0	5,33
2	41	0,008	0,032	0,08	0,2	8,36	41,8	0,83	158,8	5,12
3	51	0,01	0,036	0,084	0,21	10,4	47,8	1,13	231,3	5,1
4	57	0,012	0,043	0,084	0,21	11,6	53,1	1,26	303,7	4,75
5	67	0,015	0,048	0,09	0,23	13,6	57,1	1,61	445,3	4,46

На рис.1 представлений графік зміни відносної деформації λ експериментальних зразків у вигляді ціликів вугілля від їх початкового об'єму V (м^3).

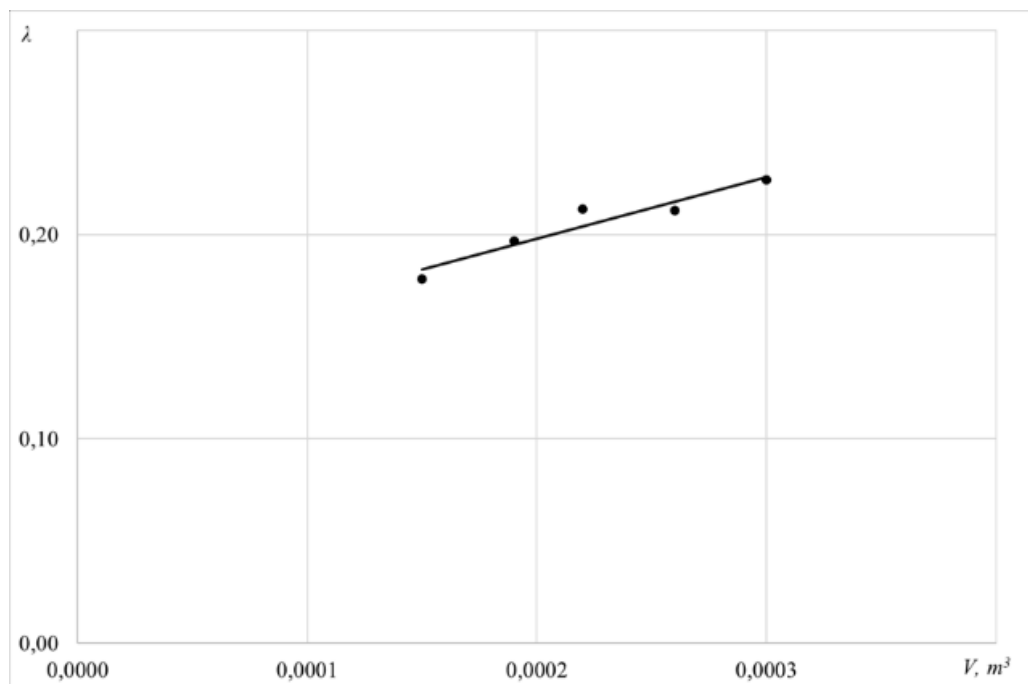


Рисунок 1 – Графік зміни відносної деформації експериментальних зразків λ у вигляді ціликів вугілля від їх початкового об'єму V (м^3) в умовах одновісного стиснення.

З графіка видно, що в умовах одновісного стиснення ціликів вугілля зі збільшенням початкового об'єму експериментальних зразків від $V = 0,00015 \text{ м}^3$ до $V = 0,003 \text{ м}^3$, коли змінюється параметр h_0 (м), їх відносна деформація в умовах одновісного стиснення збільшується від $\lambda = 0,18$ до $\lambda = 0,23$. Між цими значеннями існує лінійна залежність, а коефіцієнт кореляції дорівнює $R^2 = 0,92$ (рис.1).

На рис.2 представлені графіки зміни поздовжньої деформації Δh (м) і відносної зміни об'єму δV експериментальних зразків у вигляді ціликів вугілля від величини зовнішньої сили F (кН) в умовах одновісного стиснення.

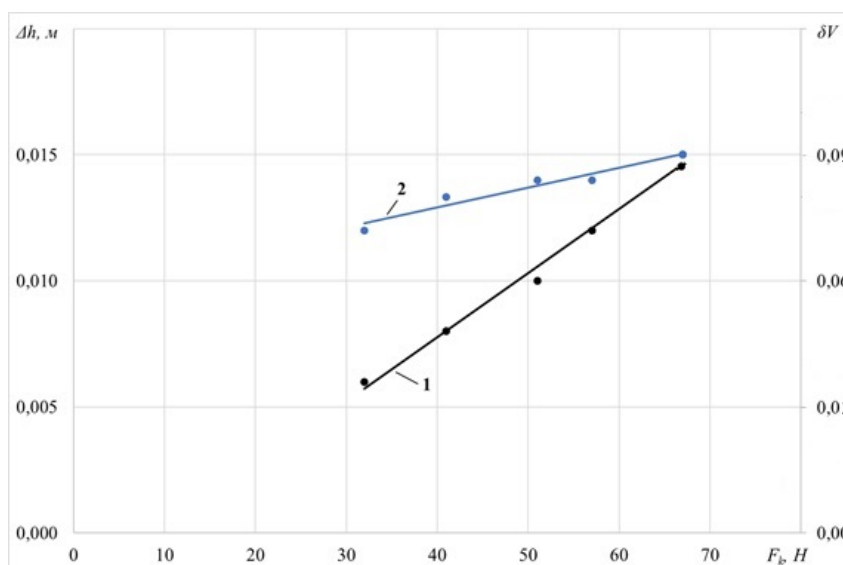


Рисунок 2 – Графіки зміни поздовжньої деформації Δh (м) та відносної зміни об'єму δV експериментальних зразків у вигляді ціликів вугілля від величини зовнішньої сили F (кН) в умовах одновісного стиснення: 1 – Δh (м); 2 – δV .

З графіків видно, що зі збільшенням стискаючої сили від $F = 32 \text{ кН}$ до $F = 67 \text{ кН}$, поздовжня деформація експериментальних зразків збільшується від $\Delta h = 0,006 \text{ м}$ до $\Delta h = 0,015 \text{ м}$ (рис.2, залежність 1). Внаслідок дії зовнішньої сили F , відносна зміна об'єму перебуває в діапазоні значень $0,07 \leq \delta V \leq 0,09$ (рис.2, залежність 2).

На рис.3 представлені графіки зміни питомої потенціальної енергії деформації $\frac{\sigma^2}{2E_g}$ і жорсткості C для ціликів вугілля різного початкового об'єму V в умовах одновісного стиснення.

З графіків видно, що зі збільшенням початкового об'єму ціликів вугілля від $V = 0,00015 \text{ м}^3$ до $V = 0,003 \text{ м}^3$, питома потенціальна енергія деформації збільшується від $\frac{\sigma^2}{2E_g} = 0,61 \text{ МДж/м}^3$ до $\frac{\sigma^2}{2E_g} = 1,61 \text{ МДж/м}^3$ (рис.3, залежність 1), а їх жорсткість зменшується від $C = 5,33 \cdot 10^6 \text{ н/м}$ до $C = 4,46 \cdot 10^6 \text{ н/м}$ (рис.3, залежність 2).

У табл.5 наведено деформаційні характеристики експериментальних зразків у вигляді ціликів вугілля при тривалій дії зовнішнього навантаження. Експериментальні зразки перебували під дією навантаження F (кН) протягом 48 годин. За цей час питома

потенціальна енергія деформації ціликів збільшилася від $\frac{\sigma^2}{2E_g} = 0,72 \text{ МДж/м}^3$ до $\frac{\sigma^2}{2E_g} = 1,83 \text{ МДж/м}^3$ Н/м, а їх жорсткість зменшилася від $C = 4,57 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ до $C = 3,94 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ (табл.5).

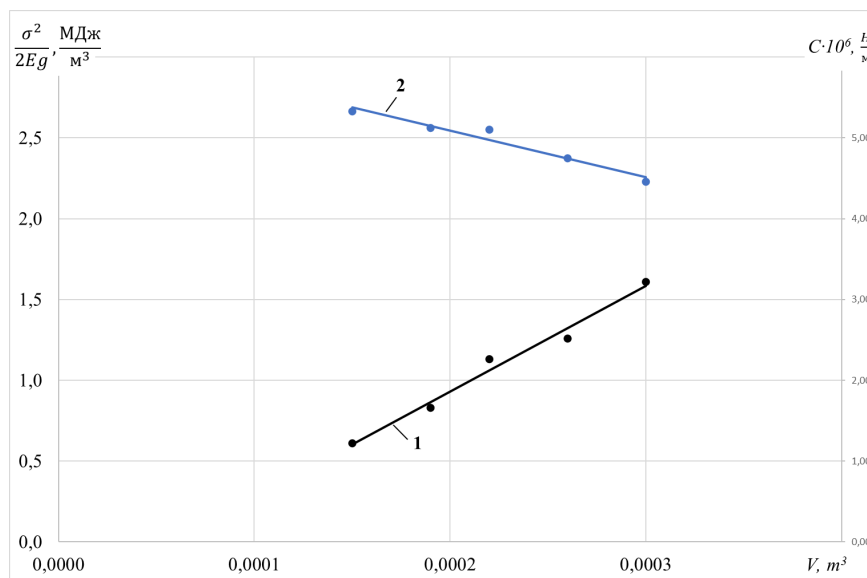


Рисунок 3 – Графіки зміни питомої потенціальної енергії деформації $\frac{\sigma^2}{2E_g}$ та жорсткості C експериментальних зразків у вигляді ціликів вугілля різного початкового об'єму V (м³) в умовах одновісного стиснення: 1 - $\frac{\sigma^2}{2E_g}$; 2 - C .

Таблиця 5 – Деформаційні характеристики експериментальних зразків у вигляді ціликів вугілля при тривалій дії зовнішнього навантаження

№ п/п	$F, \text{кН}$	$\Delta h, \text{м}$	$E_g, \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$	$\frac{\sigma^2}{2E_g}, \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$	$C \cdot 10^6, \frac{\text{Н}}{\text{м}}$
1	32	0,007	30,5	0,72	4,57
2	41	0,0086	38,3	0,9	4,76
3	51	0,011	43,4	1,24	4,63
4	57	0,014	45,4	1,48	4,07
5	67	0,017	50,3	1,83	3,94

Розглянемо результати досліджень деформаційних властивостей експериментальних зразків із подрібненої породи в умовах одновісного стиснення (табл. 6).

На рис.4 наведено графіки зміни відносної деформації λ та поздовжньої деформації Δh (м) експериментальних зразків із подрібненої породи різного первісного об'єму V (м³) в умовах одновісного стиснення.

З графіків видно, що зі збільшенням початкового об'єму експериментальних зразків від $V = 0,00015 \text{ м}^3$ до $V = 0,003 \text{ м}^3$, питома потенціальна енергія деформації зменшується від $\lambda=0,68$ до $\lambda = 0,55$ (рис.4, залежність 1). При цьому поздовжня деформація збільшується від $\Delta h = 0,022 \text{ м}$ до $\Delta h = 0,035 \text{ м}$ (рис.4, залежність 2).

На рис.5 наведено графік зміни жорсткості C експериментальних зразків з подрібненої породи від величини поздовжньої деформації Δh (м) в умовах одновісного стиснення.

З графіка видно, що зі збільшенням поздовжньої деформації в діапазоні значень $\Delta h = (0,022-0,035)$ м, жорсткість експериментальних зразків знаходиться в межах $C = (2,8-2,86) \cdot 10^6$ н/м (рис.5).

На рис.6 наведено графіки зміни поздовжньої деформації Δh (м) та відносної зміни об'єму δV експериментальних зразків від величини зовнішньої сили F (кН) в умовах одновісного стиснення.

Таблиця 6 – Деформаційні характеристики експериментальних зразків із подрібненої породи в умовах одновісного стиснення

№ п/п	F , кН	Δh , м	h , м	δV	λ	σ , МПа	E_g , $\frac{МН}{м^2}$	$\frac{\sigma^2}{2E_g}$, $\frac{МДж}{м^3}$	A , Дж	C $\cdot 10^6$, $\frac{Н}{м}$	$k_{уц}$
1	63	0,022	0,01	0,35	0,68	12,8	18,5	4,42	638	2,86	1,5
2	70	0,025	0,015	0,33	0,63	14,2	22,7	4,44	841	2,8	1,48
3	80	0,029	0,017	0,32	0,63	16,3	25,7	5,16	1102	2,75	1,47
4	90	0,032	0,023	0,3	0,58	18,3	31,3	5,32	1342	2,81	1,44
5	98	0,035	0,028	0,28	0,55	20	36	5,55	1620	2,8	1,42

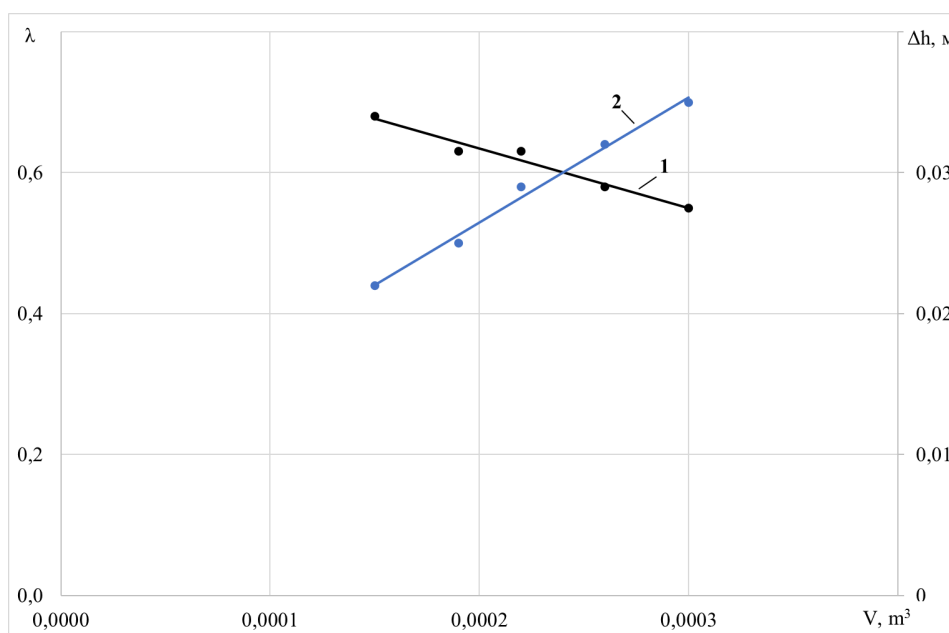


Рисунок 4 – Графіки зміни відносної деформації λ та поздовжньої деформації Δh (м) експериментальних зразків із подрібненої породи різного первісного об'єму V (м³) в умовах одновісного стиснення: 1 – λ ; 2 – Δh (м).

З графіків видно, що зі збільшенням стискаючої сили від $F = 63$ кН до $F = 98$ кН поздовжня деформація експериментальних зразків збільшується від $\Delta h = 0,022$ м до $\Delta h = 0,035$ м (рис.6, залежність 1), а відносна зміна об'єму перебуває в діапазоні значень $0,35 \leq \delta V \leq 0,28$ (рис.6, залежність 2). Причому, мінімальне значення параметра h_0 відповідає максимальному значенню $\delta V = 0,35$ і навпаки, максимальному значенню h_0 – мінімальне значення $\delta V = 0,28$.

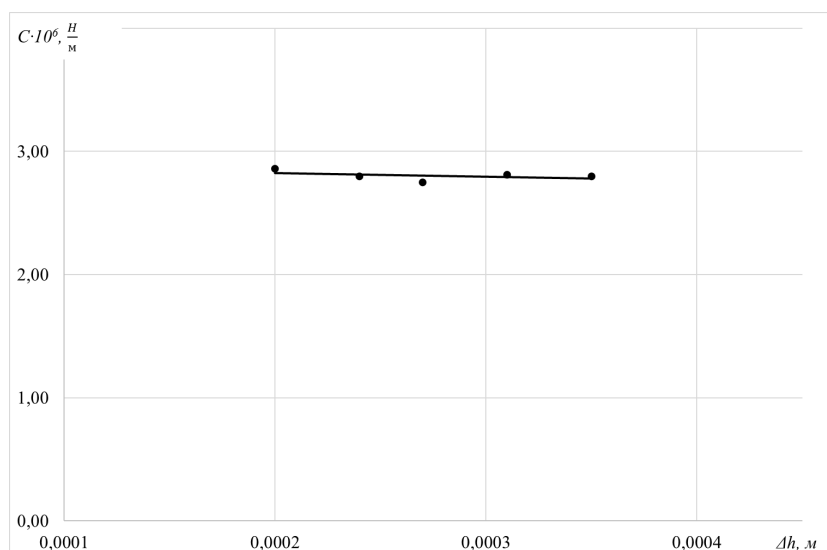


Рисунок 5 – Графік зміни жорсткості C (н/м) експериментальних зразків із подрібненої породи від величини поздовжньої деформації Δh (м) в умовах одновісного стиснення.

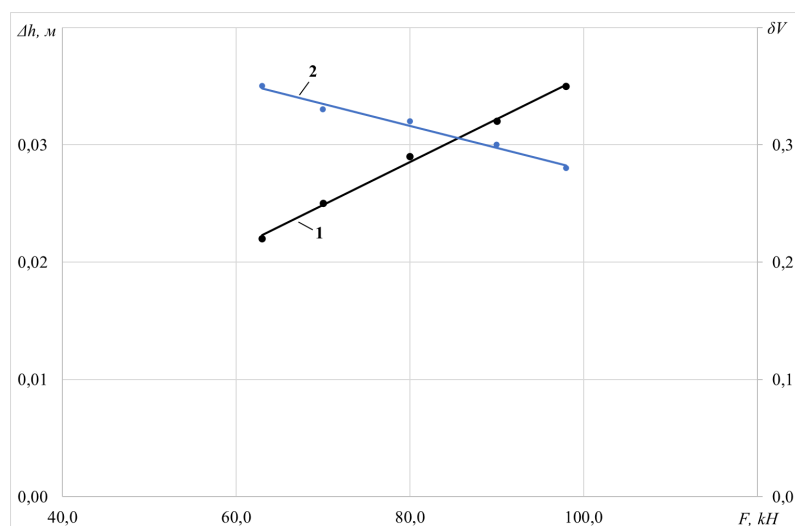


Рисунок 6 – Графіки зміни поздовжньої деформації Δh (м) та відносної зміни об'єму δV експериментальних зразків із подрібненої породи від величини зовнішньої сили F (кН) в умовах одновісного стиснення: 1 - Δh (м); 2 - δV .

На рис.7 наведено графік зміни роботи стиснення A (Дж) експериментальних зразків із подрібненої породи різного первісного об'єму V (м³).

З графіка видно, що зі збільшенням об'єму зразків робота стиснення збільшується за лінійною залежністю (рис.7).

На рис.8 наведено графіки зміни питомої потенціальної енергії деформації $\frac{\sigma^2}{2E_g}$ та коефіцієнта ущільнення купл. подрібненої породи різного первісного об'єму V (м³) в умовах одновісного стиснення.

З графіка видно, що зі збільшенням початкового об'єму експериментальних зразків у 2 рази від $V = 0,00015$ м³ до $V = 0,003$ м³, питома потенціальна енергія деформації збільшується від $\frac{\sigma^2}{2E_g} = 4,42$ МДж/м³ до $\frac{\sigma^2}{2E_g} = 5,55$ МДж/м³, тобто приблизно на 20% (рис.8,

залежність 1). Коефіцієнт ущільнення подрібненої породи зі збільшенням початкового об'єму експериментальних зразків зменшується від $k_{уш} = 1,5$ до $k_{уш} = 1,42$ (рис.8, залежність 2).

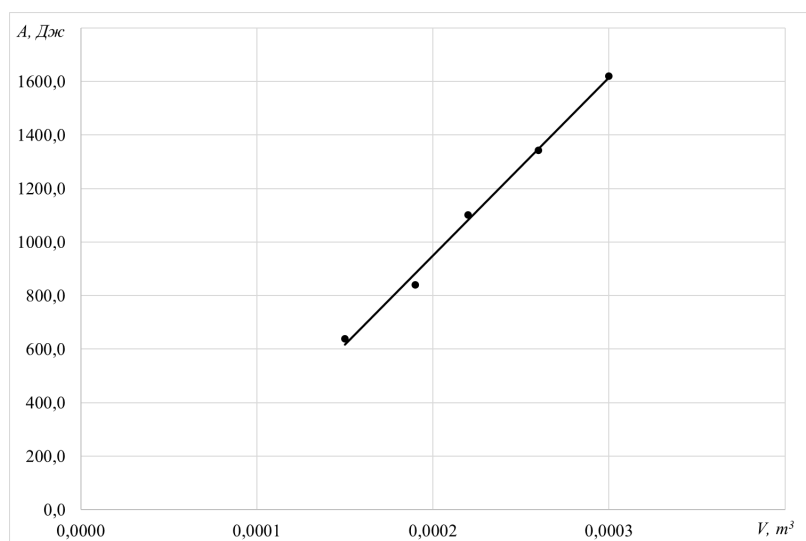


Рисунок 7 – Графік зміни роботи стиснення A (Дж) експериментальних зразків із подрібненої породи різного первісного об'єму V (м³).

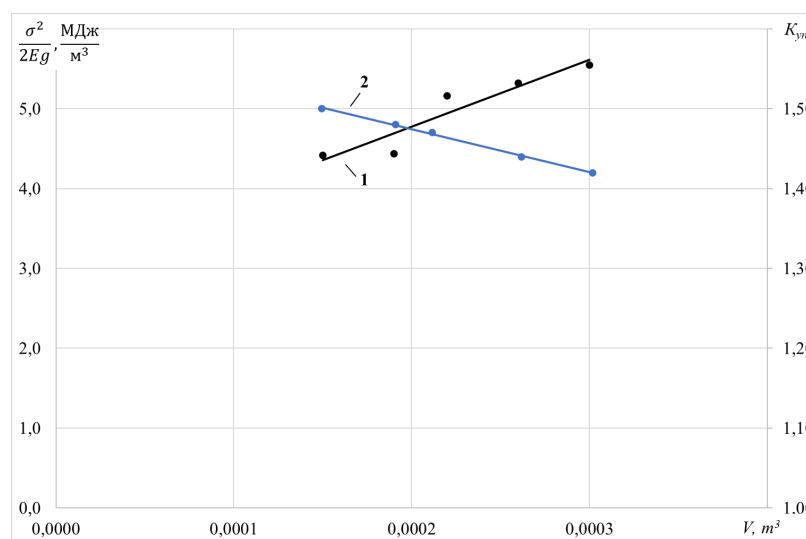


Рисунок 8 – Графіки зміни питомої потенціальної енергії деформації $\frac{\sigma^2}{2E_g}$ і коефіцієнта ущільнення купл подрібненої породи різного первісного об'єму V (м³) в умовах одновісного стиснення: 1 – $\frac{\sigma^2}{2E_g}$, 2 – $k_{уш}$.

Обговорення результатів. У цих дослідженнях виконано зіставлення деформаційних властивостей охоронних споруд на експериментальних зразках (табл.1). Площа поперечного перерізу експериментальних зразків до одновісного стиску не змінювалася. Розглядалися зразки у вигляді ціликів вугілля, коли їх товщина змінювалася від $h_0 = 0,032$ м до $h_0 = 0,063$ м та конструкції з подрібненої породи, зі зміною потужності породного шару від $h_0 = 0,032$ м до $h_0 = 0,063$ м (табл.1). Підбір

еквівалентних матеріалів відповідав вимогам табл. 2,3, вир. (2), а межу міцності моделей визначали з вир. (1).

Експериментально встановлено, що при збільшенні товщини ціликів у 2 рази, у межах безпечного деформаційного ресурсу, що визначається межами зміни відносної деформації зразків $0,18 \leq \lambda \leq 0,23$, забезпечується їх стійкість та несуча здатність (рис.1). У цьому випадку жорсткість ціликів зі збільшенням параметра h_0 зменшується на 17% при відносній зміні об'єму $0,07 \leq \delta V \leq 0,09$.

Зміна відносної деформації охоронних споруд у вигляді ціликів вугілля визначає критичні рівні питомої потенціальної енергії деформації у вигляді лінійної залежності між параметрами $\frac{\sigma^2}{2E_g}$ і V . Перевищення цього рівня, в середньому на 12-14%, спричиняє руйнування охоронних ціликів вугілля, зниження їхньої несучої здатності. При цьому в процесі деформування, жорсткість охоронних споруд зменшується одночасно з модулем деформації (табл.5). Встановлені деформаційні характеристики ціликів вугілля обмежують область застосування даного способу охорони і, в першу чергу, через безпечний деформаційний ресурс, що знаходиться у вузьких межах ($0,18 \leq \lambda \leq 0,23$).

Для охоронних споруд із подрібненої породи різного гранулометричного складу (табл.3), зі збільшенням потужності породного шару h_0 в 2 рази за відносної зміни об'єму вихідного матеріалу в діапазоні значень $0,35 \leq \delta V \leq 0,28$, значення коефіцієнта ущільнення зменшується від $k_{ущ} = 1,5$ до $k_{ущ} = 1,42$. Причому максимальні значення $k_{ущ} = 1,5$ відповідають максимальній відносній зміні об'єму $\delta V = 0,35$, а мінімальні значення $k_{ущ} = 1,42$, відповідають мінімальному значенню $\delta V = 0,28$. При цьому одночасно з роботою стиснення в межах деформаційного ресурсу, коли відносна деформація закладного матеріалу знаходиться в діапазоні значень $0,55 \leq \lambda \leq 0,68$, фіксується зростання на 20% питомої потенціальної енергії деформації. У таких умовах за різних значень поздовжньої деформації Δh , забезпечується ідентична жорсткість закладного матеріалу при будь-яких значеннях параметра h_0 (м). Для конструкцій з подрібненої породи збільшення питомої потенціальної енергії деформації спрямоване на ущільнення подрібненої породи і забезпечення несучої здатності закладного матеріалу. Однак із збільшенням потужності породного шару коефіцієнт ущільнення зменшується, а робота стискання збільшується.

Таким чином, для забезпечення стійкості бічних порід у вуглепородному масиві з підготовчими виробками, коли необхідно обмежити переміщення бічних порід у виробленому просторі та забезпечити експлуатаційний стан конвеєрних штреків, доцільно використання часткового або повного закладання виробленого простору. Використання ціликів вугілля для охорони виробок нераціонально через обмежений безпечний деформаційний ресурс охоронних споруд. Крім того, залишення ціликів вугілля супроводжується втратами корисних копалин у надрах, що економічно невиправдано.

Висновки

1. Для охоронних споруд у вигляді ціликів вугілля постійної площі поперечного перерізу S (м²), яка контактує з покрівлею та підшвою у виробленому просторі вуглепородного масиву при збільшенні їх товщини h_0 (м) у 2 рази та дії зовнішнього статичного навантаження, що змінюється за лінійною залежністю та призводить в умовах одновісного стиснення до зниження на 15% жорсткості, у межах безпечного деформаційного ресурсу, тобто в діапазоні значень відносної деформації $0,18 \leq \lambda \leq 0,23$ та відносної зміни об'єму $0,07 \leq \delta V \leq 0,09$, забезпечується стійкість охоронних споруд. Такий стан відповідає граничному рівню значень питомої потенціальної енергії деформації. Перевищення цього рівня в середньому на 12-14% викликає руйнування деформованого тіла та зниження його несучої здатності.

2. Для охоронних споруд із подрібненої породи різного гранулометричного складу (з можливістю бічного розширення вихідного матеріалу) постійної площі поперечного перерізу S (м^2), яка контактує з покрівлею та підшвою у виробленому просторі вуглепородного масиву та збільшенні потужності породного шару h_0 (м) в 2 рази в умовах одновісного стиснення вихідного матеріалу та відносної зміни об'єму $0,35 \leq \delta V \leq 0,28$, значення коефіцієнта ущільнення зменшується від $k_{\text{ущ}} = 1,5$ до $k_{\text{ущ}} = 1,42$ з одночасним збільшенням роботи стиснення і зростанням більше 20% питомої потенціальної енергії деформації, за рахунок чого при різних значеннях поздовжньої деформації Δh (м) охоронних споруд забезпечується ідентична жорсткість закладних матеріалів та їхня несуча здатність.

Список літератури:

1. Терещук Р.Н., Лозовский С.П. Устойчивость подготовительных выработок с неустойчивой почвой в зоне влияния очистных работ. МОН Украины; Нац. горн. ун-т. Д.: НГУ, 2014. 104с. ISBN978-966-350-466-7.
2. Чепіга Д.А. Обґрунтування та розробка способів підвищення безпеки праці гірників у виїмкових дільницях глибоких шахт. Автореф. дис. ... к.т.н. 05.26.01, ДВНЗ «ДонНТУ», Покровськ, 2019. – 24 с.
3. Охрана подготовительных выработок целиками угля на угольных шахтах/ В.Б. Артемьев, Г.И. Коршинов, А.К. Логинов. СПб Наука, 2009. 299 с. ISBN978-5-0202-5377-3.
4. Фекмистов Ю.Г., Головин А.Д. Обоснование распределения давления на целики в осадочных горных породах/ Литосфера, 2015. №6. – с.130-135
5. Бойченко Г.Є., Ткачук О.М. Дослідження деформаційних характеристик ціликів вугілля як охоронних споруд підготовчих виробок/ Вісті Донецького гірничого інституту. №2, 2022. с.14-24 <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2022-2-14-24>
6. Колодирівко А.А. Перспективы применения безцеликовых схем подготовительных пластов при ограниченных объемах шахтного строительства/ Горная механика. №4, 2008. с. 41-51.
7. Iordanov I., Buleha I., Bachurina Ya., Boichenko H., Kayun O., Kohtieva O., Podkopayev Ye. Experimental research on the haulage in steeply dipping seams/ Mining of Mineral Deposits. 2021. Vol. 15 No.4 P.56-67. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.056>
8. Раевский Д.И. Особенности охраны и поддержания подготовительных выработок в условиях Восточного Донбасса // Записки горного ин-та. 2002. т.152. с.142-144
9. Аксенов А.В., Васютин В.В., Пивень Ю.А. Совершенствование безцеликовых способов охраны подготовительных горных выработок/ Наукові праці УкрНДМІ НАН України, №1, 2007. с.94-101
10. Временный технологический регламент по охране подготовительных выработок угольных шахт литыми полосами из твердеющих материалов/ А.Ф. Булат [и др.]. Днепропетровск: РИА «Днепр-VAL», 2004. 33 с.
11. Яланский А.А., Слащев И.Н., Слащева Е.А., Селезнев А.М., Арестов В.В. Разработка новых способов охраны подготовительных горных выработок литыми полосами/ Геотехническая механика. 2018. - №141. –с.3-17 <https://doi.org/10.15407/geotm2018.141.003>
12. Ильяшов М.А., Байсаров Л.В. Новые технологические решения в охране концевых участков высоконагруженных лав/ Геотехническая механика. Днепропетровск. ИГТМ НАНУ, 2006. №1. – с.79-92.
13. Долгий И.Е. Устойчивость подготовительных выработок в условиях активного проявления горного давления// Устойчивость и крепление горных выработок: Межвуз. сб. научн. тр./ Санкт-Петербургский горный ин-т, СПб, 1999. с.62-73.
14. Podkopaiev S., Gogo V., Yefremov I., Kipko O., Iordanov I., Simonova Yu. Phenomena of stability of coal seam root with yielding support/ Mining of Mineral Deposits. 2019. Vol. 13. №4 P.28-41. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.028>
15. Якоби О. Практика управления горным давлением. М.: Недра, 1987. – 566 с.
16. Исследование проявления горного давления в подготовительных выработках с учетом жесткости охранных сооружений/ С.В. Подкопаев, Е.И. Конопелько, Д.А. Чепига, И.В. Иорданов, И.Н. Смоланов// Вісті Донецького гірничого ін-ту. №1, 2018 с.84-95. doi:10.31474/1999-981x-2018-1-84-95
17. Циглер Ф. Механика твердых тел и жидкостей. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая механика». 2002. 912 с.
18. Мешков Ю.Я. Концепция критической плотности энергии в моделях разрушения твердых тел. Успехи физики металлов. 2001, Т.2. с. 7-50. DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.02.01.007>

19. Ступишин Л.Ю. Вариационный критерий критических уровней внутренней энергии деформируемого тела // Промышленное и гражданское строительство. 2011. №8. с. 21-23.

References

1. Tereshuk R.N., Lozovskij S.P. Ustojchivost podgotovitelnyh vyrabotok s neustojchivoj pochvoj v zone vliyaniya ochistnyh rabot. MON Ukrainy; Nac. gorn. un-t. D.: NGU, 2014. 104. ISBN978-966-350-466-7.
2. Chepiga D.A. Obgruntuvannya ta rozrobka sposobiv pidvishennya bezpeki praci girnikiv u viyimkovih dilnicyah glibokih shaht. Avtoref. dis. ... k.t.n. 05.26.01, DVNZ «DonNTU», Pokrovsk, 2019. – 24 s.
3. Ohrana podgotovitelnyh vyrabotok celikami uglya na ugolnyh shahtah/ V.B. Artemev, G.I. Korshinov, A.K. Loginov. SPb Nauka, 2009. 299. ISBN978-5-0202-5377-3.
4. Fekmistov Yu.G., Golovin A.D. Obosnovanie raspredeleniya davleniya na celiki v osadochnykh gornykh porodah/ Litosfera, 2015. №6. 130-135.
5. Bojchenko G.Ye., Tkachuk O.M. Doslidzhennya deformacijnih harakteristik cilikov vugillya yak ohoronnih sporud pidgotovchih virobok/ Visti Doneckogo girnichogo institutu. №2, 2022.14-24. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2022-2-14-24>
6. Kolodrivko A.A. Perspektivy primeneniya bezcelikovykh shem podgotovitelnyh plastov pri ogranichennoy obemah shahtnogo stroitelstva/ Gornaya mehanika. №4, 2008. 41-51.
7. Iordanov I., Buleha I., Bachurina Ya., Boichenko H., Kayun O., Kohtieva O., Podkopayev Ye. Experimental research on the haulage in steeply dipping seams/ Mining of Mineral Deposits. 2021. Vol. 15 No.4 56-67. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.056>
8. Raevskij D.I. Osobennosti ohrany i podderzhaniya podgotovitelnyh vyrabotok v usloviyah Vostochnogo Donbassa // Zapiski gornogo in-ta. 2002. t.152. 142-144
9. Aksenov A.V., Vasyutina V.V., Piven Yu.A. Sovershenstvovanie bezcelikovykh sposobov ohrany podgotovitelnyh gornykh vyrabotok/ Naukovi praci UkrNDMI NAN Ukraini, №1, 2007. 94-101
10. Vremennyj tehnologicheskij reglament po ohrane podgotovitelnyh vyrabotok ugolnyh shaht litymi polosami iz tverdeyushih materialov/ A.F. Bulat [i dr.]. Dnepropetrovsk: RIA «Dnepr-VAL», 2004. 33.
11. Yalanskij A.A., Slashev I.N., Slasheva E.A., Seleznev A.M., Arestov V.V. Razrabotka novykh sposobov ohrany podgotovitelnyh gornykh vyrabotok litymi polosami/ Geotekhnicheskaya mehanika. 2018. - №141. 3-17 <https://doi.org/10.15407/geotm2018.141.003>
12. Ilyashov M.A., Bajsarov L.V. Novye tehnologicheskie resheniya v ohrane koncevnykh uchastkov vysokonagruzhennykh lav/ Geotekhnicheskaya mehanika. Dnepropetrovsk. IGTM NANU, 2006. №1. – s.79-92.
13. Dolgij I.E. Ustojchivost podgotovitelnyh vyrabotok v usloviyah aktivnogo proyavleniya gornogo davleniya// Ustojchivost i kreplenie gornykh vyrabotok: Mezhdvuz. sb. nauchn. tr./ Sankt-Peterburgskij gornyj in-t, SPb, 1999. 62-73.
14. Podkopaiev S., Gogo V., Yefremov I., Kipko O., Iordanov I., Simonova Yu. Phenomena of stability of coal seam roof with yielding support/ Mining of Mineral Deposits. 2019. Vol. 13. №4 28-41. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.028>
14. Yakobi O. Praktika upravleniya gornym davleniem. M.: Nedra, 1987. – 566 s.
15. Issledovanie proyavleniya gornogo davleniya v podgotovitelnyh vyrabotkakh s uchedom zhestkosti ohrannykh sooruzhenij/ S.V. Podkopaev, E.I. Konopelko, D.A. Chepiga, I.V. Iordanov, I.N. Smolnov// Visti Doneckogo girnichogo in-tu. №1, 2018.84-95. doi:10.31474/1999-981x-2018-1-84-95
16. Cigler F. Mehanika tverdyh tel i zhidkostej. Izhevsk: NIC «Regulyarnaya i haoticheskaya mehanika». 2002. 912.
17. Meshkov Yu.Ya. Konceptiya kriticheskoy plotnosti energii v modelyakh razrusheniya tverdyh tel. Uspehi fiziki metallov. 2001, T.2. 7-50. DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.02.01.007>
18. Stupishin L.Yu. Variacionnyj kriterij kriticheskikh urovnej vnutrennej energii deformiruемого tela // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. 2011. №8. 21-23.

Надійшла до редакції 16.05.2023

O. Tkachuk, V. Hnatiuk

COMPARISON OF DEFORMATION PROPERTIES OF PROTECTIVE STRUCTURES OF PREPARATORY MINING ROADWAYS ON EXPERIMENTAL SAMPLES

Purpose. Investigate and compare the deformation properties of protective structures in the form of coal pillars and structures made of crushed rock for a justified choice of the

protection method, which can make it possible to ensure the stability of side rocks in the coal massif and preparatory works in the mining areas in the coal mine.

Methodology. To achieve the goal, laboratory studies were performed on experimental samples subjected to uniaxial compression. For pillars, their thickness was changed, whereas for structures made of crushed rock the thickness of the rock layer was changed at a constant cross-sectional area.

Results. As a result of the conducted research, the deformation properties of protective structures that were subjected to uniaxial compression have been determined. A 15% reduction in their stiffness was recorded for pillars, when their thickness h_0 was two times changed, and for the external static load, which varied according to a linear dependence. Within the limits of the safe deformation resource, when the relative deformation is in the range of values $0.18 \leq \lambda \leq 0.23$, the stability of the pillars and their bearing capacity is ensured. At the same time, the relative change in their volume should not exceed 7-9%. It has been established that exceeding the limit level of the specific potential energy of deformation by an average of 12-14% causes the destruction of coal pillars. For protective structures made of crushed rock with a relative volume change of $0.35 \leq \delta V \leq 0.28$, the value of the compaction coefficient of the original material decreases from $k_{cons} = 1.5$ to $k_{cons} = 1.42$ with a simultaneous increase in the work of compression and an increase of more than 20% in the specific potential energy of deformation, thanks to which the rigidity of the embedded material and the bearing capacity of protective structures made of crushed rock are ensured.

Scientific novelty. The regularities of formation of deformation properties of protective structures under conditions of uniaxial compression, taking into account the change in the specific potential energy of deformation and the relative change in their volume, have been established.

Practical significance. In order to ensure the stability of side rocks in the coal massif and preparatory workings at excavation sites in the coal mine, the feasibility of using partial or complete paving of the produced space from crushed rock, which limits the movement of side rocks in the produced space, has been substantiated.

Keywords: protective structures, uniaxial compression, coal pillars, crushed rock, specific potential energy of deformation, compaction coefficient.

Ткачук Олександр Миколайович – головний інженер СО ПАТ «Донбасенерго» «Електроремонт», (вул. Січових Стрільців, 9, м. Миколаївка, 84180, Донецька обл., Україна)

e-mail: tkachuk5050@gmail.com

Гнатюк Віталій Валерійович – аспірант кафедри управління гірничим виробництвом і охорони праці Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (вул. Потебні, 56, м. Луцьк, 43003, Волинська область, Україна)

e-mail: vitalii.hnatiuk@donntu.edu.ua

Oleksandr Tkachuk – chief engineer of Structural Unit of PJSC «Donbasenergo» «Elektroremont» (Sichovykh Striltsiv str., 9, Mykolaivka, 84180, Donetsk oblast, Ukraine).

e-mail: tkachuk5050@gmail.com

Vitalii Hnatiuk – graduate student of the Department of Mining Management and Labor Protection; State Higher Educational Institution "Donetsk National Technical University" (Potebni St., 56, Lutsk, 43003, Volyn oblast, Ukraine).

e-mail: vitalii.hnatiuk@donntu.edu.ua

УДК 622.268.6:622.838:331.45

DOI: <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-166-177>

Чепіга Д.А., Левіт В.В., Кіпко О.Е., Гого В.Б., Кружилко О.Є.

ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ ЩОДО БЕЗПЕЧНОЇ РОЗРОБКИ КРУТИХ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ

Мета. Обґрунтування заходів щодо безпечної розробки крутих вугільних пластів для забезпечення ефективності вуглевидобутку та підвищення безпеки праці гірників у глибоких вугільних шахтах.

Методика. Для досягнення поставленої мети були виконані лабораторні дослідження деформаційних властивостей охоронних споруд на моделях, які піддавались однобічному стисканню, та натурні дослідження стійкості підготовчих гірничих виробок при різних способах охорони.

Результати. Встановлено, що для ціликів вугілля в межах встановленого деформаційного ресурсу ($0,1 \leq \lambda \leq 0,25$) одночасно з підвищенням їх жорсткості, потенціальна енергія деформації досягає критичного рівня, на якому реалізується короточасна стійкість охоронних споруд. При цьому відбувається відносна зміна об'єму в діапазоні $0,05 < \delta V < 0,1$. Зі збільшенням статичного експлуатаційного навантаження та при переході критичного рівня деформації, коли $\lambda > 0,25$ і $\delta V > 0,1$, настає втрата стійкості ціликів.

Для охоронних споруд із подрібненої породи при їх однобічному стисканні, зміна поведінки деформованого тіла відбувається при ущільненні первинного матеріалу. В межах деформаційного ресурсу ($0,4 \leq \lambda \leq 0,7$) зафіксовано відносну зміну об'єму подрібненої породи $0,2 < \delta V < 0,35$. Зі збільшенням розмірів таких охоронних споруд, коли робота стиснення зростає, величина δV зменшується. При цьому несуча здатність охоронних споруд підвищується.

Наукова новизна. Деформаційний ресурс охоронних споруд підготовчих гірничих виробок визначає ефективність способу охорони, який застосовується. В межах деформаційного ресурсу забезпечується стійкий стан охоронних споруд, який діє в умовах однобічного стиснення до досягнення критичного рівня питомої потенціальної енергії деформації.

Практичне значення. Для забезпечення стійкості бічних порід у вуглепородному масиві та експлуатаційного стану підготовчих виробок на виїмкових ділянках, доцільно використання часткового або повного закладання виробленого простору подрібненою породою або дерев'яних кострів зі шпал.

Ключові слова: вуглепородний масив, вуглевидобуток, охоронні споруди, подрібнена порода, виїмкова ділянка, безпечна розробка вугільних пластів, стиснення.

Вступ. Досвід роботи глибоких шахт показує, що в результаті ведення гірничих робіт у вуглепородному масиві, в якому пройдені виробки, починає проявлятися такий природний фактор, як розшарування бічних порід, що приводить з плином часу до зсуву породної товщі та її обваленням. В умовах розробки крутих вугільних пластів при відсутності для розшарованих порід покрівлі ефективного підпору з боку виробленого простору, небезпека виникнення аварійних ситуацій від обвалень збільшується. При цьому, мають місце травмування гірників, пошкодження гірничошахтного обладнання та завали гірничих виробок. В таких умовах відбуваються прості очисних вибоїв і зниження об'ємів видобутку вугілля.

Детальний аналіз наукових досліджень вітчизняних і закордонних фахівців, умов розробки вугільних пластів та аварій, що трапились на вугільних шахтах в період 2000-2022 рр., пов'язаних з обваленнями бічних порід, дозволяє зробити висновок про те, що основними причинами незадовільного стану гірничих виробок та їх завалів є недостатня вивченість природи обвалень розшарованої породної товщі, а також прийняття помилкових технічних рішень при виборі способу управління гірським тиском в очисному вибої та охороні відкатних штреків. В складних умовах експлуатації крутих пластів від правильного вибору способу охорони виробок та параметрів охоронних споруд залежить безпека робіт і ефективність вуглевидобутку. Тому збереження підготовчих виробок в експлуатаційному стані є актуальним завданням. Вирішення

цього завдання можливо при дослідженні деформаційних властивостей охоронних споруд відкатних штреків, які зумовлюють стійкість бічних порід у вуглепородному масиві.

Вивчення природи та особливостей обвалень бічних порід, як різновидів небезпечних проявів гірничого тиску і на основі цього розробка ефективних заходів для збереження гірничих виробок у експлуатаційному стані, сприятиме створенню умов безпечного ведення робіт у глибоких шахтах, що розробляють вугільні пласти крутого залягання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Безпека і ефективність роботи вугільної шахти залежить від стану підготовчих виробок. Будучи транспортними та вентиляційними магістралями, вони забезпечують доступ до запасів вугілля, безперервність і надійність роботи підземного комплексу шахти.

Зі збільшенням глибини гірничих робіт, розробка крутих вугільних пластів ускладняється гірничо-геологічними умовами, до яких треба відносити наявність нестійких вміщуючих порід, та тим, що способи управління гірським тиском і охорони гірничих виробок, які застосовуються, у більшості випадків, не дозволяють ефективно використати розвантаження вуглепородного масиву, в якому проведені виробки, від негативних проявів гірничого тиску. Усе це є причинами обвалень розшарованої породної товщі, завалів гірничих виробок і травматизму. Відмінність безпосередніх причин травматизму від обвалів обов'язково вимагає застосування різноманітних способів їх запобігання, у тому числі, і за рахунок застосування закладання виробленого простору.

Аналіз виробничого травматизму в галузях промисловості України показує, що найбільш небезпечною є вугільна промисловість. [1] Таке положення обумовлено ускладненням гірничо-геологічних умов відпрацювання вугільних пластів зі збільшенням глибини ведення робіт. По вугільній галузі у 2021р. виробничий травматизм розподілився таким чином: 41% нещасних випадків сталися в очисних вибоях; 19% - в підготовчих вибоях і 43% - у протяжних гірничих виробках. Пофакторний аналіз травматизму в галузі показує, що значна частина травматизму (42%), що мала місце в підземних умовах, пов'язана з обваленнями породи.

Досвід роботи на пластах крутого залягання за умови проведення гірничих виробок, де для їх охорони застосовувалися дерев'яні споруди (кусти зі стійок) або залишали цілики вугілля, вказує на те, що там спостерігалися обвалення порід покрівлі, що призводило до завалів виробок. Вивчення випадків завалів штреків на пластах крутого падіння та травматизму гірників свідчить про те, що найбільше число завалів (понад 60%), відбувається на сполученні штреку з лавою. Досить велика кількість завалів гірничих виробок приходить на випадки, коли проведення штреків здійснювалося в бічних породах нижче середньої стійкості. З огляду на особливості обвалень бічних порід в таких умовах розробки, можна вважати, що застосовувані нині способи охорони підготовчих виробок не завжди забезпечують їх стан, який відповідає вимогам правил безпеки [2, 3].

Однією з основних причин погіршення стійкості підготовчих виробок та збільшення витрат на їх підтримання в експлуатаційному стані є недостатня вивченість геомеханічних процесів, що протікають у вуглепородному масиві під час розвантаження. При практикованих способах охорони, характер процесів деформування та руйнування бічних порід в масиві обумовлюється напруженим станом та перерозподілом напружень в результаті ведення гірничих робіт. Така геомеханічна обстановка навколо відкатних штреків у вуглепородному масиві обумовлюється також деформаційно-міцнісними характеристиками охоронних споруд, які змінюються з урахуванням гірничо-геологічних та гірничо-технічних факторів. Слід зазначити, що структура, склад та

міцнісні властивості бічних порід у межах виїмкової ділянки, як правило, змінюються, що суттєво впливає на стійкість виробок. [3, 4, 5] Встановлення величин зміщень порід на контурі підготовчих виробок, визначення швидкості їх протікання з урахуванням деформаційних властивостей охоронних споруд, а також правильне розуміння при цьому особливостей геомеханічних процесів дозволить обґрунтувати вибір раціонального способу охорони в конкретних гірничо-геологічних умовах і підвищити рівень безпеки праці гірників на виїмкових ділянках глибоких шахт з крутим заляганням вугільних пластів.

Дослідженнями ДонВУГІ і ДонНТУ раніше було встановлено, що закладний масив сприяє запобіганню розвитку зрушень розшарованої товщі навколо очисного вибою і створює зони стійкості порід у вуглепородному масиві [6]. Механізм взаємодії закладного масиву з осідаючими породами, полягає у зниженні тріщиноутворення покрівлі. Очевидно, що за рахунок застосування часткового або повного закладання виробленого простору можна забезпечити стійкість виробок і попередити обвалення бічних порід у виробленому просторі виїмкової ділянки.

Природа покращення стану бічних порід при закладанні виробленого простору пояснюється характером взаємодії покрівлі або підшви пласта з закладним масивом, що розробляється, і має місце тільки за його певних параметрів [6, 7]. Це не може бути віднесено тільки до впливу зменшення ефективної потужності пласта. За однакової ефективної потужності, але при відпрацюванні лав із повним обваленням або повним закладанням виробленого простору, не спостерігається однакова геомеханічна картина у вуглепородному масиві [6, 8].

Практика використання безціликових способів відпрацювання виїмкових ділянок на крутому падінні показала, що при невідповідності деформаційних характеристик охоронних споруд міцнісним властивостям бічних порід у вуглепородному масиві, неможливо забезпечити експлуатаційний стан підготовчих виробок. Тому є доцільним вивчення впливу деформаційних характеристик охоронних споруд на стійкість бічних порід і збереження штреків на виїмковій ділянці. Вирішення цих питань дозволить обґрунтовувати заходи щодо підвищення вуглевидобутку на вугільних шахтах та безпеки праці гірників на виїмкових ділянках.

Мета статті. Для обґрунтування заходів щодо безпечної розробки крутих пластів у вугільних шахтах виконати порівняльний аналіз деформаційних характеристик охоронних споруд підготовчих гірничих виробок при розвантаженні вуглепородного масиву.

Методи дослідження. Експериментальні моделі були представлені ціликами вугілля та охоронними спорудами із подрібненої породи. Моделі мали форму прямокутного паралелепіпеда.

Розміри експериментальних зразків охоронних споруд, враховуючи їх довжину a (м) та ширину b (м) відповідали відношенню $a/b=(1-2)$. Масштаб моделювання $M1:25$.

Експериментальні зразки у вигляді ціликів вугілля мали коефіцієнт Пуассона $\nu=0,3$. В охоронних спорудах із подрібненої породи використовувались частинки різних розмірів. Коефіцієнт неоднорідності подрібненої породи $k_n=4,8$. Ситовий аналіз подрібненої породи виконаний у відповідності до [9]. Насипна густина подрібненої породи $\rho_{н.п.}=1790 \text{ кг/м}^3$ з порожнинністю $M=15 \%$. Коефіцієнт Пуассона $\nu=0,25$. [10]

Породи покрівлі і підшви моделювались у вигляді плити довжиною $l_n=0,3\text{м}$, шириною $b_n=0,1\text{м}$ і товщиною $h_n=0,03\text{м}$. Для забезпечення механічної подібності моделі і натури, було відмовлено у рівності вагових параметрів, що цілком допустимо. [11]

Експериментальні зразки охоронних споруд піддавалися одновісному стиску на пресі П-50 в лабораторії гірничого тиску ДонНТУ. При проведенні досліджень моделі встановлювали між покрівлею, підшвою і металевими плитами преса. Зразки

піддавалися безперервній поступовій деформації до моменту втрати стійкості для ціликів вугілля і повного стиснення закладного матеріалу для охоронних споруд з подрібненої породи. В ході експериментів реєструвалась залежність між стискаючою силою F (кН) і зменшенням висоти зразка h (м).

В умовах одновісного стиску, відносна деформація експериментальних зразків визначалась за виразом [12]

$$\lambda = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (1)$$

де Δh – величина деформації зразка;

h_0 – початкова висота зразка, м.

Відносна зміна об'єму δV експериментальних зразків в умовах одновісного стиску, визначалась за виразом [13]

$$\delta V = (1 - 2\nu) \cdot \lambda. \quad (2)$$

Механічне напруження σ (Н/м²), яке в умовах одновісного стискання вважається тиском, визначалося за виразом [14]

$$\sigma = \frac{F}{S},$$

де S – площа поперчного перетину експериментального зразку, яка контактує з покрівлею та підшвою, м².

Кількість енергії U (Дж), яка запасена зразком, може бути визначена за виразом [14, 15]

$$U = \frac{\sigma^2}{2E_g} \cdot V, \quad (3)$$

де $\frac{\sigma^2}{2E_g}$ – щільність енергії або питома потенціальна енергія, Дж/м³.

E_g – модуль деформації охоронних споруд, Н/м².

При деформації експериментальних зразків, робота зовнішніх сил витрачається на зміну об'єму і форми.

Натурні дослідження проводилися в умовах ДП «Торецьквугілля» на шахтах «Торецька» та «Центральна». При проведенні експериментальних спостережень у відкатному штреку, на спеціально обладнаних замірних станціях, за допомогою маркшейдерської рулетки, встановлювалась величина зближення реперів один відносно одного, по найбільш характерним для крутопохилого і крутого падіння напрямками. Схеми замірних станцій представлені на рис. 1.

В умовах шахти «Торецька» натурні дослідження проводилися у відкатному штреку пласта Із Мазурка горизонту 810 м на дільниці довжиною $l=70$ м, коли штрек охороняли дерев'яними кострами та на дільниці довжиною $l=100$ м, при охороні штреку ціликами вугілля. Розмір ціликів $h=8$ м, $l_{\text{ц}}=5$ м, де h – висота цілика, м; $l_{\text{ц}}$ – ширина цілика, м; площа поперчного перетину штреку становила $S=8,2$ м².

Експерименти в умовах шахти «Центральна» були проведені у відкатному штреку пласта Із Мазурка горизонту 1146 м, на дільниці довжиною $l=55$ м при охороні штрека кустокострами і на дільниці, довжина якої $l=78$ м, коли виробки охороняли ціликами

вугілля. Розмір вугільних ціликів $h=8$ м, $l_{ц}=5$ м. Площа поперечного перетину штреку $S=8,5$ м².

Жорсткість C (Н/м) охоронних споруд у натурних умовах визначали за виразом [7]

$$C = \frac{F}{U_{1-4}},$$

де: U_{1-4} - зміщення покрівлі пласта, тобто переміщення репера 1 в напрямку репера 4, м;
 F – одинична сила, Н.

Слід зазначити, що параметр U_{1-4} (м) визначали при переміщенні репера 1 у напрямку репера 4, тобто відстань між реперами 1-4. (рис.1)

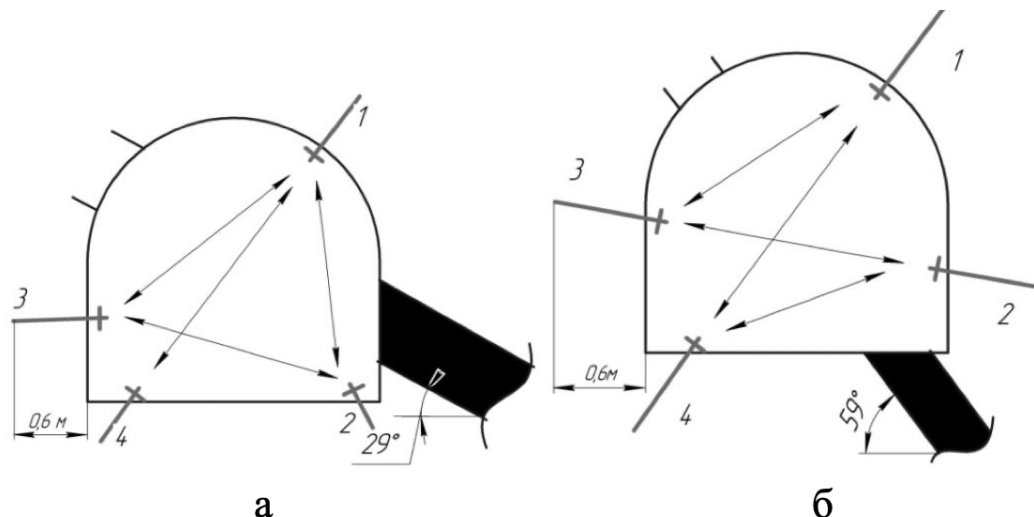


Рисунок 1 – Схеми замірних станцій для визначення зсувів бічних порід на перетині відкатного штреку, пройденого по пласту Із: а) на горизонті 810 м шахти «Торецька»; б) на горизонті 1146 м шахти «Центральна»; 1,2,3,4 – репера; 1-3, 1-4, 1-2, 2-3, 2-4 – зближення реперів 1,2 в напрямку реперів 3,4

Виклад основного матеріалу. Розглянемо результати досліджень деформаційних властивостей охоронних споруд на експериментальних моделях [16].

На рис. 2 представлені графіки зміни відносної деформації експериментальних зразків в умовах одновісного стиску від площі поперечного перетину. Із графіків (рис.2, крива 1) видно, що для моделі ціликів вугілля, зі збільшенням площі поперечного перетину від $S=0,0032$ м² до $S=0,016$ м², величина відносної деформації λ змінюється від $\lambda=0,14$ до $\lambda=0,25$ у вигляді функції логарифмічної залежності.

Для охоронних споруд із подрібненої породи, зі збільшенням площі поперечного перетину S , м², значення відповідної деформації λ зменшується. Між досліджуваними параметрами існує логарифмічна залежність (рис. 2, крива 2).

На рис. 3 приведені графіки зміни величини тиску і питомої потенціальної енергії в умовах одновісного стиску експериментальних зразків різної площі поперечного перетину.

Зафіксовано, що зі збільшенням зовнішньої сили і площі поперечного перетину експериментальних зразків від $S=0,0032$ м² до $0,016$ м², для ціликів вугілля тиск збільшується за лінійною залежністю ($R^2=0,94$) (рис. 3а, крива 1), а для охоронних споруд із подрібненої породи, зменшується за логарифмічною залежністю ($R^2=0,87$) (рис. 3б, крива 2).

Зміна потенціальної енергії деформування відбувається за логарифмічною залежністю (для ціликів вугілля $R^2=0,94$, для охоронних споруд із подрібненої породи $R^2=0,99$). Для ціликів вугілля фіксується збільшення від $\frac{\sigma^2}{2E_g}=0,44$ до $0,86$ МДж/м³ (рис. 3а, крива 1), для охоронних споруд із подрібненої породи від $\frac{\sigma^2}{2E_g}=4,41$ до $1,86$ МДж/м³ (рис. 3б, крива 2).

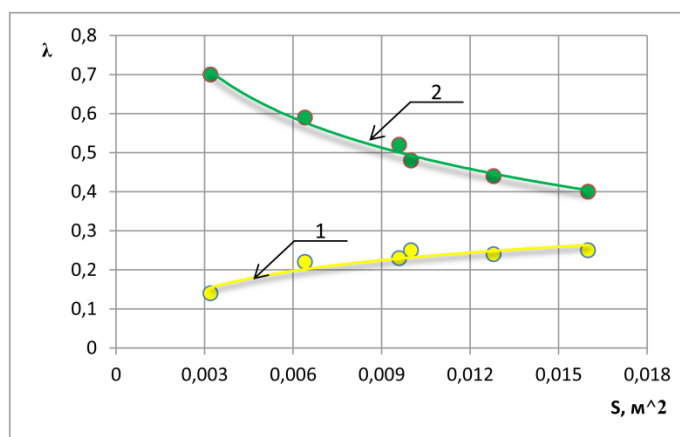


Рисунок 2 – Графіки зміни відносної деформації λ експериментальних зразків в умовах одновісного стиску від площі поперечного перетину S , м²: 1 – цілики вугілля; 2 – охоронні споруди із подрібненої породи

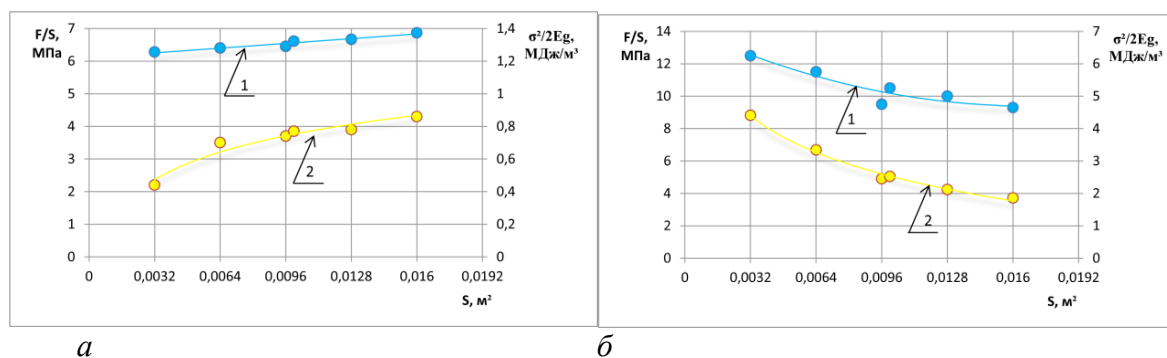


Рисунок 3 – Графіки зміни величини тиску F/S (МПа) і питомої потенціальної енергії в умовах одновісного стиску експериментальних зразків різної площі поперечного перетину S , (м²): а – цілики вугілля; б – охоронних споруд із подрібненої породи. 1 – F/S ; 2 – $\frac{\sigma^2}{2E_g}$

Встановлені закономірності зміни питомої потенціальної енергії деформування охоронних споруд, дозволять оцінити у межах деформаційного ресурсу споруджень. їх тримкість.

Розглянемо результати досліджень експериментів, які були проведені у натурних умовах при підтриманні підготовчих гірничих виробок на виїмкових дільницях.

Інструментальними спостереженнями [7] встановлено, що у відкатному штреку пласта І3 максимальні величини бічних зміщень порід на перетині підготовчої виробки, при її охороні дерев'яними кострами, відзначені на відстані $l=65$ м позаду очисного

вибою, в напрямку реперів 1-4 і 1-2. У цьому місці величина зближення реперів склала, відповідно, $U_{1-4}=340$ мм і $U_{1-2}=250$ мм. При охороні штреку ціликами вугілля, максимальні зміщення були зареєстровані на відстані $l=100$ м позаду лави, за напрямками 1-4 і 1-2, коли $U_{1-4}=440$ мм і $U_{1-2}=300$ мм.

Одночасно з реєстрацією зближення реперів на перетині виробки, по мірі посування лави, реєструвалася зміна площі поперечного перетину пластової підготовчої виробки S , (м^2). Для цього були виконані заміри ширини $B_{\text{ш}}$, (м) і висоти $H_{\text{ш}}$, (м) відкатного штреку. Зазначено, що при охороні штреку дерев'яними кострами, його перетин змінився з $S=8,2$ м^2 до $S=6,0$ м^2 на відстані $l=65$ м позаду лави. Втрата площі склала 27%. Надалі, конвергенція бічних порід на перетині відкатного штреку була відсутня. При використанні для охорони штреку ціликів вугілля, перетин штреку з $S=8,5$ м^2 змінився до $S=3,6$ м^2 на відстані $l=100$ м позаду лави. Втрата площі склала понад 50%.

В умовах шахти «Центральна», за результатами досліджень встановлено, що максимальні зміщення бічних порід на перетині відкатного штреку пласта І3 при охороні кустокострами, відзначені на відстані $l=55$ м позаду очисного вибою за напрямками 1-4 і 1-3, коли $U_{1-4}=350$ мм і $U_{1-3}=290$ мм. При переході на інший спосіб охорони – цілики вугілля, зближення реперів за цими напрямками склали, відповідно, $U_{1-4}=440$ мм і $U_{1-3}=320$ мм на відстані $l=75$ м позаду лави.

Аналізуючи зміну площі поперечного перетину штреку, було встановлено, що при охороні пластової підготовчої виробки кустокострами, перетин зменшився з $S=8,5$ м^2 до $S=6,8$ м^2 на відстані $l=55$ м позаду очисного вибою. Втрата площі склала 20%. При використанні ціликів вугілля, перетин штреку зменшився з $S=8,6$ м^2 до $S=5,2$ м^2 на відстані $l=75$ м позаду лави. Втрата площі склала 40%.

На рис. 4 наведені залежності, що відображають зміну жорсткості C , (Н/м) накатних кострів із шпал і ціликів вугілля, в умовах шахти «Торецька» та аналогічні залежності для умов шахти «Центральна», коли для охорони відкатного штреку використовувалися кустокостри і цілики вугілля.

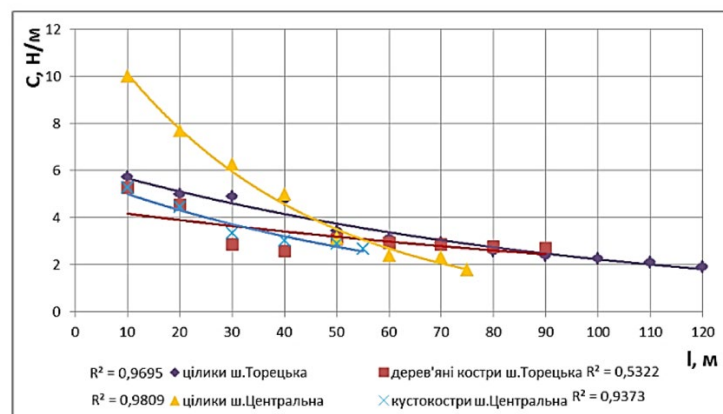


Рисунок 4 – Графіки зміни жорсткості C , (Н/м) охоронних споруд по довжині відкатного штреку l , (м) в умовах шахт "Торецька" і "Центральна"

Проведений комплекс експериментальних досліджень [7] дозволяє вважати, що для піддатливих охоронних споруд характерно повільне опускання осідаючої породної товщі, що робить можливим поступовий прогин бічних порід позаду очисного вибою, коли жорсткість опори зменшується відповідно до збільшення довжини штреку до

моменту її повного стиснення. В ході проведення експериментів зафіксовано, що при охороні штреку накатними кострами зі шпал, їх жорсткість змінюється від $C=5,2$ Н/м на відстані $l=10$ м, до $C=3,4$ Н/м на відстані $l=40$ м позаду очисного вибою. Надалі, за рахунок збільшення опірності піддатливої опори, опускання покрівлі припиняється. (рис. 4)

При застосуванні способу охорони виробок ціликами вугілля, в умовах шахти «Торецька», зафіксовано зменшення їх жорсткості на 50%, коли досліджувана величина змінюється від $C=5,8$ Н/м на відстані $l=10$ м до $C=2,9$ Н/м на відстані $l=75$ м позаду очисного вибою (рис. 4). В умовах шахти «Центральна», зменшення жорсткості ціликів склало 70%, при зміні їх жорсткості з $C=10$ Н/м на відстані $l=10$ м до $C=2,5$ Н/м на відстані $l=75$ м позаду очисного вибою (рис. 4).

Математична обробка отриманих експериментальних даних (рис. 4) дозволила встановити, що зміна жорсткості ціликів по довжині штреку має лінійну залежність, коефіцієнти якої обумовлені гірничо-геологічними умовами розробки вугільного пласта.

Обговорення результатів. Із результатів виконаних досліджень деформаційних характеристик охоронних споруд встановлено характер впливу деформаційних характеристик охоронних споруд на стійкість бічних порід і збереження підготовчих виробок у вуглепородному масиві. Для дослідження деформаційних характеристик охоронних споруд на моделях, використовували експериментальні зразки, які піддавались одновісному стиску. Площа поперечного перетину S (м²) зразків при відношенні довжини до ширини відповідала рівнянню $a/b=(1-2)$.

Для надштрекових ціликів вугілля або конструкцій із подрібненої породи, між зміною їх розмірів λ і питомою потенціальною енергією при стисненні, існує експоненційна залежність, що дозволяє у межах деформаційного ресурсу оцінити стан охоронних споруд (рис. 2)

При різній площі поперечного перетину експериментальних зразків, в діапазоні зміни відносної деформації для ціликів вугілля ($0,1 \leq \lambda \leq 0,25$) (рис. 2, крива 1) і охоронних споруд із подрібненої породи ($0,4 \leq \lambda \leq 0,7$) (рис. 2, крива 2), забезпечується їх стійкий стан і збільшення жорсткості. На цих інтервалах між величиною відносної деформації і зміною площі поперечного перетину охоронних споруд існує функціональна залежність, що дозволяє визначити їх деформаційний ресурс.

Для ціликів вугілля, в межах встановленого деформаційного ресурсу одночасно з підвищенням жорсткості, потенціальна енергія досягає критичного рівня, на якому реалізується короточасна стійкість охоронних споруд. В цих інтервалах зафіксована відносна зміна об'єму $0,05 \leq \delta V \leq 0,1$ охоронних споруд. Зі збільшенням статичного експлуатаційного навантаження та при переході критичного рівня, коли $\lambda > 0,25$ і $\delta V > 0,1$, форма експериментальних зразків змінюється і після втрати стійкості настає зменшення жорсткості ціликів.

Для охоронних споруд із подрібненої породи різного гранулометричного складу, в межах встановленого деформаційного ресурсу відбувається ущільнення подрібненої породи, як системи фракцій закладного матеріалу, після чого спостерігається підвищення їх жорсткості. В межах деформаційного ресурсу зафіксовано відносну зміну об'єму закладного матеріалу $0,2 \leq \delta V \leq 0,35$. Зі збільшенням розмірів таких охоронних споруд, при дії статичного навантаження, величина δV зменшується, а робота одновісного стиску збільшується, що пов'язано з ущільненням породи і створенням стійкої конструкції. Для охоронних споруд з подрібненої породи при їх одновісному стисненні, зміна поведінки деформованого тіла відбувається при ущільненні первинного матеріалу. При цьому одночасно зі зростанням модуля деформації відбувається зміна форми та об'єму піддатливої опори, за рахунок чого її жорсткість підвищується, а переміщення бічних порід обмежується.

Для охоронних споруд, які мають різну площу поперечного перерізу S , м^2 , та піддаються одновісному стиску, зі зростанням статичного навантаження та відносної деформації λ при збільшенні площі S , м^2 , зміна питомої потенціальної енергії $\frac{\sigma^2}{2E_g}$,

МДж/м³ відбувається за логарифмічною залежністю. В таких умовах для ціликів вугілля модуль деформації зменшується, а для конструкцій з подрібненої породи зростає. Цей процес, в межах деформаційного ресурсу застосовуваних охоронних споруд, дозволяє встановити їх тримкість (рис. 3)

Таким чином, можна підсумувати, що деформаційний ресурс охоронних споруд підготовчих виробок визначає ефективність застосовуваного способу охорони. Для ціликів вугілля деформаційний ресурс обмежений, що дозволяє короткочасно зберігати стійкий стан бічних порід у вуглепородному масиві, а значить цей спосіб має обмежену область застосування. Використання подрібненої породи для охоронних споруд, дозволяє забезпечити стійкість бічних порід навколо підготовчих виробок, і цей ефект зростає зі збільшенням розмірів охоронних споруд. Тому для збереження стійкості бічних порід у вуглепородному масиві та експлуатаційного стану підготовчих виробок доцільне застосування конструкцій з подрібненої породи.

На експериментальних дільницях, по довжині відкатного штреку, характер зрушення бічних порід на перетині пластової виробки з віддаленням від очисного вибою в бік виробленого простору, має однакову якісну картину, але відрізняється інтенсивністю. Проте, найбільші зміщення бічних порід зафіксовані по реперах з боку покрівлі пласта. З боку порід підосви пласта, при охороні виробки дерев'яними конструкціями, деформації були незначними. Однак, при охороні штреку ціликами вугілля, зміщення порід підосви відносно покрівлі збільшилися на 25-30%, в порівнянні з охороною виробок дерев'яними конструкціями. Згідно з результатами виконаних експериментальних досліджень відзначено, що у зоні активного впливу гірського тиску позаду лави між конвергенцією бічних порід на перетині штреку і зміною жорсткості охоронних споруд виникає стан, що характеризується залежністю, згідно якої жорсткість піддатливої опори гіперболічно зменшується, у протилежність відомому способу охорони штреків ціликами вугільного пласта, коли їх жорсткість лінійно зменшується по довжині виробки. Тому у виробках глибоких шахт для забезпечення їх експлуатаційного стану, необхідно використовувати піддатливі споруди, які зводяться над штреком, що робить можливим поступовий прогин осідаючої породної товщі позаду очисного вибою.

Висновок. На основі виконаних досліджень, які спрямовані на обґрунтування заходів щодо безпечної розробки крутих вугільних пластів, можна зробити наступні висновки:

1. На підставі порівняльного аналізу деформаційних характеристик охоронних споруд встановлена ефективність застосування конструкцій із подрібненої породи. Це дозволить забезпечити стійкий стан бічних порід та виробок за рахунок ущільнення подрібненої породи у межах деформаційного ресурсу ($0,4 \leq \lambda \leq 0,7$). При застосуванні ціликів вугілля, які мають обмежений деформаційний ресурс ($0,1 \leq \lambda \leq 0,25$), неможливо забезпечити стійкий стан бічних порід та запобігти обваленням, що обмежує застосування способу охорони.

2. Підвищення ефективності заходів з охорони праці гірників та вуглевидобутку із глибоких шахт досягається за рахунок застосування піддатливих опор над штреком, що поліпшує експлуатаційний стан цих виробок по довжині виїмкових дільниць. Експериментально обґрунтовано, що у зоні впливу очисних робіт позаду лави між конвергенцією бічних порід на перетині штрека і зміною жорсткості охоронних споруд виникає стан, що характеризується залежністю, функціональність якої ступенева,

а визначальними факторами є час, зовнішня сила і кут падіння пласта. Визначено умову такого процесу, згідно якої жорсткість піддатливої опори гіперболічно зменшується, досягаючи критичного значення при довжині штреку $l=(40-60)$ м позаду лави, з повним стисканням опори, у протилежність відомому способу охорони штреків ціликами вугільного пласта, коли їх жорсткість лінійно зменшується зі зростанням довжини виробки.

Список літератури

1. Проблеми промислової безпеки та охорона праці у паливно-енергетичному комплексі України : Монографія / Здановський В.Г., Глива В.А., Ляшок Я.О., Подкопєв С.В., Іорданов І.В. Покровськ: ДВНЗ "ДонНТУ", 2017. 344с.
2. Расследование и предотвращение аварий на угольных шахтах / А.М. Брюханов, В.И. Бережинский, К. К. Бусыгин, В. П. Колосюк, В. П. Коптиков. Донецк : Норд-Пресс, 2007. 692 с.
3. Селезень А.Л., Томасов А.Г., Андрушко В.Ф. Поддержание подготовительных выработок при разработке крутых пластов. Москва: Недра, 1977. 205 с.
4. Питаленко Е.И., Васютина В.В. Управление горным давлением в очистных забоях на крутых и крутонаклонных пластах с труднообрушаемыми кровлями. Наукові праці УкрНДМІ НАН України. 2010. № 7. С. 166-177.
5. Бачурін Л.Л., Новікова Ю.В., Сімонова Ю.І., Довгаль В.Ю., Бойченко Г.Е., Каюн О.П. Дослідження стійкості відкатних штреків крутих пластів на виїмкових дільницях глибокої шахти. Вісті Донецького гірничого інституту. 2020. №2. с.89-100. doi: 10.31474/1999-981X-2020-2-89-100.
6. Жуков В.Е. Теоретические и экспериментальные предпосылки технологического прорыва при разработке крутых пластов. Уголь Украины. 1998. №5. с.3-6.
7. Чепіга Д.А. Обґрунтування та розробка способів підвищення безпеки праці гірників у виїмкових дільницях глибоких шахт автореф. дис., канд. техн. Наук: 05.26.01. ДВНЗ «ДонНТУ», Покровськ, 2019. 24 с.
8. Гого В. Б., Кипко А.Э., Власенко Н.Н., Симонова Ю.И., Положий А.В., подкопаев Е.С. Особенности напряженно-деформированного состояния боковых пород в оценке эксплуатационного состояния горных выработок. Вісті Донецького гірничого інституту. 2019. №1. с.53-64. doi: 10.31474/1999-981X-2019-1-53-64.
9. Ishibashi, I., & Hazarika, H. *Soil Mechanics Fundamentals and Applications* (2nd ed.). CRC Press.2015. <https://doi.org/10.1201/b18236>
10. Robitaille, V., & Tremblay, D. *Mécanique des sols: Théorie et pratique*. Modulo. 2001.
11. Подкопаев, С. В., Гавриш, Н. Н., Деглин, Б. М., Каменец, В. И., & Зинченко, С. А. *Лабораторный практикум по курсу «Механика горных пород»*. ДонНТУ. 2012.
12. Demenko, V. *Examples and Problems in Mechanics of Materials. Stress-Strain State at a Point of Elastic Deformable Solid*. National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute". 2009.
13. Dekking, F. M., Kraaikamp, C., Lопuhaä, H. P., & Meester, L. E. *A Modern Introduction to Probability and Statistics*. Springer London. 2005. <https://doi.org/10.1007/1-84628-168-7>
14. Meshkov, Yu. Ya. The Concept of a Critical Density of Energy in Models of Fracture of Solids. *Uspehi Fiziki Metallov*, 2001. №2(1), p.7–50. <https://doi.org/10.15407/ufm.02.01.007>
15. Барковский, В. В., Барковська, Н. В., & Лопатін, О. К. *Теорія ймовірностей та математична статистика*. ЦУЛ. 2002.
16. Tkachuk, O., Chepiga, D., Pakhomov, S., Volkov, S., Liashok, Y., Bachurina, Y., Shvets, I., & Podkopaiev, S. Evaluation of the effectiveness of secondary support of haulage drifts based on a comparative analysis of the deformation characteristics of protective structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. №2 (1 (122), pp.73–81. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272454>

References

1. Zdanovskiy V.H., Hlyva V.A., Liashok Ya.O., Podkopiev S.V., Iordanov I.V. (2017) Problems of industrial safety and labor protection in the fuel and energy complex of Ukraine: Monograph [Problemy promyslovoi bezpeky ta okhorona pratsi u palyvno-enerhetychnomu kompleksi Ukrainy: Monohrafiia]. Pokrovsk: DVNZ "DonNTU", 344p.
2. Bryuhanov A.M., Berezhinskiy V.I., Busyigin K. K., Kolosyuk V. P., Koptikov V. P. (2007) Investigation and prevention of accidents in coal mines [Rassledovanie i predotvraschenie avariyy na ugolnyih shahтах]. Donetsk: Nord-Press, 692 p.

3. Selezen A.L., Tomasov A.G., Andrushko V.F. (1977) Maintenance of development workings in the development of steep seams [Podderzhanie podgotovitelnykh vyirabotok pri razrabotke krutykh plastov]. Moskva: Nedra, 205 p.
4. Pitalenko E.I., Vasyutina V.V. (2010) Management of rock pressure in longwalls on steep and steep seams with hard-to-cave roofs [Upravlenie gornym davleniem v oclistnykh zaboyah na krutykh i krutonaklonnykh plastah s trudnoobrushaemyimi krovlyami]. *Naukovi pratsi UkrNDMI NAN Ukrainy*, No 7, 166-177.
5. Bachurin L.L., Novikova Yu.V., Simonova Yu.I., Dovhal V.Iu., Boichenko H.E., Kaiun O.P. (2020) Study of the stability of rollback stretches of steep layers in the excavation sections of a deep mine [Doslidzhennia stiiikosti vidkatnykh shtrekiv krutykh plastiv na vyimkovykh dilnytsiakh hlybokoi shakhty]. *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu*, №2. 89-100. doi: 10.31474/1999-981Kh-2020-2-89-100.
6. Zhukov V.E. (1998) Theoretical and experimental prerequisites for a technological breakthrough in the development of steep reservoirs [Teoreticheskie i eksperimentalnye predposylki tehnologicheskogo proryva pry razrabotke krutykh plastov]. *Ugol Ukrainy*, No 5. 3-6.
7. Chepiha D.A. (2019) Justification and development of ways to improve the safety of miners in the mining areas of deep mines [Obgruntuvannia ta rozrobka sposobiv pidvyshchennia bezpeky pratsi hirnykiv u vyimkovykh dilnytsiakh hlybokykh shakht avtoref. dys., kand. tekhn. Nauk: 05.26.01]. DVNZ «DonNTU», Pokrovsk, 24.
8. Hoho V. B., Kypko A.Э., Vlasenko N.N., Symonova Yu.Y., Polozhyi A.V., Podkopaev E.S. (2019) Peculiarities of the stress-strain state of side rocks in assessing the operational state of mine workings [Osobennosti napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya bokovykh porod v otsenke ekspluatatsionnogo sostoyaniya gornykh vyirabotok]. *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu*, №1. 53-64. doi: 10.31474/1999-981Kh-2019-1-53-64.
9. Ishibashi, I., & Hazarika, H. (2015) *Soil Mechanics Fundamentals and Applications* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18236>
10. Robitaille, V., & Tremblay, D. (2001) *Mécanique des sols: Théorie et pratique*. Modulo.
11. Podkopaev, S. V., Gavrish, N. N., Deglin, B. M., Kamenets, V. I., & Zinchenko, S. A. (2012) Laboratory workshop on the course "Rock Mechanics" [Laboratornyi praktikum po kursu «Mekhanika gornykh porod»]. DonNTU.
12. Demenko, V. (2009) *Examples and Problems in Mechanics of Materials. Stress-Strain State at a Point of Elastic Deformable Solid*. National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute".
13. Dekking, F. M., Kraaikamp, C., Lopuhaä, H. P., & Meester, L. E. (2005) *A Modern Introduction to Probability and Statistics*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/1-84628-168-7>
14. Meshkov, Yu. Ya. (2001). The Concept of a Critical Density of Energy in Models of Fracture of Solids. *Uspehi Fiziki Metallov*, №2(1), 7–50. <https://doi.org/10.15407/ufm.02.01.007>
15. Barkovskiy, V. V., Barkovska, N. V., & Lopatin, O. K. (2002) Probability theory and mathematical statistics [Teoriia ymovirnostei ta matematychna statystyka]. TsUL.
16. Tkachuk, O., Chepiga, D., Pakhomov, S., Volkov, S., Liashok, Y., Bachurina, Y., Shvets, I., & Podkopaev, S. (2023) Evaluation of the effectiveness of secondary support of haulage drifts based on a comparative analysis of the deformation characteristics of protective structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. №2 (1 (122), 73–81. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272454>

Надійшла до редакції 25 травня 2023 р.

D.Chepiga, V. Levit, O.Kipko, V.Gogo O. Kruzhylo

JUSTIFICATION OF MEASURES REGARDING THE SAFE DEVELOPMENT OF SOLID COAL LAYERS

Purpose. Justification of measures regarding the safe development of steep coal seams to ensure the safe efficiency of coal mining and increase the safety of miners in deep coal mines.

Methodology. In order to achieve the goal, laboratory studies of the deformation properties of protective constructions were carried out on the models subjected to uniaxial compression, and field studies of the stability of preparatory mining products with various methods of protection.

Results. It was found that for coal cinders within the limits of the established deformation resource ($0,1 \leq \lambda \leq 0,25$) at the same time as their stiffness increases, the potential energy of deformation reaches a critical level, on which the short-term stability of protective constructions is realized. At the same time, there is a relative change in volume in the range of $0,05 < \delta V < 0,1$. With the increase in static use and the transition of the critical level of deformations, when $\lambda > 0,25$ i $\delta V > 0,1$, the loss of cylinder stability remains.

For protective constructions made of crushed rock when they are uniaxially compressed, the change in the behavior of the deformed body is separated from the compaction of the primary material. Within the limits of the deformation resource ($0,4 \leq \lambda \leq 0,7$), a relative change in the volume of crushed rock of $0,2 < \delta V < 0,35$ has been recorded. According to the number of sizes of such protective constructions, when the work of compression increases, the value of δV decreases. At the same time, the bearing capacity of protective constructions increases.

Scientific novelty. *The deformation resource of protective constructions of preparatory mine workings determines the effectiveness of the protection method used. Within the limits of the deformation resource, a stable state of protective constructions is ensured, which operates under conditions of single-height compression until the critical level of the specific potential energy of deformations is reached.*

Practical significance. *To ensure the stability of the pits in the coal-bearing massif and the operational condition of the prepared products in the mining areas, it is advisable to use partial or full laying of crushed rock or wooden chock with sleepers in the mined space.*

Keywords: coal massif, coal mining, protective constructions, blast rock, excavation site, safe development of coal seams, compression.

Відомості про авторів

Cheniza Daria Anatoliivna – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Управління гірничим підприємством і охорона праці» Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (вул. Потебні, 56, м. Луцьк, 43012, Україна)

Email: daria.chepiha@donntu.edu.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3331-9128>

Levit Viktor Volodimirovich – доктор технічних наук, професор, директор з капітального будівництва ПрАТ «Донецьксталь-МЗ» (пл. Шибанкова, 1, м. Покровськ, 85302, Україна).

E-mail: viktor.levit@donetsksteel.com.ua

Kipko Oleksandr Ernestovich, виконавчий директор, доктор технічних наук, академік Академії Будівництва України Трубний завод «Славсант» вул. Харківська, 15-Д, м. Павлоград, Україна, 51400, Email: oleksander.kipko@donntu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6398-6143>

Gogo Volodymyr Bейлович, доктор технічних наук, професор, кафедра електромеханіки та машинобудування. Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет» (вул. Потебні, 56, м. Луцьк, 43012, Україна) Email: volodymyr.hoho@ii.donntu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2239-4042>

Kружилько Олег Євгенович - доктор технічних наук, старший науковий співробітник, ТОВ «Технічний університет «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 87524, Україна, Донецька область, місто Маріуполь, вулиця Сеченова, будинок 71-а. E-mail: olkruzhilko@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8624-1515>

Chepiga Daria – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), State Higher Education Establishment “Donetsk National Technical University” (Potebni Str., 56, Lutsk, 43012, Ukraine); e-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3331-9128>

Levit Viktor – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director for Capital Construction, PrJSC “Donetsksteel-MZ”, (1, Shybankova Square, Pokrovsk, Donetsk oblast, 85302 Ukraine); e-mail: viktor.levit@donetsksteel.com.ua

Kipko Oleksander – Executive Director, Doctor of Technical Sciences Academician of the Academy of Construction of Ukraine Pipe plant “Slavsant” Kharkivska Str., 15-D, Pavlograd, Ukraine, 51400; e-mail: oleksander.kipko@donntu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6398-6143>

Gogo Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electromechanics and Mechanical Engineering, State Higher Education Establishment “Donetsk National Technical University” (Potebni Str., 56, Lutsk, 43012, Ukraine); e-mail: volodymyr.hoho@ii.donntu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2239-4042>

Kruzhylko Oleh – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher “Metinvest Polytechnic Technical University”, LLC, 87524, Ukraine, Donetsk oblast, Mariupol, Sechenova Str., 71-a; e-mail: olkruzhilko@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8624-1515>

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**Науковий вісник
Донецького національного технічного університету**

1(10)'2023

(українською, англійською мовами)

Технічний редактор *А.В. Петренко*

Формат 60x84/8. Ум. друк. арк. 14,1.
Тираж 100 прим. Зам. № 13879.

Видавець та виготовлювач: Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна.

Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи: Серія ДК №4911 від 09.06.2015