

ISSN 2415 - 7902

Міністерство освіти і науки України



НАУКОВИЙ ВІСНИК

ДОНЕЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

№ 1(8) – 2(9) 2022

Луцьк, 2022

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(8)-2(9)'2022

Луцьк - 2022

УДК 62+5+33](045/046)

Друкується за рішенням Вченої ради державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (протокол № 11 від 27.12.2022).

Збірник внесено 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);

Подкопасьєв 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

Kosenko A.V., Khorolskyi A.O. DETERMINATION OF DEPENDENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS OF DRAWN STOPE (UNDERCUTS) FOR IMPLEMENTING TECHNOLOGIES OF ACTIVE CONTROL OF MOUNTAIN MASSIF STATE	8
Теличко Г.О., Блазаренас І.В., Седов Д.О. АВТОМАТИЗАЦІЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У СТВОРЕННІ ЧАТ-БОТА ЗА СТАНДАРТАМИ INDUSTRY 4.0	20
Волков С.В., Каюн О.П. ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОХОРОННИХ СПОРУД ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБОК ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СТІЙКОСТІ БІЧНИХ ПОРІД У ВУГЛЕПОРОДНОМУ МАСИВІ	30
Євстратенко І.А., Рясний В.М., Чухарєв С.М., Кучерук М.О. СУЧАСНИЙ СТАН МЕХАНООЗБРОЄНОСТІ ГІРНИЧОРЯТУВАЛЬНОЇ (АВАРІЙНО-РЯТУВАЛЬНОЇ) СЛУЖБИ ТА ЙОГО ЗНАЧЕННЯ У ПІДВИЩЕННІ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ ГІРНИКІВ	45
Костенко В.К., Богомаз О.П., Глушко І.О. ПОПЕРЕДНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТВЕРДИХ ШАХТНИХ ВІДХОДІВ В ЯКОСТІ ДОБРІВ	56
Лабузова А.М., Воропаєва А.О., Воропаєва В.Я. СТРУКТУРА ТА ФУНКЦІОНАЛ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПІДСИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВИДОБУВНИХ ЗАБОЇВ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ	63
Лашко Є.Є., Ченчева О.О., Сукач С.В., Шлик С.В., Геращенко С.М., Дяченко В.В. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ДЛЯ БРОНЕЗАХИСТУ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ТРАНСПОРТУ	73
Мінєєв С.П., Новіков Л.А., Лютий М.А., Макаренко Р.В. ВПЛИВ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ДЕГАЗАЦІЙНОГО ГАЗОПРОВОДУ НА ПРИПЛИВИ ПОВІТРЯ І КОНЦЕНТРАЦІЮ МЕТАНУ	86
Підвисоцький В.Т., Котенко В.В., Башинський С.І., Піскун І.А. ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЗВОРОТНІХ ЗВАЖЕНИХ ВІДСТАНЕЙ ДЛЯ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ЙОСИПІВСЬКОГО РОДОВИЩА КАОЛІНУ	94
Мінєєв С.П., Прусова А.А., Янжула О.С., Мінєєв О.С. ОЦІНКА СОРБЦІЙНОЇ РІВНОВАГИ МЕТАНУ ПРИ ЙОГО ГЕНЕРАЦІЇ У ВУГІЛЬНОМУ ПЛАСТІ	106
Теличко Г.О., Романенков Д.О., Карєв Б.Є., Рогожин А.В. РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ВОДОПОСТАЧАННЯМ ВІДДАЛЕНОГО СЕЛИЩА	119

Рудаков Д.В., Ядзюнь Сунь, Садовенко І.О., Інкін О.В. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЗАКРИТИХ ШАХТ ДОНЕЦЬКОГО ТА РУРСЬКОГО ВУГІЛЬНИХ БАСЕЙНІВ	128
Сергієнко О.І., Сергієнко Л.В. ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ПРОГНОЗУ ВИВАЛОУТВОРЕННЯ ПОРІД ПОКРІВЛІ НАД ОЧИСНИМ ВИБОЄМ	140
Ступак М.В., Ступак Г.В. КОНЦЕПЦІЯ INTERNET OF ENERGY ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ	152
Теличко Г.О., Коршиков О.О., Машьянов Д.С., Ткаченко О.І. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯ ВАГОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ INDUSTRY 4.0	162
Туровська Г.І., Богданенко О.В. ЗАСТОСУВАННЯ ФАКТОРНОГО АНАЛІЗУ ТА МЕТОДУ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК ДО ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ НАВЧАЛЬНИХ ОРГАНІЗАЦІЙ З ОХОРОНИ ПРАЦІ	171
Федорчук-Мороз В.І., Герасимчук Г.А., Бондарчук Л.Ф. ПЕРСПЕКТИВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СОЦІАЛЬНОГО ДІАЛОГУ ЗАДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ СТАНУ БЕЗПЕКИ ТА ГІГІЄНИ ПРАЦІ	183
Хорольський А.О., Косенко А.В. РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ ВІДПРАЦЮВАННЯ ВИКИДОНЕБЕЗПЕЧНИХ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ	193
Цвіркун С.В., Костенко Т.В., Удовенко М.Ю. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАХИСТУ ЛЮДЕЙ ВІД НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ПОЖЕЖАМИ В БУДІВЛЯХ, ЯКІ НАЛЕЖАТЬ ДО ОБ'ЄКТІВ КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ	206
Чеберячко С.І., Гридяєв В.В., Еннан А.А.-А., Чеберяко Ю.І., Абрамова Н.М., Книш І.М. ВИБІР РЕСПІРАТОРІВ НА ОСНОВІ РЕЗУЛЬТІВ ВИМІРЮВАННЯ АНТРОПОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ СЕРЕДНЬОСТАТИСТИЧНОГО РОБІТНИКА АКХЗ ТА ШЕФФІЛДІВСЬКОГО МАНЕКЕНУ ГОЛОВИ	216
Яворська О.О., Радчук Д.І., Яворський А.В., Лантух Д.О., Сосулев Є.І. ВПЛИВ ПАНДЕМІЇ COVID-19 НА БЕЗПЕКОВУ СТІЙКІСТЬ ПІДПРИЄМСТВ.	228

CONTENTS

Kosenko A.V., Khorolskyi A.O. DETERMINATION OF DEPENDENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS OF DRAWN STOPE (UNDERCUTS) FOR IMPLEMENTING TECNOLOGIES OF ACTIVE CONTROL OF MOUNTAIN MASSIF STATE	8
Telychko H., Blazarenas I., Sedov D. AUTOMATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CREATING A CHAT-BOT ACCORDING TO INDUSTRY 4.0 STANDARDS	20
Volkov S., Kaiun O. STUDY OF DEFORMATION CHARACTERISTICS OF PROTECTIVE STRUCTURES OF DEVELOPMENT WORKINGS FOR PREDICTING THE STABILITY OF SIDE ROCKS IN A COAL-ROCK MASSIF	30
Yevstratenko I., Riasnyi V., Chukharev S., Kucheruk M. THE CURRENT STATUS OF THE MECHANICAL EQUIPMENT OF THE MINING RESCUE (EMERGENCY AND RESCUE) SERVICE AND ITS SIGNIFICANCE IN IMPROVING THE LABOR SAFETY OF MINERS	45
Kostenko V., Bohomaz O., Hlushko I. PRELIMINARY RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF USING SOLID MINE WASTE AS FERTILIZER	56
Labuzova A., Voropaieva A., Voropaieva V. STRUCTURE AND FUNCTIONALITY OF THE AUTOMATED SYSTEM OF MONITORING AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL INDICATORS OF COAL MINES	63
Lashko Ye., Chencheva O., Sukach S., Shlyk S. APPLICATION OF THE TECHNOLOGY OF IMPULSE PROCESSING OF METALS FOR ARMOR PROTECTION OF SPECIALIZED VEHICLES	73
Minieiev S., Novikov L., Liutyi M., Makarenko R. IMPACT OF DEGASIFICATION PIPELINE TIGHTNESS ON AIR INFLOWS AND METHANE CONCENTRATION	86
Pidvysotskyi V., Kotenko V., Bashinsky S., Piskun I. JUSTIFICATION OF THE FEASIBILITY OF USING THE INVERSE WEIGHTING DISTANCE METHOD FOR CLUSTERING THE YOSIPIV KAOLIN DEPOSIT	94
Minieiev S., Prusova A., Yanzhula O., Minieiev O. ASSESSMENT OF THE SORPTION EQUILIBRIUM OF METHANE DURING ITS GENERATION IN A COAL SEAM	106
Telychko H., Romanenkov D., Kariev B., Rogozhyn A. DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC WATER SUPPLY CONTROL SYSTEM FOR A REMOTE VILLAGE	119

Rudakov D.V., Sun Yajun, Sadovenko I.O., Inkin O.V. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE GEOTHERMAL POTENTIAL OF CLOSED MINES IN THE DONETSK AND RUHR COALMINING AREAS	128
Serhiienko O., Serhiienko L. JUSTIFICATION OF THE METHOD OF FORECASTING THE PROCESS OF FORMATION OF CAVE-IN OF ROOF ROCKS OVER COAL FACE	140
Stupak M., Stupak H. THE INTERNET OF ENERGY CONCEPT FOR MANAGEMENT OF ELECTRICAL NETWORK FACILITIES	152
Telychko H., Korshikov O., Mashianov D., Tkachenko O. AUTOMATIC WAGON LOADING CONTROL SYSTEM USING INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES	162
Turovska H., Bohdanenko O. APPLICATION OF FACTOR ANALYSIS AND THE DELPHI METHOD TO EVALUATE THE EFFECTIVENESS OF OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH TRAINING ORGANIZATIONS	171
Fedorchuk-Moroz V., Herasymchuk H., Bondarchuk L. PROSPECTS FOR IMPROVING SOCIAL DIALOGUE FOR IMPROVING OCCUPATIONAL SAFETY AND HYGIENE	183
Khorolskyi A.O., Kosenko A.V. DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A MODEL FOR SUBSTANTIATION OF OPTIMAL TECHNOLOGICAL SCHEMES FOR THE MINING OF OUTBURST-PRONE COAL SEAMS	193
Tsvirkun S., Kostenko T., Udovenko M. ENSURING THE PROTECTION OF PEOPLE FROM EMERGENCIES RELATED TO FIRES IN BUILDINGS BELONGING TO CULTURAL HERITAGE OBJECTS	206
Cheberiachko S., Hridyaev V., Ennan A., Cheberiachko Y., Abramova N., Knysh I. SELECTION OF RESPIRATORS BASED ON THE RESULTS OF MEASURING THE ANTHROPOMETRICAL DIMENSIONS OF THE AVERAGE STATISTICAL WORKER OF AVDIIVKA COKE PLANT AND THE SHEFFIELD MANNEQUIN HEAD	216
Yavorska O., Radchuk D., Yavorskyi A., Lantukh D., Sosuliev Ye. IMPACT OF COVID-19 PANDEMIC ON THE SECURITY STABILITY OF ENTERPRISES	228

UDC 622.271.3:622.831

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-8-19](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-8-19)

Kosenko A.V., Khorolskyi A.O.

DETERMINATION OF DEPENDENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS OF DRAWN STOPES (UNDERCUTS) FOR IMPLEMENTING TECHNOLOGIES OF ACTIVE CONTROL OF MOUNTAIN MASSIF STATE

Purpose. Increasing the efficiency of mining of rich iron ores by sublevel caving methods based on the development of the technology of active control of the state of a mountain massif, which will ensure the stability of the outcrops of exposure of drawn stopes (undercuts) and the quality of the mined ore mass.

Methodology. To achieve the goal, a complex of modern research methods has been used, which includes the analysis of literary sources, design and construction documentation and practice of developing iron ore deposits at great depths, theoretical generalization of laboratory and industrial experiments, the method of functional characteristics for determining the permissible sizes of structural elements of underground mining methods, systemic economic, graph-analytical and correlation analysis.

Results. It has been established that the volumes of drawn stopes (undercuts) with flat inclined and vertical exposures are characterized by a larger volume than those with flat horizontal and vertical exposures. Also, the maximum possible stable parameters are determined for the exposure of the drawn stopes (undercuts), which are formed with the help of smooth blasting.

Scientific novelty. Reserves for increasing the efficiency of extraction of rich iron ores by the sublevel caving methods have been determined based on the study of the dependences of geometric parameters of the depth of drawn stopes (undercuts) and the intensity of stoping. Due to substantiation of the above parameters, the intensification of the processes of stoping is carried out, which is an integral part of the active control of the state of a rock massif during underground mining of iron ore deposits.

Practical significance. The developed technological solutions allow to increase the volume of pure ore extraction by 5–51%, depending on the mining-geological, mining-technical and geomechanical conditions of the development of rich iron ore deposits and the intensity of stoping and, as a result, to reduce losses by 2.6–4.6% and ore weakening by 2.8–5.2%, to improve absolute quality of the extracted ore mass by 0.8–1.5%, and to increase the economic efficiency of the development of mining units by 10.1–27.5%.

Conclusions. It has been established that during the development of deposits of rich iron ores with a strength coefficient of $f=4-6$, an average and below average stability and a thickness of 15–40 m, which are concentrated in the depth range of 1200–1400 m, it becomes possible to form exposure of drawn stopes (undercuts) with a volume of up to 70% of the main stock of the stoping panel, with an increase in the intensity of the technological process of ore drawing up to 8.8 t/m² per day.

Keywords: rich iron ores, intensity of stoping, undercut, drawn stope, sublevel caving methods, intensity of ore drawing, class of deposit development, hydraulic monitor.

Introduction. There are 1.6 billion tons of explored reserves of rich iron ores in the bowels of Ukraine [1]. The main volume of these reserves (80%) is located within the Ukrainian shield, in the Kryvyi Rih iron ore basin (Kryvbas), the geological structure of which is quite complex. About 50% of ore deposits have an average thickness of 25–30 m, and the rest of 30–220 m, which limits the use of typical designs of underground mining methods (UMM) for the entire underground Kryvbas.

Rich iron ore deposits are characterized by the natural geostatic state of ore-rock massifs, with a wide range of physical-mechanical and mining-technological properties of macro-structural geoelements occurred in difficult and extremely difficult conditions of deep horizons. Development and face-entry drivages and stoping are carried out within the depths of 1100–1400 m, under conditions of high rock pressure. The development of iron ore deposits is carried out by various UMM of sublevel caving (51.4%) and block caving (1.6%) (UMM with unsupported), as well as sublevel open stoping (12.5%) and level open stoping (34.5%) (UMM with naturally supported) [2, 3].

Consequently, the development of deposits of rich iron ores in Kryvbas is carried out mainly with the use of sublevel caving methods the percentage of which is increased from 3

to 53% in the course of deepening mining operations from 1115 m to 1340 m (Fig. 1). Therefore, a further deepening of stoping below the level of 1500 m, in our opinion, will lead to a complete transition to the use of UMM with unsupported, in particular, sublevel caving.

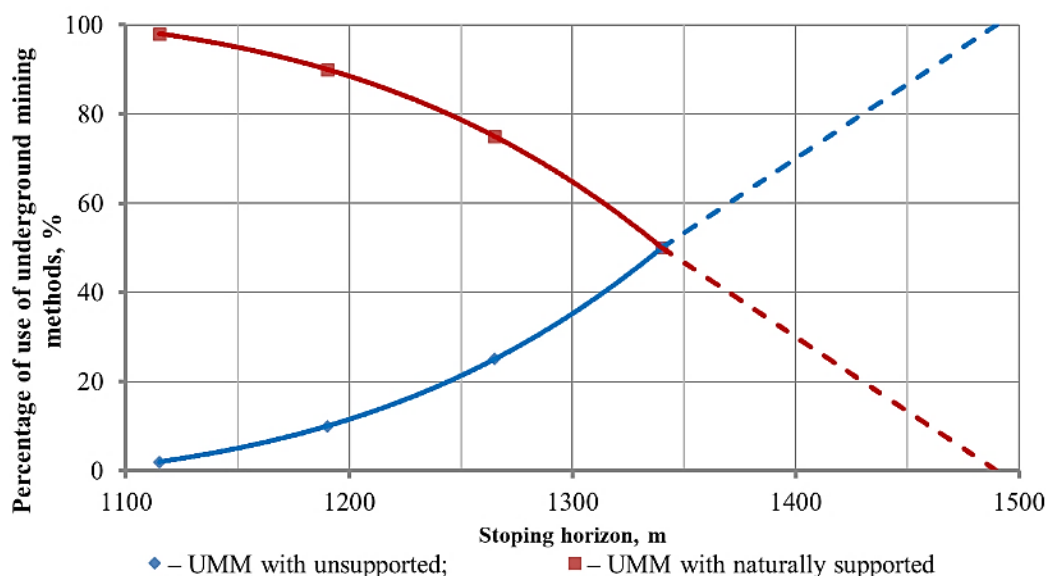


Figure 1 – Graphs of the dependence of the use of various UMM in the conditions of underground Kryvbas

The ore drawing and delivery is mainly carried out with the help of scraper winches or vibratory feeders, only in isolated cases – using self-propelled loader machines of tunneling type [4]. The use of this type of technique limits the level of intensity of the ore drawing and averages of 1.5 t/m² per day [1]. Such an indicator of the intensity of ore drawing has a significant impact on the deterioration of recovery indicators in the case of using the UMM with unsupported [1, 5].

The variants of the UMM with unsupported are characterized by: a long period of first workings (4–6 months) and stoping (3.5–5.0 months) and, as a result, two- or three-fold re-branching of delivery excavation and re-drilling 30–40% long holing; insufficient for an effective breaking process, the volume of undercuts (up to 20%); losses level to the range of 17–25% and ore weakening to 14–18% [6]. Such indicators of the development of stocks of stoped panels do not meet modern requirements for the rational development of rich iron ore deposits [7].

Structural and functional analysis of UMM with unsupported used for the development of rich iron ores made it possible to establish the following: the specific costs of development and face-entry excavation are 5–13 m/1000 tons of balance reserves; the laboriousness of carrying out development and face-entry excavation is 40–45% of the total costs for the UMM; the labor intensity of the technological process of ore drawing and delivery is 35–40%; labor productivity of a worker according to the UMM is 27–43 tons/person per shift; the level of labor mechanization does not exceed 45% [8].

Consequently, the mechanization and intensification of development and face-entry excavation and of stoping and labor productivity in all technological processes is very low. Therefore, the search for possible technical and technological solutions that can improve the ore recovery rates, as well as increase the level of mechanization and labor productivity without increasing the cost of mining rich iron ores in the difficult geomechanical conditions of the deep horizons of the Kryvbas mines are relevant scientific and practical tasks. The first

of which requires the improvement of the sublevel caving method, which consists in optimizing the design of the stoped panel and increasing the volume of the undercuts to the maximum size due to the scientific control of the stress-strain state of the rock mass in the area of the of stoping [9, 10]. The task of increasing productivity and mechanization of labor can be solved by using high-performance complexes of self-propelled mining equipment, the standard size and scope of which must be determined on the basis of technical and economic calculations.

Purpose. The purpose of the work is to increase the efficiency of mining of rich iron ores by sublevel caving methods based on the development of the technology of active control of the state of a mountain massif, which will ensure the stability of exposure drawn stopes (undercuts) and the quality of the mined ore mass.

Methodology. Based on the method of functional characteristics for determining the allowable dimensions of structural elements of the SR of iron ore deposits [11], the dependence of the parameters of exposure of drawn stopes (undercuts) on the on the mining-geological, mining-technical and geomechanical conditions of deep horizons of iron ore mines and the intensity of stoping to increase the completeness of extraction of reserves was studied mineral iron ore raw materials. The object of study was the deposit of the Kryvbas iron ore deposit, which is represented by a sheet-like ore body with a hardness coefficient of $f=4-6$, a thickness of 15–40 m, and an angle of dip of $35-65^\circ$. The host rocks of the hanging wall are represented by quartzite's with a hardness coefficient up to $f \geq 8$, and those of the bottom wall are represented by shales with a hardness coefficient up to $f \geq 4$. The geological stress field is geostatic. The height of the sublevel is 40 m, and the length of the stoped panel along the strike of the ore deposit is 25–35 m. It is conventionally stipulated that mining is carried out with one stoped panel for the entire thickness of the ore deposit. When stoping a collapse zone is formed from the goaf. The shape of the collapse zone is determined by the depth of stoping, the thickness and angle of dip of the ore deposit, the nature of the collapse and displacement of the rocks of the hanging wall (with or without lagging behind the horizon of the stoping and with the transition to a closed zone). It is planned to carry out of the stoping with in the depths of 1200–1400 m using complexes of high-performance self-propelled equipment: a Boomer 104 drilling carriage (Atlas Copco) and an EST 2D load-and-dump machine (Atlas Copco) for driving horizontal mine workings with a cross-sectional area by 12–14 m²; perforator PP-25 (Company Plasma) and scraper hauler 17LS-2S (Company Plasma), for sinking horizontal threaded mine workings with a cross-sectional area by 3.6–6.2 m²; machine tool Robbins 73RH (Atlas Copco), for driving vertical and inclined raise with a length of more than 100 m; self-propelled complex KPV-2 (Nipigirmash), for driving vertical and inclined raise from 40 to 100 m long;hydraulic monitor, consisting of a machine tool NKR-100MPA (Plasma Company), a pump SM 100-65-250/4 (Atlant) and a hydrocycloneSM-15 (Rosta), for driving vertical and inclined raise up to 40 m long in ore with a hardness of $f=8$; telescopic perforator PT-48 (Plasma Company) for drilling blast-holes in the process of formation of draw ballsabove draw holes; machine tool NKR-100MPA (Plasma Company) for make holes in the process of formation of draw points for mining stocks of pillars (inters tall pillar or safety pillar) and for the formation of a cut-out raise in a deserted way; installation Solo 5-7P (Sandvik Mining), for make holes; multi-bucket scraper haulers 55LS-2S (Plasma Company) in combination with a self-propelled loading and hauling machine Scooptram ST7 (Atlas Copco) for the delivery of ore mass from the draw points to the capital draw raises.

Results. The function of the process of managing the structural elements of the variants of the sublevel caving is to select the parameters that are optimal in terms of stability and control their creation.

The most promising direction for improving the efficiency of developing complex-structured deposits is the stoping excavation of rich ore reserves, based on the patterns of formation of stress fields in the mining area, their changes and zoning in the arrays of excavation areas and structural elements of the sublevel caving methods.

An idea of the distribution of stresses in the host rocks can be obtained by considering the rock mass as an elastic isotropic medium. The nature of the stress field that is formed in the process of formation of drawn stopes (undercuts) depends on the shape and size of their cross section, natural stress field, macrostructure and physical properties of rocks, dynamic loads caused by blasting and the presence of other mine workings nearby.

During the development of iron ore deposits in the Kryvyi Rih basin by UMM with unsupported, when the rocks of the hanging side are shifted and collapse as the horizon of the mining excavation deepens, specific zones of support pressure and unloading appear in the rocks of the foot wall. The zones of support pressure and unloading arise and replace each other. In the unloading zone, the rocks of the lying side are stratified and, as it were, squeezed out towards the goaf. Because of this, the strength of the rocks of the lying side decreases and the rocks in this bedding zone are displaced. In this case, the coefficient of lateral expansion of the regional stress field, the structural heterogeneity of massifs and the shape of the mined-out area are the main factors that influence the formation of the stress-strain state of rock massifs in the mining area. The nature of the formation of initial stresses depends on the structural inhomogeneity of the array. The difference between the calculated values and the values obtained for homogeneous arrays is about 30-40%. This is due to the difference in the moduli of deformation of the structural parts of rock masses.

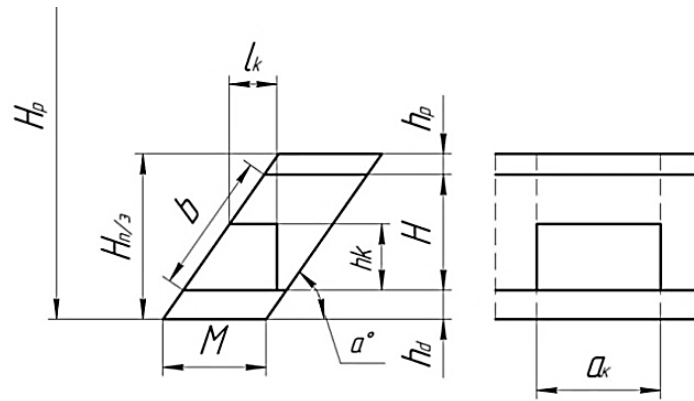
The deformation properties, dimensions, and orientation in space of the entire set of layers have a significant effect on the parameters of local stress fields. The area of influence of each layer extends over a distance of up to three characteristic dimensions. The distribution of stresses across the strike of steeply dipping layers has a clearly defined maximum and a minimum located at the hanging or lying side of the layer under consideration, depending on whether the ratio of the deformation moduli of the layer and the host rocks is greater or less than unity. The greater the ratio of the deformation moduli of the layer and the host rocks, the greater the difference between the stress values at the opposite boundaries of the layers.

The key factors influencing the choice of stable parameters of block structural elements are: 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 zone of shear and collapse of undermined host rocks; the order of working out the panels according to the thickness and strike of the block; intensity of mining stocks of drawn stopes (undercuts).

Since the depth and natural strength of the ore-rock mass cannot be influenced by engineering methods, an increase in the volume of drawn stopes (undercuts) can be achieved by reducing the lifetime of their exposure. This can be achieved by increasing the intensification of stoping.

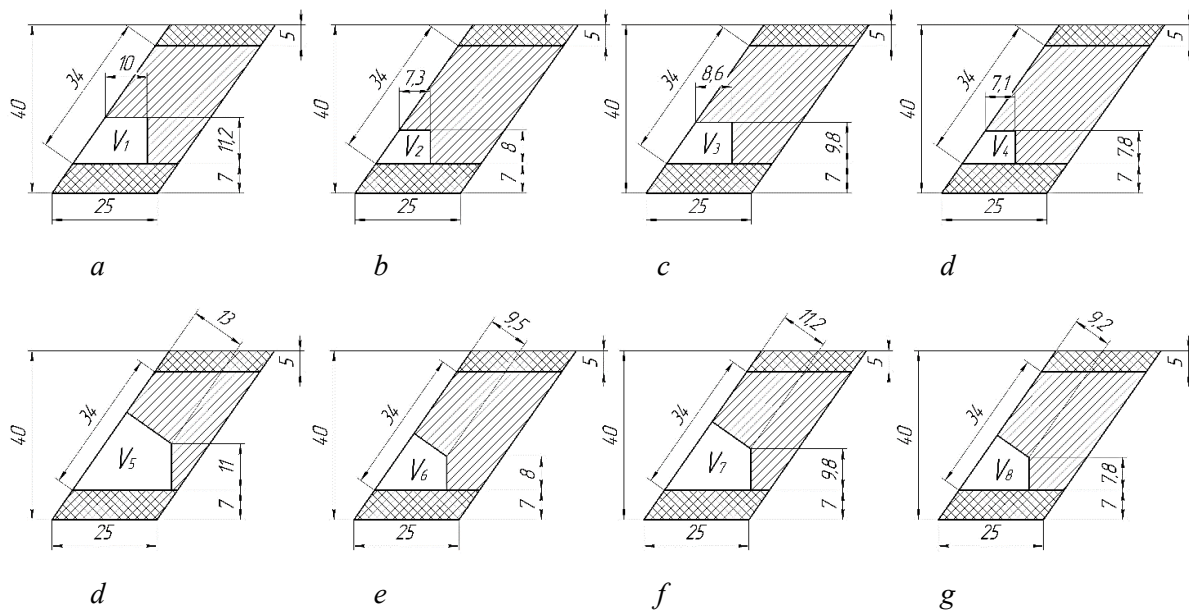
For the mining-geological conditions of Kryvbas, on the basis of the developed calculation scheme (Fig. 2) according to the method [11], a calculation program was developed. With the help of the developed program, the maximum possible stable parameters of the exposure of drawn stopes (undercuts), which are formed with the help of explosive breaking with borehole charges, are calculated.

According to the calculations, rational technological schemes for the placement and parameters of extremely stable drawn stopes (undercuts) inside the extraction units were built (Fig. 3 and 4).



H_p – development depth, m; l_k – width of the horizontal exposure of the drawn stope (undercut), m; b – sloping height of the rock of bottom wall, m; M – thickness of the ore deposit (drawn stope (undercut) width), m; h_d – height of the bottom of the mining block, m; h_k – height of the drawn stope (undercut), m; $H_{n/3}$ – sublevel height, m; h_p – arch pillar height, m; a_k – length of the drawn stope (undercut) along strike, m; α° – angle of dip of the ore deposit, degrees

Figure 2 – Calculation scheme for determining the stable parameters of drawn stopes (undercuts) for sublevel caving methods



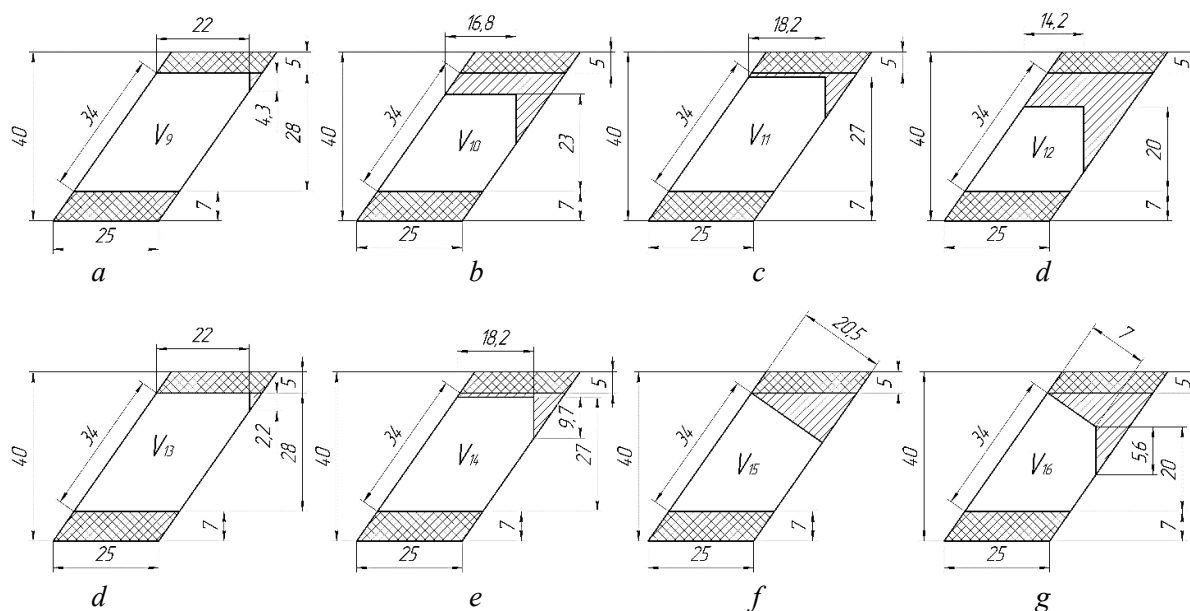
a, d – deposit of the I class, mining depth is 1200 m; b, e – deposit of the II class, development depth is 1200 m; c, f – deposit of the I class, development is depth 1400 m; d, g – deposit of the II class, development depth is 1400 m

Figure 3 – Extremely stable parameters of the drawn stopes (undercuts) with horizontal flat and inclined ore exposures of the roof within the mining block, represented by ores below the average hardness ($f=4$) and stability

Based on the calculations, it was found that the volumes of drawn stopes (undercuts) with flat inclined and vertical exposures are characterized by a larger volume than with flat horizontal and vertical exposures.

With the maximum stability of the outcrops of the drawn stopes (undercuts) and the possibilities of delivery vehicles, the possible relative volumes of the primary treatment (compensation) spaces were established. Based on the calculations carried out using the

graphic-analytical method, the dependences of the relative volume of the treatment (compensation) chamber on the thickness (width of the panel across the strike) of the ore deposit, the intensity of the technological process of release and delivery of the ore mass, the class of development of the deposits, the hardness of the ore and the depth of mining were established (Fig. 5, 6 and 6).



a, d – deposit of the I class, mining depth is 1200 m; *b, e* – deposit of the II class, development depth is 1200 m; *c, f* – deposit of the I class, development depth is 1400 m; *d, g* – deposit of the II class, development depth is 1400 m

Figure 4 – Extremely stable parameters of the drawn stopes (undercuts) with horizontal flat and inclined ore exposures of the roof within the mining block, represented by ores below the average hardness ($f=6$) and stability

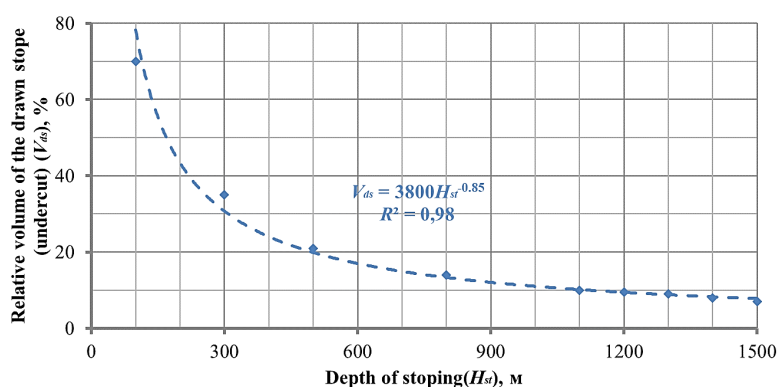
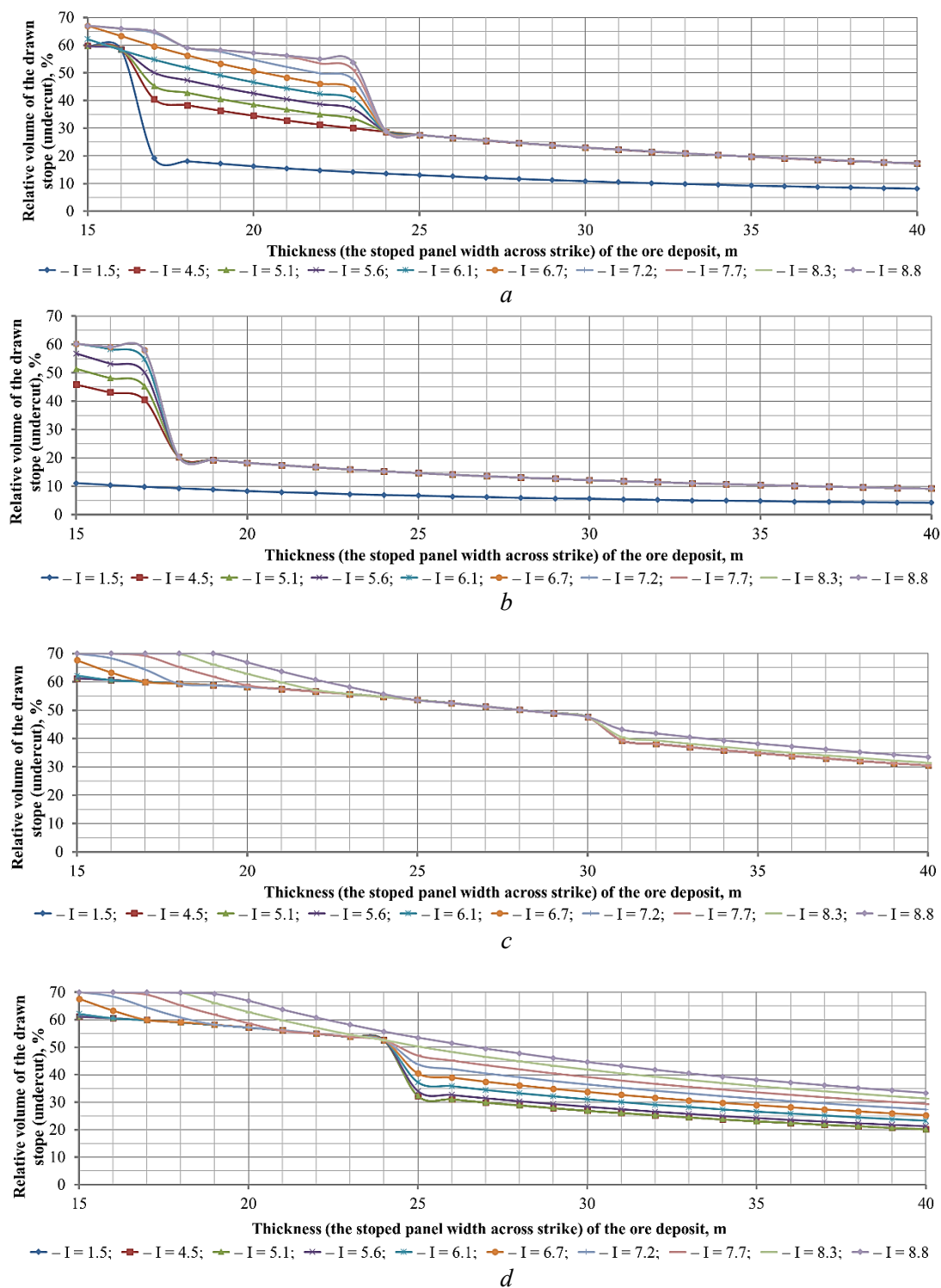
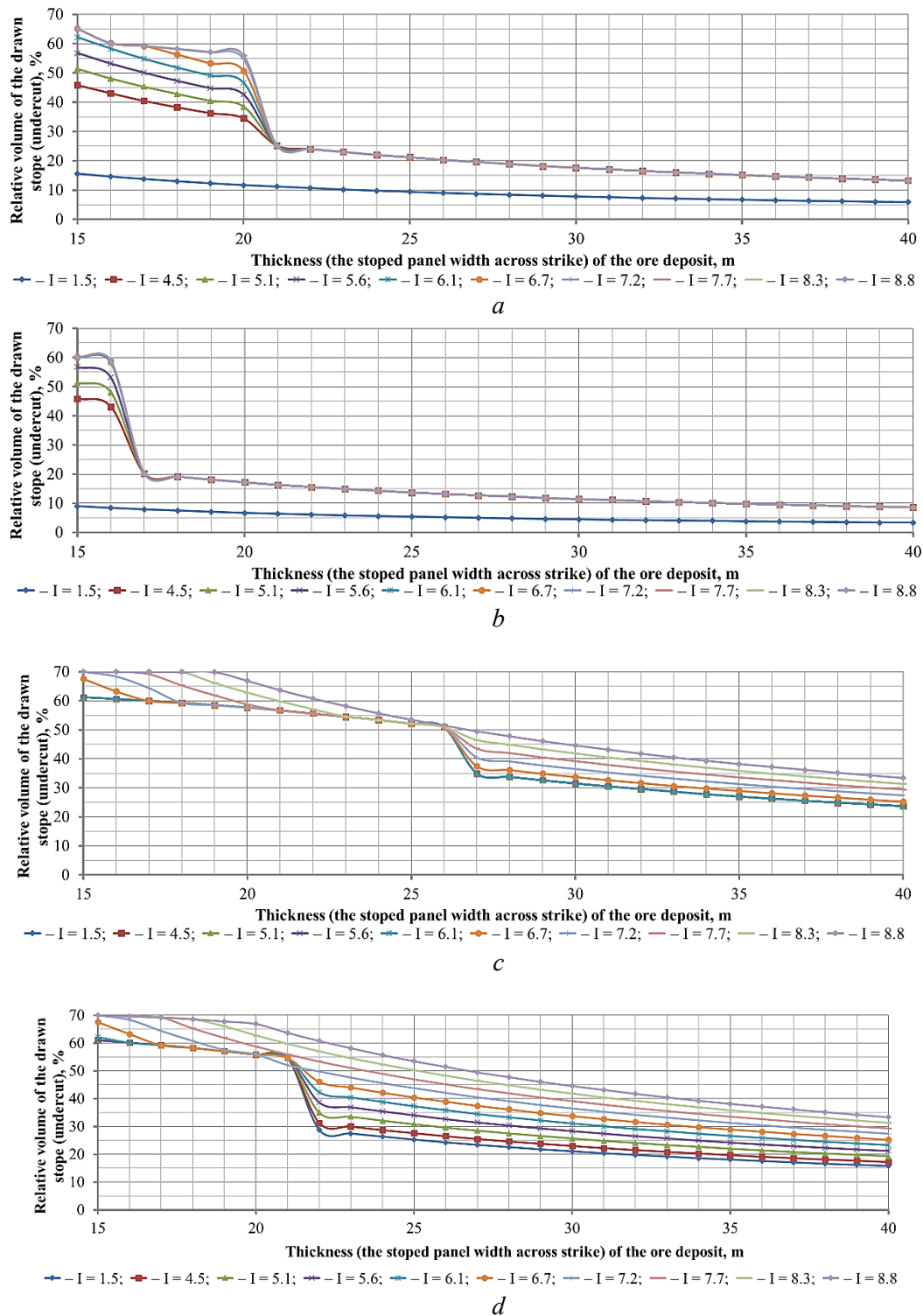


Figure 5 – Graph of dependence of relative volume of the drawn stopes (undercuts) on the depth of the treatment (ore hardness $f=4$)



a – class I of the development of the deposit rich iron ores with a fortress $f=4$; *b* – class II development of rich iron ore deposits with a strength $f=4$; *c* – I class development of deposits of rich iron ores with a strength of $f=6$; *d* – class II development of deposits of rich iron ore with a strength of $f=6$; I – intensity of ore drawing, t/m^2 per day

Figure 6 – Graphs of the dependence of the relative volume of the drawn stopes (undercuts) on the thickness (the stoped panel width across strike) of the ore deposit for different intensity of the technological process of ore drawing and delivery of the ore mass, when the of stoping is carried out at a depth of 1200 m



a – class I of the development of the deposit rich iron ores with a fortress $f=4$; *b* – class II development of rich iron ore deposits with a strength $f=4$; *c* – I class development of deposits of rich iron ores with a strength of $f=6$; *d* – class II development of deposits of rich iron ore with a strength of $f=6$; I – intensity of ore drawing, t/m^2 per day

Figure 7 – Graphs of the dependence of the relative volume of the drawn stopes (undercuts) on the thickness (the stoped panel width across strike) of the ore deposit for different intensity of the technological process of ore drawing and delivery of the ore mass, when the of stoping is carried out at a depth of 1400 m

After the approximation, the dependence of the relative volume of the drawn stopes (undercuts) on the depth of stoping was obtained, which is generally expressed in a power form

$$V_{ds} = 3800H_{st}^{-0,85}, \% \quad (1)$$

where H_{st} is a depth of stoping, m.

It is established that for deposits:

- II class of development, represented by ores below average hardness ($f=4$) and stability, in the depth range of 100–1500 m, the specific volume of the drawn stopes (undercuts) decreases according to a power law from 70 to 8%;

- I class development, represented by ores below the average hardness ($f=4$) and stability, in the depth range of 1200–1400 m, the specific volume of the drawn stopes (undercuts) can be increased by 7.3–49.5%;

- II class of development, represented by ores below average hardness ($f=4$) and stability, in the depth range of 1200–1400 m, the specific volume of the drawn stopes (undercuts) can be increased by 5–51%;

- I class development, represented by ores of medium hardness ($f=6$) and stability, in the depth range of 1200–1400 m, the specific volume of the drawn stopes (undercuts) can be increased by 7.0–15.8%;

- II class development, represented by ores of medium hardness ($f=6$) and stability, in the depth range of 1200–1400 m, the specific volume of the drawn stopes (undercuts) can be increased by 8.8–21.3%.

At the same time, the main conditions for ensuring the stability of the outcrops of the drawn stopes (undercuts), as well as the pillars in the process of constructive design of mechanized UMM of rich iron ores of medium and below average strength and stability, under conditions of intensive manifestation of geomechanical processes, in the process of mining are:

- accounting for the initial geomechanical situation within the extraction units and technological areas;

- taking into account the main regularities of the formation of stress-strain state zones within the horizons of mining operations, due to the shape of the mined-out space, structural-geometric and deformation-strength characteristics of ore-rock massifs of deposits;

- selection of rational sizes of mining units, taking into account their placement according to the elements of occurrence of ore deposits;

- intensification of all technological processes of deposit development.

Conclusions. In the course of the studies, the dependence of the geometric parameters of the drawn stopes (undercuts) was established for the implementation of technologies for the active control of the state of the rock mass. It has been established that during the development of deposits of rich iron ores with a strength coefficient of $f=4-6$, an average and below average stability and a thickness of 15–40 m, which are concentrated in the depth range of 1200–1400 m, it becomes possible to form exposure drawn stopes (undercuts) with a volume of up to 70% of the main stock of the stoped panel, with an increase in the intensity of the technological process of ore drawing up to 8.8 t/m² per day. And, as a result, this will increase the volume of pure ore extraction by 5–51%, depending on the mining-geological, mining-technical and geomechanical conditions of the development of rich iron ore deposits and the intensity of stoping. The developed technological solutions will make it possible to reduce losses level by 2.6–4.6%, ore weakening by 2.8–5.2%; improvement of the absolute quality of the extracted ore mass by 0.8–1.5%; to increase the economic efficiency of the development of mining units by 10.1–27.5%.

References

1. Kosenko, A.V. (2021). Improvement of sub-level caving mining methods during high-grade iron ore mining. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 19–25. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/019>.
2. Khomenko, O., Kononenko, M., Vlado, A., & Mal'tsev, D. (2011). *Mining business of Ukraine in the Internet*, D.: NGU, 288. [in Russian].
3. Kosenko A. (2020) Improvement of technology for development of rich iron ore in difficult geomechanical conditions of deep horizons of the Kryvbas mines. *Polish journal of science*, №33 (1), 45–51. [in Ukraine].
4. Khomenko, O., Kononenko, M., & Mal'tsev, D. (2010). *Mining equipment for underground mining of ore deposits*. D.: NGU. 340. [in Ukraine].
5. Bazaluk O, Petlovanyi M, Zubko S, Lozynskyi V. & Sai K. (2021). Instability Assessment of Hanging Wall Rocks during Underground Mining of Iron Ores. *Minerals*, 11(8):858, 1-19. <https://doi.org/10.3390/min11080858>
6. Khomenko, O., Kononenko, M., & Savchenko, M. (2018). Technology of underground mining of ore deposits. Dnipro: DUT. 449. [in Ukraine]. <https://doi.org/10.33271/dut.001>
7. Petlovanyi M., Malashkevych D., Sai K., & Zubko S. (2020). Research into balance of rocks and underground cavities formation in the coal mine flowsheet when mining thin seams. *Mining of Mineral Deposits*, 14(4), 66-81. <https://doi.org/10.33271/mining14.04.066>
8. Khomenko, O., Kononenko, M., & Kosenko, A. (2022). *Processes of underground mining of ore deposits*, Dnipro: DUT, 206. [in Ukraine]. <https://doi.org/10.33271/dut.002>
9. Fomychov, V., Fomychova, L., Khorolskyi, A., Mamaikin, O., & Pochepov, V. (2020). Determining optimal border parameters to design a reused mine working. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15 (24), 3039-3049.
10. Khorolskyi A.O. (2021). Scientific approaches for proposing area efficient engineering in the mining of mineral deposits. *Physical and technical problems of mining*, (23), 149-173. [in Ukraine]. <https://doi.org/10.37101/ftpgp23.01.011>
11. Babets Ye. K., Sirotyuk S.V., Tsarikovskiy V.V. et al. (2010). *Determination and control of the allowable dimensions of structural elements of iron ore mining systems*, M.: Minprompolityky, 121. [in Ukraine].

Список літератури

1. Kosenko A.V. Improvement of sub-level caving mining methods during high-grade iron ore mining. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 1. Pp. 19–25. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/019>
2. Хоменко, О., Кононенко, М., Владыко, А., & Мальцев, Д. (2011). Горнорудное дело Украины в сети Интернет. Д.: НГУ. 2011. 288 с.
3. 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.
4. Хоменко, О., Кононенко, М., Мальцев, Д. Гірниче обладнання для підземної розробки рудних родовищ. Д.: НГУ, 2010. 340 с.
5. Bazaluk O, Petlovanyi M, Zubko S, Lozynskyi V. Sai K. Instability Assessment of Hanging Wall Rocks during Underground Mining of Iron Ores. *Minerals*. 2021. 11(8):858. Pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/min11080858>
6. Хоменко О.Є. Кононенко М.М., Савченко М.В. Технологія підземної розробки рудних родовищ: підручник; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2018. – 449 с. <https://doi.org/10.33271/dut.001>
7. Petlovanyi M., Malashkevych D., Sai K., Zubko S. Research into balance of rocks and underground cavities formation in the coal mine flowsheet when mining thin seams. *Mining of Mineral Deposits*. 2020. 14(4) Pp. 66-81. <https://doi.org/10.33271/mining14.04.066>
8. Хоменко О.Є., Кононенко М.М., Косенко А.В. Процеси підземної розробки рудних родовищ: підручник; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2022. 206 с. <https://doi.org/10.33271/dut.002>
9. Fomychov, V., Fomychova, L., Khorolskyi, A., Mamaikin, O., Pochepov, V. Determining optimal border parameters to design a reused mine working. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2020. 15 (24). Pp. 3039-3049.

10. Хорольський А.О. (2021). Наукові основи обґрунтування меж області раціонального проєктування при відпрацюванні родовищ корисних копалин. Физико-технические проблемы горного производства, 2021. (23), С. 149-173. <https://doi.org/10.37101/ftprgp23.01.011>

11. 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.

Надійшла до редакції 24.10.2022

Косенко А.В., Хорольський А.О.

УСТАНОВЛЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОЧИСНИХ (КОМПЕНСАЦІЙНИХ) КАМЕР ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ АКТИВНОГО КЕРУВАННЯ СТАНОМ ГІРСЬКОГО МАСИВУ

Мета. Підвищення ефективності видобутку багатих залізних руд системами підповерхового обвалення на основі розробки технології активного керування станом гірського масиву, що забезпечить стійкість відслонень очисних (компенсаційних) камер та якість видобутої рудної маси.

Методика. Для досягнення поставленої мети використано комплекс сучасних методів досліджень, що включає аналіз літературних джерел, проектно-конструкторської документації та практики відпрацювання залізрудних родовищ на значних глибинах, теоретичні узагальнення лабораторних і промислових експериментів, метод функціональних характеристик визначення допустимих розмірів конструктивних елементів систем розробки залізрудних родовищ, техніко-економічний, графоаналітичний і кореляційний аналіз.

Результати. Встановлено, що об'єми очисних (компенсаційних) камер з плоскими похилими і вертикальними відслоненнями характеризуються більшим об'ємом ніж з плоскими горизонтальними та вертикальними відслоненнями. Також встановлені максимально можливі стійкі параметри відслонень очисних (компенсаційних) камер, утворених за допомогою вибухового відбивання свердловинними зарядами.

Наукова новизна. Виявлено резерви підвищення ефективності видобутку багатих залізних руд системами підповерхового обвалення на основі дослідження залежностей геометричних параметрів очисних (компенсаційних) камер від глибини та інтенсивності ведення очисних робіт. За рахунок обґрунтування наведених параметрів, здійснюється інтенсифікація процесів очисних робіт, що є складовою активного управління станом масиву гірських порід при підземному видобутку залізрудних родовищ.

Практична значимість. Розроблені технологічні рішення дозволять збільшити обсяги видобутку чистої руди на 5–51% залежно від гірничо-геологічних, гірничотехнічних і геомеханічних умов розробки покладів багатих залізних руд та інтенсивності ведення очисних робіт і, як наслідок: знизити втрати руди на 2,6–4,6%, збіднення – 2,8–5,2%; підвищити абсолютну якість рудної маси на 0,8–1,5%; збільшити економічну ефективність розробки виїмкових одиниць на 10,1–27,5%.

Висновки. Встановлено, що у процесі розробки родовищ багатих залізних руд з коефіцієнтом міцності $f=4-6$, середньої і нижче середньої стійкості та потужністю 15–40 м, які зосереджені в діапазоні глибин 1200–1400 м, стає можливим утворення стійких відслонень очисних (компенсаційних) камер об'ємом до 70% основного запасу очисної панелі, за умов збільшення інтенсивності технологічного процесу випуску руди до 8,8 т/м² за добу.

Ключові слова: багаті залізні руди, інтенсивність ведення очисних робіт, компенсаційна камера, очисна камера, система розробки підповерхового обвалення, інтенсивність випуску руди, клас розробки покладу, гідромонітор.

About the authors

Kosenko Andrii Volodymyrovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Junior Researcher of the 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 the 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

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, khorolskiyaa@ukr.net.

УДК 004.852

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-20-29](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-20-29)

Г.О. Теличко, І.В. Блазаренас, Д.О. Седов

АВТОМАТИЗАЦІЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У СТВОРЕННІ ЧАТ-БОТА ЗА СТАНДАРТАМИ INDUSTRY 4.0

Мета. Представлення чат-ботів та опис їх ролі в Industry 4.0; обговорення застосування чат-ботів у різних галузях; розробка моделі чат-бота з застосуванням штучного інтелекту

Методика. Визначення ключової концепції; охоплення загальної архітектури чат-ботів з аналізом намірів користувачів та надання детальної інформації

Результати. Грунтуючись на методах дослідження, була розроблена модель здатна визначати, яка категорія зображена на картинці. ('Літак', 'Автомобіль', 'Птах', 'Кіт', 'Дорога', 'Собака', 'Жаба', 'Кінь', 'Корабель', 'Вантажівка'). Результати показали більше 80% правильних відповідей. На основі представленої, простої моделі може бути реалізована складніша обчислювальна система, що дозволяє ідентифікувати особу, або інші категорії.

Наукова новизна. Автоматизація із застосуванням штучного інтелекту у створенні чат-бота за стандартами industry 4.0 із застосуванням передових технологій.

Практичне значення. Автоматизована модель із застосуванням штучного інтелекту з можливістю ідентифікації. Підключення нових бібліотек машинного навчання дозволило досягти високої точності визначення категорії в більш ніж 80%.

Ключові слова. Industry 4.0, штучний інтелект, телеграм-бот, ідентифікація.

Вступ. Чат-бот – це агент штучного інтелекту (ШІ). Він використовується для забезпечення взаємодії людини із комп'ютерною системою. Взаємодія забезпечується природними мовами. Різні нещодавно використані мобільними програмами для обміну повідомленнями, блоги та смартфони служать тієї ж мети. ШІ існує вже багато років і одним із найперспективніших висловів взаємодії між людьми та машинами є чат-бот. Хоча теоретично чат-бот можна перетворити на щось ще складніше, але за своєю суттю він, як і раніше, залишається клієнтським комп'ютером, що реагує на введення з веб-інтерфейсу.

Традиційно виробничі та промислові методи функціонують і роблять свій внесок у промисловість за рахунок використання автоматизації, але зі змінами та тенденціями в Індустрії 4.0 промисловість також удосконалюється за рахунок розвитку обміну даними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведено аналіз сучасних методів машинного навчання з бібліотеками автоматичного тренування [2], потенціалу застосування чат-бота [3-4], основ взаємодії між користувачем та інтерфейсом [4], основи архітектури нейронних мереж [1], процесом навчання [5-7].

Мета дослідження. Основна мета Індустрії 4.0 – створення автоматизації процесу. Справа не в тому, щоб замінити людей на комп'ютери, а в тому, щоб встановити нову форму взаємодії між двома. Має бути розроблений ефективний інтерфейс для забезпечення автоматизації за участю людини.

Методи дослідження. Наведені дослідження були засновані на загальній архітектурі машинного навчання методом зіставлення та тестування ручним методом

Виклад основного матеріалу. Програми для чат-ботів — це технології, які допомагають спілкуватися, оптимізуючи спілкування між окремими особами та постачальниками. У той самий час вони дають підприємствам новий спосіб взаємодії із клієнтами з допомогою зниження традиційних витрат за обслуговування клієнтів. На рисунку 1 показано роль чат-ботів.

Це, у свою чергу, зміцнює процес взаємодії з клієнтами та операційну ефективність. Чат-бот повинен мати можливість ефективно виконувати обидві ці

завдання, наприклад, відповідати на запитання та спілкуватися з користувачем [4]. Тут важливою є людська підтримка. Участь людини потрібна при налаштуванні, навчанні та оптимізації систем чат-ботів, незалежно від платформи. Здається, що чат-боти - це своєрідний напівінтелектуальний інструмент управління, який повинен пропонувати користувачам інтерактивну можливість відповісти на їхні запитання. Простий у використанні чат-бот значно підвищить продуктивність. Чат-бот став дуже популярним у різних сферах бізнесу, тому що він задовольняв потребу обслуговування клієнтів без найму додаткового персоналу.



Рисунок 1 – Нова роль чат-ботів

Деякі з переваг чат-ботів включають:

- Простота використання. Чат-боти призначені для зручної взаємодії з людьми.
- Цілодобова доступність. Чат-боти автоматизовані, тому вони доступні 24/7 для задоволення вимог клієнтів.
- Індивідуальний досвід. Чат-боти надають користувачам персоналізований досвід. У багатьох галузях електронної комерції чат-боти діють як індивідуальні рекламні агенти.
- Постійне вдосконалення. Завдяки технологіям штучного інтелекту, відповідно до поточного попиту користувачів, чат-боти постійно вдосконалюються. Чат-боти використовують алгоритми штучного інтелекту обробки питань. По-перше, алгоритм перевіряє останню транзакцію чату, ініційованого клієнтом, а потім діє на вирішення поточної проблеми. AI, ML та NLP [6] сприяють створенню зручних для користувача рішень.

Чат-бот NLP може в деяких ситуаціях диктувати кращий спосіб взаємодії зі своїми користувачами. Ці системи NLP беруть проблему користувача, позначають її та створюють формальний опис цієї проблеми з використанням методів машинного навчання. Ця система NLP навчає чат-бота на багатьох прикладах і надає користувачам більш якісні та корисні результати. Це потребує навчання у багатьох різних сценаріях. Викладачі чатів повинні поводитися формальним чином, щоб користувачі залишалися залученими до розмови. Немає єдиного способу поставити питання. Якщо користувач ставить певні питання певним чином, очікується, що чат-бот відповість так само. Програми NLP можна використовувати для створення чат-ботів, які розуміють людські взаємодії та реагують відповідно до поведінки та відношення користувача.

NLP складається із трьох основних областей:

1. Одиниця природної Мови, які ми використовуємо для спілкування з іншими в повсякденному житті, дуже гнучкі. Перш ніж ми розпочнемо масштабування, ми повинні провести логічні операції, які гарантують, що звичайні алгоритми комп'ютера розуміють нашу повсякденну мову (NLU).

2. Генерація природної мови (NLG). Оскільки бухгалтер аналізованої компанії використовує цей процес, система бухгалтерського обліку автоматично перевіряється та обробляється. Модуль NLG генерує природні мови.

3. Взаємодія природною мовою (NLI). Після проходження NLU та NLG, виходячи з вимог клієнта, його вимог проводиться навчання взаємодії ботів через NLI.

Скриптові чат-боти створюються за допомогою мови програмування, а чат-боти зі штучним інтелектом запускаються залежно від інформації, яку вони одержують від користувачів. Скриптові чат-боти (скрипти). Якщо хтось щось запитує, скриптові чат-боти не можуть відповісти, але можуть вловити загальну тему. Чат-боти зі штучним інтелектом. Чат-боти із штучним інтелектом розробляються з урахуванням NLP [7]. Інтелектуальні агенти можуть отримати уроки зі своїх минулих взаємодій і дати відповідні відповіді. В даний час ці чати спілкуються з клієнтами за допомогою голосу або тексту.

Чат-боти, що надають інформацію, належать до категорії інформаційних служб, а також чат-боти, які допомагають людям отримувати послуги або інформацію. Узагальнені (або пріоритетні) моделі розмов поділяються на два основні типи: генеративні (або пріоритетні) моделі та селективні моделі. Зауважте, що гібриди також можливі. Правильно навчена модель враховує попередні рядки діалогу та передбачає контекст, що веде до наступного рядка.

На рисунку 2 показано ілюстративний приклад селективної моделі.

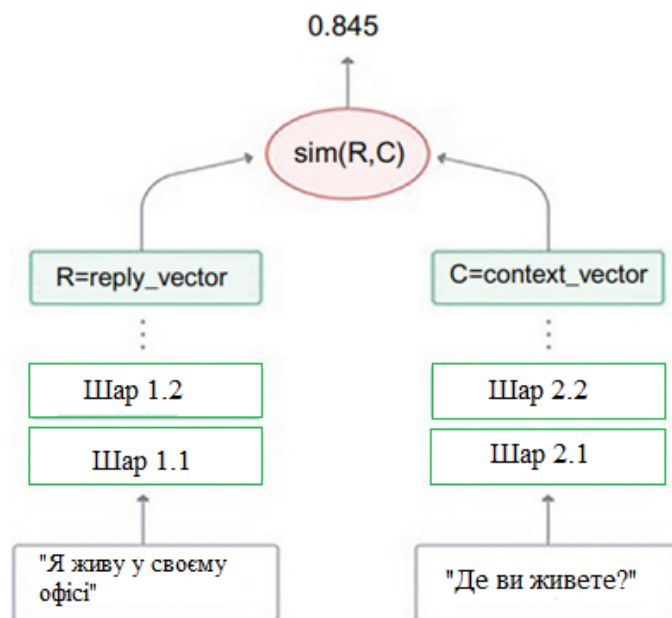


Рисунок 2 – Селективна модель

Основна проблема для будь-якого чат-бота - зрозуміти намір користувача та розшифрувати прихований намір повідомлення та запиту. Чим вищий інтелект чат-бота, тим вища його здатність читати розмови споживачів та розкривати їхні наміри. Інтерпретація повідомлення сучасними чат-ботами є важливою ціннісною

пропозицією. В результаті компанії-розробники чат-ботів тепер приділяють більше уваги створенню алгоритмів, які є гнучкими обробляти повідомлення користувачів. Враховуючи, що роботи можуть відповідати тільки відносно певним чином, багато чат-ботів можуть відчувати труднощі з розпізнаванням наміру запиту, коли йому висуваються запити з різноманітною структурою речення, синтаксисом або послідовністю слів. Наразі цю проблему можна творчо вирішити за допомогою сучасних алгоритмів чат-ботів. Сьогоднішні чат-боти, щоб краще зрозуміти запит клієнта, порівнюють запит із попередніми запитами та знайти версії, що відповідають поточній ситуації[4]. Завдяки цьому можна трохи наблизитись до розуміння намірів клієнта, навіть якщо чат-бот все ще не може розшифрувати запит.

Нарешті, коли чат-бот виходить із лабораторії розробки, його потрібно протестувати перед використанням. Тестування чат-ботів є складним. Оскільки можливості NLP постійно покращуються, чат-боти тепер часто оновлюються, тому механізм тестування слід використовувати для кожного оновлення, щоб перевірити вплив кожного додавання цінності. Серед методів тестування чат-ботів перший фокусується на автоматизованому тестуванні за допомогою різних платформ автоматичного тестування, таких як testYourBot, Bot Testing, Zypnos, Dimon та інші. Ці платформи автоматизованого тестування можуть оцінювати результати тестування та тестувати код сценарію у різних тестових сценаріях. Другий метод тестування – ручне тестування розмовної логіки. Такі тести зазвичай проводять у групі тестувальників. Користувачі перевіряють бота в різних варіантах використання та контекстах та оцінюють результати. Створення більш людського чат-бота.

Зрештою, що не менш важливо, складність полягає у створенні чат-бота, який створює у користувача на іншому кінці враження людського чату. Щоб бути ефективним, чат-бот повинен враховувати культурні особливості, реагувати на вітання та особисті жести, а також заспокоювати людей під час розмови [5]. Щоб досягти успіху, особистість чат-бота повинна подобатися цільовій аудиторії. Для створення кращого чат-бота зі штучним інтелектом потрібні витрати часу та навчання. Таким чином, він може легко визначити правильні почуття та емоції людського голосу та відповісти правильним тоном.

Основне завдання полягає в тому, щоб зрозуміти наміри користувача та створити чат-бота-людину. Пропонована модель реалізована для розуміння намірів користувача. Машинне навчання у чат-ботах для аналізу настроїв. Останнім часом для розуміння та класифікації тексту, що вводиться у діалогових чат-ботах, використовуються різні методи ML та NLP [7].

Інтелектуальний аналіз тексту відноситься до задачі пошуку або вилучення найбільш якісної інформації з тексту, тоді як класифікація тексту - це завдання інтелектуального аналізу тексту та дії з розділення набору текстових документів на два або більше класів, де кожен текстовий документ може бути віднесений до одного або кількох класів.

Відповідна робота та література вказують на те, що існує потреба в чат-ботах [3, 5]. Як показує теперішній час, використання чат-бота підвищує комфорт та простоту в отриманні послуг, інформації та контенту з боку користувача та розробника. У майбутньому чат-боти стануть невід'ємною частиною зв'язку за допомогою технологій. Отже, розберемося, як працює чат-бот. У чат-бота є два окремі завдання: аналіз запиту користувача та повернення відповіді. На рисунку 3 показано загальну архітектуру чат-бота.

Першим етапом взаємодії з чат-ботом – це аналіз запиту від користувача, з погляду входу [1]. Перш ніж надавати відповідь, чат-бот повинен проініціалізувати запит користувача. Маючи ключові дані, чат-бот обробляє вхідну інформацію.

Важливою умовою при створенні вікна введення є обмеження кількості символів для запобігання перевантаженості та збільшення тривалості обробки процесу [6].

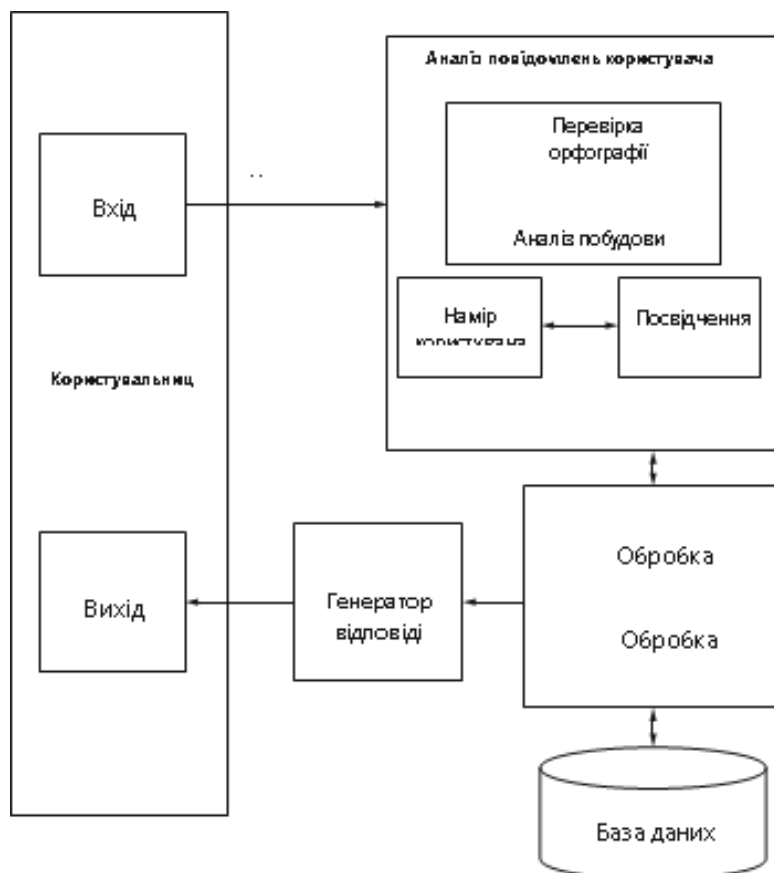


Рисунок 3 – Загальна архітектура чат-бота

Залежно від запиту, чат-бот може і не зберігати в собі правильну відповідь на запит, для таких випадків потрібне використання:

- Наперед визначеного тексту
- Текст, витягнутий із бази знань, що містить численні відповіді.
- Частина інформації, яка надається в контексті та заснована на даних користувача.
- Дані, що зберігаються в корпоративних системах
- Запит "неоднозначний", який чат-бот може інтерпретувати з чітким розумінням мети користувача.

Попередній аналіз наголошує на важливості обробки вхідних даних для більш швидкої ініціалізації запиту та видачі відповіді. Багато чат-ботів не використовують класифікацію даних, тим самим втрачають корисні «точки» даних. Завдання класифікатора полягає у вилученні ознак на основі аспектів та класифікації ознак. На рисунку 4 наведена запропонована нами модель.

Зображена структура виконує класифікацію даних від користувача над введеними даними у кілька етапів: збір даних, попередня обробка та класифікація отриманого. Дані для видачі відповіді можуть бути хаотичні та непослідовні. Часто отримані дані можуть бути непослідовними і різноманітними, тому важко реалізувати видачу

відповіді. Для вирішення та впорядкування даних, що вводяться, необхідна попередня обробка.

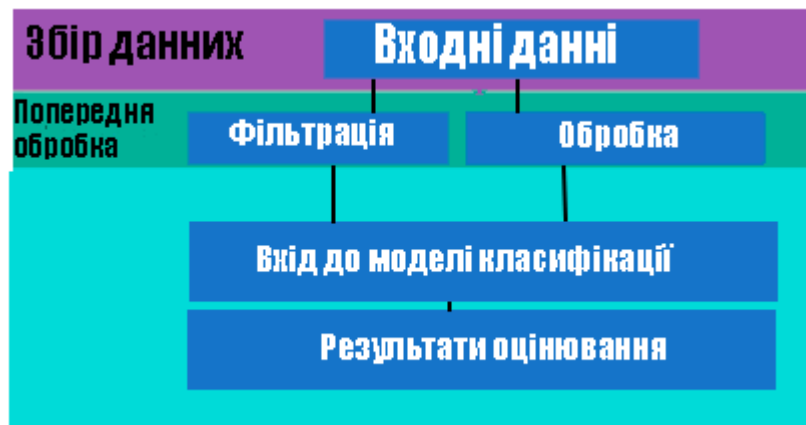


Рисунок 4 – Модель класифікації на основі намірів

Запропоновану модель чат-бота можна використовувати як помічник у багатьох сферах: освіта, медицина, служба підтримки (таблиця 1).

Таблиця 1 – Сфери застосування запропонованої моделі чат-бота

Сфера застосування	Особливості застосування
Освіта	Завдяки даному сервісу можна реалізувати швидке запитання-відповідь, що дозволяє учням мати менше проблем з отриманням зворотного зв'язку від викладачів. Також у зв'язку з останніми подіями про дистанційний режим навчання чат-бот дозволить зберігати та видавати актуальні завдання, підтримувати навчання дітей і дорослих, мотивувати.
Служби підтримки	Чат-бот дозволяє зробити огляд на перелік послуг, а застосування штучного інтелекту дозволить користувачеві вибрати відповідну пропозицію.
Формування новин	Завдяки штучному інтелекту можлива реалізація автоматичного визначення цензури. Для рядового користувача, штучний інтелект зможе фільтрувати стрічку новин, на основі інтересів і переваг.
Медицина	Використання чат-ботів, створених за допомогою ШІ, може допомогти в організації візитів до лікаря. Вони також можуть бути корисні для замовлення рецептів та перевірки цін на ліки.

Чат-боти дозволяють економити час та структуровано взаємодіяти та вибирати список послуг, вони доступні 24 години на добу і сім днів на тиждень, готові надати рішення до тематичної проблеми. Чат-боти працюють цілодобово і без вихідних, що дозволяє людям використовувати їх у будь-якому місці, у будь-який час протягом усього року.

На основі представлених даних було реалізовано чат-бот зі штучним інтелектом. На рисунку 6 наведено реалізацію запропонованої моделі на мові Python. Навчання моделі реалізовано за допомогою бібліотеки tensorflow.

Принцип роботи полягає у перекладі зображення з формату кольорів RGB в BGR для обробки бібліотекою OpenCV [2]. Далі слідує дискретизація з використанням відношення площі пікселя. Оброблене зображення зіставляється, з отриманими зображеннями з бібліотеки tensorflow.

Для реалізації було обрано платформу Telegram. Чат-бот @Friendlyneuro_bot розпочинає свою роботу з команди "/start". За навчання моделі відповідає команда "/train".

Чат-бот здатний розрізняти, що саме знаходиться на зображенні, виходячи з обраних категорій ('Літак', 'Автомобіль', 'Птах', 'Кіт', 'Дорога', 'Собака', 'Жаба', 'Кінь',

'Корабель', 'Вантажівка']). Наведені на рисунку 5 результати показують що бот має високу швидкість обробки та правильність відповіді, більш ніж у 80%.

```

from telegram.ext import *
from io import BytesIO
import cv2
import numpy as np
import tensorflow as tf
import ssl
ssl._create_default_https_context =
ssl._create_unverified_context
TOKEN =
"5436581769:AAGskwr3eeCmKmAvJaS8_67HKtzWLb
GFrOk"

(x_train, y_train), (x_test, y_test) =
tf.keras.datasets.cifar10.load_data()
x_train, x_test = x_train / 255, x_test / 255

class_names = ['Plane', 'Car', 'Bird', 'Cat', 'Dear', 'Dog',
'Frog', 'Horse', 'Ship', 'Truck']

model = tf.keras.models.Sequential()
model.add(tf.keras.layers.Conv2D(32, (3, 3),
activation='relu', input_shape=(32, 32, 3)))
model.add(tf.keras.layers.MaxPooling2D((2, 2)))
model.add(tf.keras.layers.Conv2D(64, (3,3),
activation='relu'))
model.add(tf.keras.layers.MaxPooling2D((2, 2)))
model.add(tf.keras.layers.Conv2D(64, (3,3),
activation='relu'))
model.add(tf.keras.layers.Flatten())
model.add(tf.keras.layers.Dense(64, activation='relu'))
model.add(tf.keras.layers.Dense(10,
activation='softmax'))
def start(update, context):
    update.message.reply_text("Ласкаво просимо!!!")

def help(update, context):
    update.message.reply_text("""
/start - Starts conversation
/help - Shows this message
/train - Trains neural network
""")

def train(update, context):
    update.message.reply_text("Модель проходить
навчання..")

    model.compile(optimizer='adam',
loss='sparse_categorical_crossentropy',
metrics=['accuracy'])
    model.fit(x_train, y_train, epochs=10,
validation_data=(x_test, y_test,))
    model.save('cifar_classifier.model')
    update.message.reply_text("Готово! Тепер ви можете
відправити фото!")

def handle_message(update, context):
    update.message.reply_text("Будь ласка, навчіть
модель і надішліть зображення")

def handle_photo(update, context):
    file = context.bot.get_file(update.message.photo[-
1].file_id)
    f = BytesIO(file.download_as_bytearray())
    file_bytes = np.asarray(bytearray(f.read()),
dtype=np.uint8)

    img = cv2.imdecode(file_bytes,
cv2.IMREAD_COLOR)
    img = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_RGB2BGR)
    img = cv2.resize(img, (32, 32),
interpolation=cv2.INTER_AREA)

    prediction = model.predict(np.array([img / 255]))
    update.message.reply_text(f"На цьому зображенні я
бачу {class_names[np.argmax(prediction)]}")

updater = Updater(TOKEN, use_context=True)
dp = updater.dispatcher

dp.add_handler(CommandHandler("start", start))
dp.add_handler(CommandHandler("help", help))
dp.add_handler(CommandHandler("train", train))
dp.add_handler(MessageHandler(Filters.text,
handle_message))
dp.add_handler(MessageHandler(Filters.photo,
handle_photo))

updater.start_polling()
updater.idle()

```

Рисунок 6 – Код програми

Більшість збігів, буде повернуто категорією, чи то кішка, собака, чи літак. На отриманих результатах, можемо побачити хибну відповідь коня, коли зображений був кіт. Найімовірніше, це пов'язано з контуром, який був вважений бібліотекою OpenCV. Контур має велику схожість з контуром коня.

Висновок. Запропоновано модель чат боту зі штучним інтелектом для розпізнавання зображень. Проведено аналіз існуючих рішень чат-ботів, за результатами аналізу визначено перелік вимог необхідні функції і напрямки Виконано аналіз предметної області, складено перелік вимог до функціональності засобу, здійснено

огляд проблеми, яку вирішує програмний додаток, а також існуючих способів її подолання.

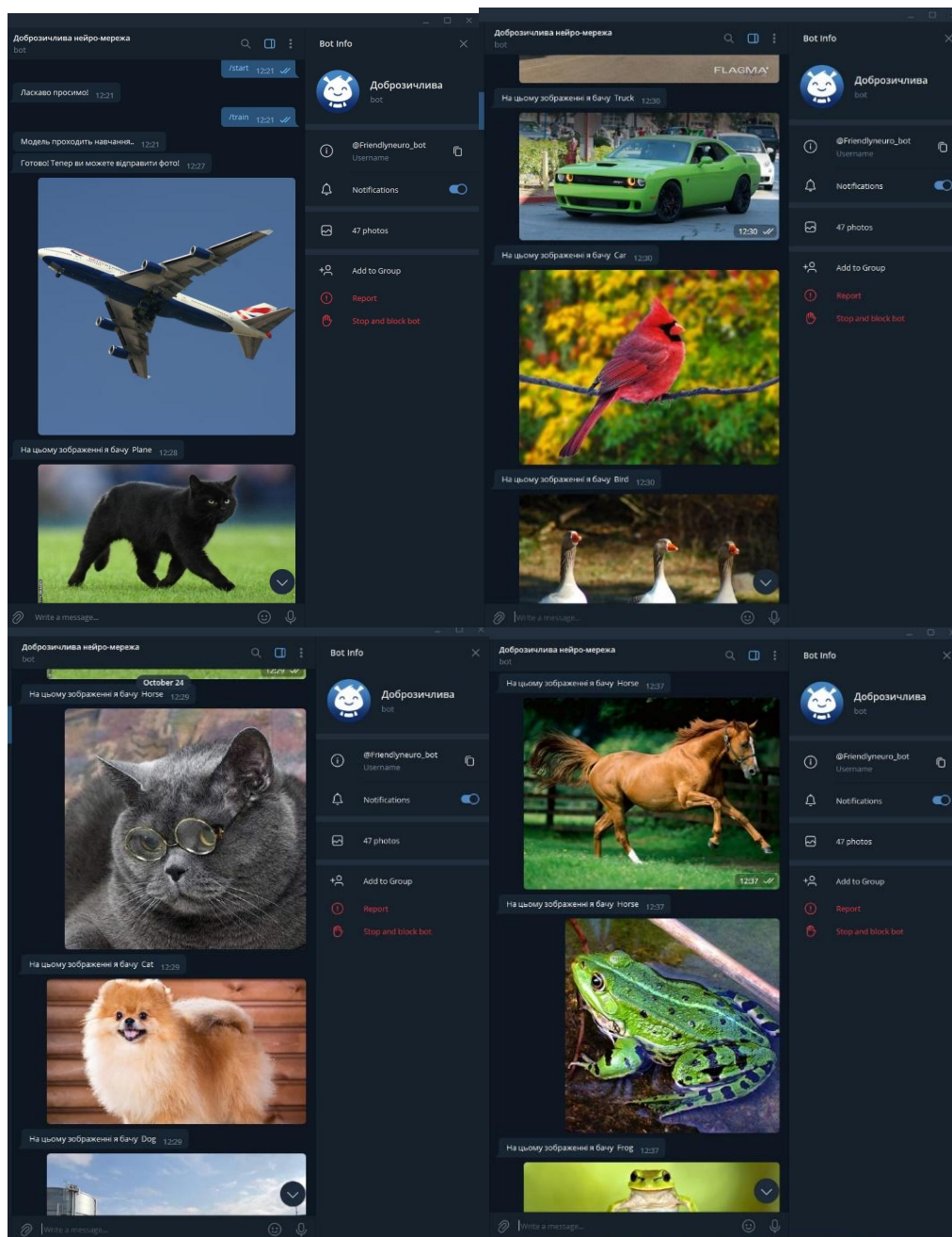


Рисунок 5 – Результати роботи чат-бота @Friendlyneuro_bot

Розроблено програмну реалізацію моделі чат-бота на мові Python. Застосовано сучасні функції та методи для реалізації моделі: підключення бібліотеки tensorflow, переклад зображення з формату кольорів RGB в BGR для обробки бібліотекою OpenCV, передискретизація з використанням відношення площі пікселя. У статті наведена реалізація чат-бота @Friendlyneuro_bot для платформи Telegram. Аналіз результатів показав високу швидкість обробки та правильність відповіді більш ніж у 80%.

Наведена реалізація демонструє простоту в розумінні та ефективність застосування штучного інтелекту в аналізі та обробці інформації, що сприяє скороченню часу та підвищенню комфорту для користувача.

Список літератури

1. С. О. Суботін (2020). Нейронні мережі: теорія та практика Житомир. (Євенок, ст. 13-26.).
2. Ярослав Омеляненко (2020). Еволюційні нейромережі на мові Python. (ДМК-Пресс, ст. 47-59).
3. Preeti Bhat, Harsha Pariyani(2021). Literature survey of various chatbots (DOI: 10.3390/info13010041, p. 1153-1159).
4. Chatfuel, Dialogflow, Microsoft Bot (2019). Hands-On Chatbots and Conversational UI Development: Build chatbots and voice user interfaces (ISBN: 1788294661, p. 21-28).
5. Guendalina Caldarini, Sardar Jaf, Kenneth McGarry (2022). A Literature Survey of Recent Advances in Chatbots, (DOI: <https://doi.org/10.3390/info13010041> p.45-48).
6. How chatbots use NLP, NLU, and NLG to create engaging conversations (<https://www.senseforth.ai/conversational-ai/chatbots-create-engaging-conversations>).
7. NLP vs. NLU vs. NLG: the differences between three natural language processing concepts (<https://www.ibm.com/blogs/watson/2020/11/nlp-vs-nlu-vs-nlg-the-differences-between-three-natural-language-processing-concepts/>)
8. NLP, NLU, NLG and how Chatbots work (<https://chatbotlife.com/nlp-nlu-nlg-and-how-chatbots-work-dd7861dfc9df>)

References

1. S. O. Subbotin (2020). Neuronal networks: theory and practice Zhytomyr. (Yevenok, pp. 13-26.).
2. Yaroslav Omelyanenko (2020). Evolutionary Neuronemergences in Python. (DMK-Press, pp. 47-59).
3. Preeti Bhat, Harsha Pariyani (2021). Literature survey of various chatbots (DOI: 10.3390/info13010041, p. 1153-1159).
4. Chatfuel, Dialogflow, Microsoft Bot (2019). Hands-On Chatbots and Conversational UI Development: Build chatbots and voice user interfaces (ISBN: 1788294661, p. 21-28).
5. Guendalina Caldarini, Sardar Jaf, Kenneth McGarry (2022). A Literature Survey of Recent Advances in Chatbots, (DOI: <https://doi.org/10.3390/info13010041> p.45-48).
6. How chatbots use NLP, NLU, and NLG to create engaging conversations (<https://www.senseforth.ai/conversational-ai/chatbots-create-engaging-conversations>).
7. NLP vs. NLU vs. NLG: the differences between three natural language processing concepts -processing concepts/).
8. NLP, NLU, NLG and how Chatbots work (<https://chatbotlife.com/nlp-nlu-nlg-and-how-chatbots-work-dd7861dfc9df>).

Надійшла до редакції 30.10.2022

H. Telychko, I. Blazarenas, D. Sedov

AUTOMATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CREATING A CHAT-BOT ACCORDING TO INDUSTRY 4.0 STANDARDS

Purpose: Presentation of chatbots and description of their role in Industry 4.0; discussion the use of chatbots in various industries; development of a chatbot model using artificial intelligence.

Methodology: Defining a key concept; covering the general architecture of chatbots with user intent analysis and providing detailed information.

Results: Based on the research methods, a model capable to determine which category ('Plane', 'Car', 'Bird', 'Cat', 'Road', 'Dog', 'Frog', 'Horse', 'Ship', 'Truck') is depicted in the picture, has been developed. The results have shown more than 80% correct answers. On the basis of the presented simple model, a more complex computing system can be implemented, which allows identifying a person or other categories.

Scientific novelty: Automation in the use of artificial intelligence while creating a chat-bot according to Industry 4.0 standards by means of advanced technologies.

Practical significance: An automated model with artificial intelligence and the possibility of identification. The connection of new libraries of machine learning has made it possible to achieve such high accuracy of category definition as more than 80%.

Keywords: Industry 4.0, artificial intelligence, Telegram bot, identification.

Відомості про авторів

Теличко Ганна Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та телекомунікацій ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; hanna.telychko@donntu.edu.ua

Блазаренас Іван Віталійович, студент ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; ivan.blazarenas.kita@donntu.edu.ua

Седов Данил Олександрович, студент ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; danylo.siedov.kita@donntu.edu.ua

Telychko Hanna, PhD, Docent of Automation and Telecommunications Department, Donetsk National Technical University; hanna.telychko@donntu.edu.ua

Blazarenas Ivan Vitaliiovich, student of Donetsk National Technical University; ivan.blazarenas.kita@donntu.edu.ua

Sedov Danyl Oleksandrovych, student of Donetsk National Technical University; danylo.siedov.kita@donntu.edu.ua

УДК 622.2:519.2

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-30-44](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-30-44)

С.В. Волков, О.П. Каюн

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОХОРОННИХ СПОРУД ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБОК ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СТІЙКОСТІ БІЧНИХ ПОРІД У ВУГЛЕПОРОДНОМУ МАСИВІ

Мета. Дослідження деформаційних характеристик охоронних споруд із подрібненої породи у різних умовах стиснення для забезпечення та прогнозування стійкості бічних порід та виробок у вуглепородному масиві.

Методи. Для досягнення поставленої мети були виконані лабораторні дослідження деформаційних характеристик подрібненої породи при компресійному стисненні та при її одновісному стисненні, з можливістю бічного розширення вихідного матеріалу.

Результати. В результаті виконаних експериментальних досліджень виявлені характерні особливості деформування охоронних споруд із подрібненої породи. Встановлено, що закладний матеріал неоднозначно визначає здатність відкликатися на вплив зовнішніх чинників, які проявляються при розвантаженні вуглепородного масива з виробками. Така неоднозначність обумовлена різними умовами стиснення. Ефект від застосування закладання виробленого простору, як способу охорони виробок, забезпечується в умовах, коли модуль стиснення подрібненої породи, як системи фракцій закладного матеріалу, знаходиться у діапазоні значень $\Delta r \geq (350 \dots 600) \text{ мм/м}$. В цьому випадку, характеристика жорсткості закладних матеріалів дозволяє обмежити конвергенцію бічних порід у виробленому просторі виїмкової ділянки.

Новизна. В умовах компресійного стиснення або одновісного стиснення, з можливістю бічного розширення подрібненої породи, коли відбувається зростання жорсткості закладних матеріалів, при порівнянні відносної деформації охоронних споруд на різних етапах деформування, розбіжність між значеннями цієї величини змінюється у вигляді функції гіперболічного котангенсу.

Практичне значення. При застосуванні закладання виробленого простору, як способу охорони підготовчих виробок на виїмкових ділянках вугільних шахт, необхідно враховувати деформаційні властивості закладного матеріалу в умовах бічного розширення подрібненої породи.

Ключові слова: закладний матеріал, спосіб охорони, відкатний штрек, деформаційні характеристики, модуль стиснення, жорсткість.

Вступ. Безпека, ритмічність та ефективність робіт у вугільній шахті, багато в чому визначається станом підготовчих виробок. На шахтах Центрального району Донбасу (ЦРД) набуває все більшої актуальності проблема забезпечення стійкості відкатувальних штреків у зв'язку зі збільшенням глибини гірничих робіт та погіршенням гірничо-геологічних умов. Стійкість підготовчих виробок у межах виїмкової ділянки залежить від способу охорони, типу та конструкції кріплення, встановленого у виробленні. Охорона підготовчих виробок ціликами вугілля, як спосіб що найбільш широко застосовується в даний час на шахтах ЦРД, призводить до нераціонального використання запасів корисних копалин. У зоні впливу очисних робіт практикований спосіб охорони не забезпечує безремонтного підтримання штреків. При використанні цього способу витрати на забезпечення експлуатаційного стану виробок збільшуються одночасно з обсягом ремонтних робіт.

Для забезпечення високих показників видобутку вугілля на шахті, необхідно забезпечити нормальні умови експлуатації виїмкових ділянок. Це можливо при вирішенні питань застосування ефективних способів охорони, які забезпечують стійкість

підготовчих виробок. При вирішенні складних питань забезпечення стійкості підготовчих виробок, полегшити ситуацію можливо за рахунок застосування закладання виробленого простору. Володіючи певними фізико-механічними властивостями, закладні матеріали із подрібненої породи використовують для охоронних споруд підготовчих виробок що дозволяє зберегти їх експлуатаційні функції.

Аналіз літературних даних и постановка проблеми.

Світовий досвід роботи вугільних шахт показує [1,2,3], що найбільш сприятливий вплив на стан бічних порід і підготовчих виробок, надає спосіб управління покрівлею закладанням виробленого простору. Закладання виробленого простору з використанням дробильно-закладних комплексів, успішно використовувалось в Україні у 1970-1990 р.р.

Вважається [1,2], що залишення породи у шахті дозволить вирішувати складні питання управління геомеханічними процесами у вуглепородному масиві з підготовчими виробками. Закладання виробленого простору забезпечує найменшу усадку товщі, що підробляється і обмежує переміщення бічних порід у виробленому просторі.

При визначенні фізико-механічних характеристик закладних масивів різного гранулометричного складу, необхідно враховувати зміну жорсткості закладного матеріалу, яка відбувається в результаті ущільнення неоднорідної (за розмірами) подрібненої породи в її загальному обсязі. Причому, чим неоднорідне порода, тим ефективніше процес перепакування [4,5].

Як альтернативні компоненти закладки, для забезпечення кращої стійкості закладних масивів, пропонується використовувати відходи збагачувальних фабрик, які розміщують у відпрацьованому просторі виїмкової ділянки. При гідравлічному способі подачі таких матеріалів, забезпечується задовільна стійкість закладних масивів та їх мінімальна усадка. Але при цьому, в процесі формування масиву, водяним потоком здійснюється винос дрібних фракцій використовуваного матеріалу в відкатний штрек. Відбувається замулювання виробки, що вимагає здійснення спеціальних заходів щодо управління відпрацьованою водою [6]. Використання подрібненої породи для утворення закладних масивів, дозволяє отримати стійкий закладний масив у виробленому просторі, усунути вивалоутворення у виробках і зменшити деформацію арочного кріплення. При використанні закладання виробленого простору подрібненою породою, як спосіб охорони виробок, конвергенція бічних порід знижується на 14% [3]. Очевидно те, що гранулометричний склад впливає на стійкість закладних масивів.

Питання контактної взаємодії між частинками сипучого матеріалу у зв'язку з трансформацією їх структури при стисканні, детально розглядаються у геомеханіці щодо фізико-механічних властивостей ґрунтів [7,8,9]. Однак крім неоднорідності гранулометричного складу подрібненої породи, закладний масив може формуватися при обмеженні можливості бічного розширення або без такого, що визначається певними умовами при навантаженні.

Виходячи з цього, забезпечення стійкості бічних порід та експлуатаційного стану гірничих виробок залежить від способу закладання виробленого простору та умов стиснення закладного матеріалу. Тому вивчення особливостей деформаційних

характеристик охоронних споруд із подрібненої породи в різних умовах стиснення, дозволить обґрунтувати вимоги до їх призначення.

Постановка завдання дослідження. Дослідження деформаційних характеристик закладних матеріалів із подрібненої породи в умовах компресійного стиснення та при одновісному стисненні, з можливістю бічного розширення вихідного матеріалу, що дозволить прогнозувати стійкість бічних порід.

Матеріали і методи досліджень деформаційних характеристик закладних матеріалів із подрібненої породи у різних умовах стиснення.

Розглядається компресійне стиснення подрібненої породи та одновісне стиснення подрібненої породи, з можливістю бічного розширення вихідного матеріалу. Компресію закладного матеріалу розглядаємо як окремий випадок трьохосного стиснення лінійно-деформованого тіла, коли відбувається ущільнення подрібненої породи [10]. Для дослідження фізико-механічних властивостей експериментальних зразків із подрібненої породи, проводився аналіз гранулометричного складу вихідного матеріалу. Визначення у вихідному матеріалі процентного вмісту подрібненої породи різних розмірів, було виконано просіюванням через набір стандартних сит з отворами 5,4,3,2,1 і 0,1мм[7,11]. Сума мас всіх фракцій відрізнялася від початкової маси вихідного матеріалу на 1%, що відповідає вимогам методики [11]. Зважування на технічних вагах було виконано з точністю до 0,01г.

Дані експериментальних досліджень з визначення гранулометричного складу подрібненої породи представлені в табл.1. При цьому використовувався матеріал з крупністю, що відповідає прийнятому в проведених дослідженнях масштабу (відношення модельних розмірів до натуральних 1:25).

Таблиця 1 – Дані лабораторних досліджень гранулометричного складу подрібненої породи за допомогою ситового аналізу

Отвори сит, мм	Розмір фракції, мм	Вміст в загальному обсязі, %
5	>5	4
4	4-5	16
3	3-4	19
2	2-3	24
1	1-2	18
0,1	0,1-1	14
	<0,1	5

На рис.1. представлений гранулометричний склад подрібненої породи у вигляді кумулятивної кривої крупності.

Гранулометричний склад подрібненої породи характеризується коефіцієнтом неоднорідності K_n . Цей коефіцієнт відображає розкид форми і розмірів подрібненої породи щодо середнього їх значення. Встановлене в результаті експериментальних досліджень значення

$$k_n = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 4,8 \quad (1)$$

характеризує неоднорідність вихідного матеріалу подрібненої породи.

При проведенні дослідів, в якості випробувального обладнання використовувався гідравлічний прес П-50 (рис.2.).

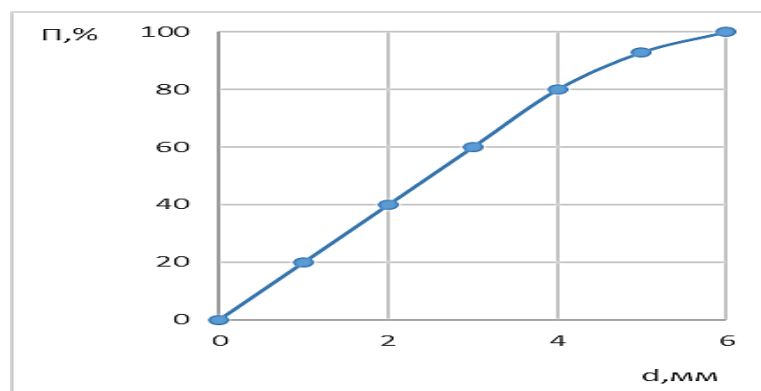


Рисунок 1 – Гранулометричний склад подрібненої породи у вигляді кумулятивної кривої крупності: d_{60} – контролюючий діаметр частинок, менше якого в цій породі 60% від всіх частинок, d_{10} – діючий діаметр частинок, відносно якого в цій породі 10% частинок мають менший діаметр.

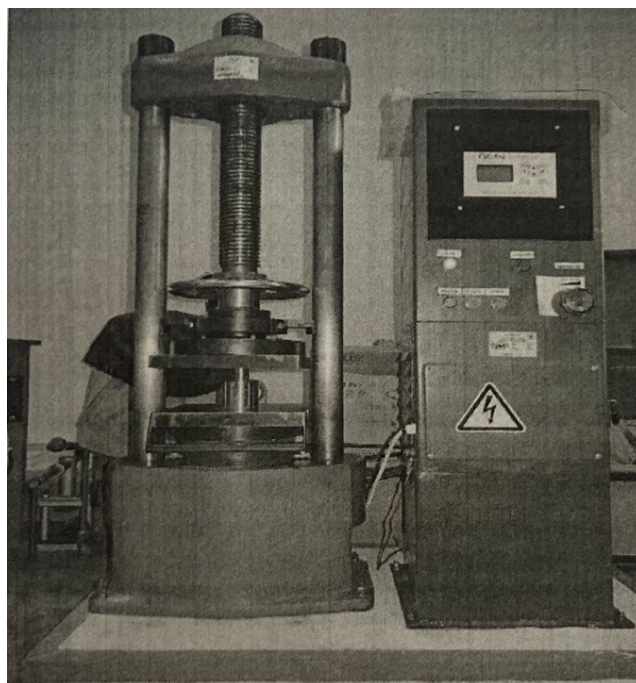


Рисунок 2 – Загальний вигляд гідравлічного преса П-50 для визначення деформаційних характеристик закладального матеріалу із подрібненої породи.

Максимальне зусилля, що розвивається пресом, дорівнює 50т. Для визначення деформаційних характеристик експериментальних зразків, останні розміщували між паралельними плитами преса. Експериментальні зразки піддавалися статичному навантаженню. Навантаження на зразки передавалося з постійною швидкістю. Фото експериментальних зразків представлено на рис. 3.

Для визначення компресійних властивостей закладного матеріалу використовували компресійний прилад, який складався із сталевго циліндра діаметром

$d_{ц}=0,075$ м, висотою $h_{ц}=0,075$ м та плунжеру. Сталевий циліндр наповнювали насипним матеріалом – подрібненою породою (рис. 3а).

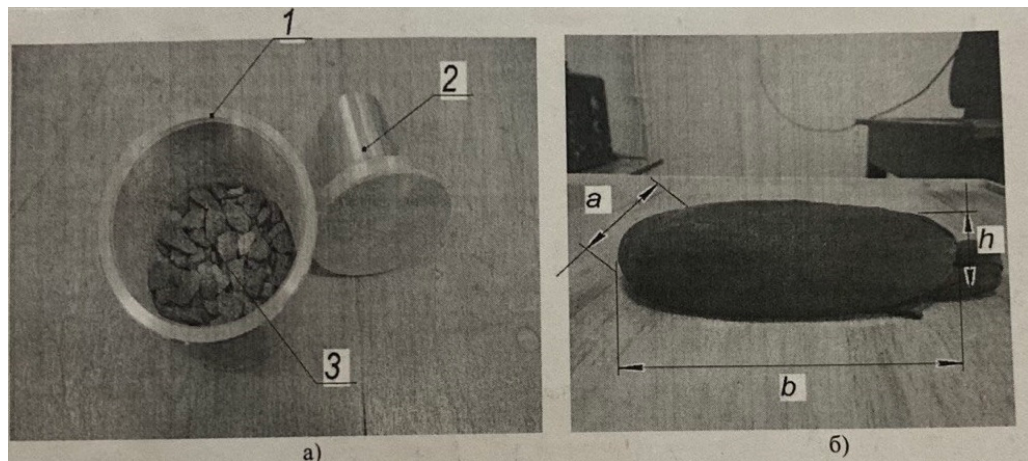


Рисунок 3 – Експериментальні моделі для дослідження деформаційних характеристик закладальних масивів при компресійному стисненні (а) і з можливістю бічного розширення (б): 1 – сталевий циліндр; 2 – плунжер; 3 – подрібнена порода; 4 – тканинна оболонка з подрібненою породою; a,b,h – геометричні розміри: a – довжина, м; b – ширина, м; h – висота, м.

Дослідження деформаційних характеристик закладного матеріалу з можливістю бічного розширення при одновісному стисненні, здійснювалося на експериментальних зразках (рис. 3б). Вихідний матеріал поміщали в тканинну оболонку, розміри зразка : $a = 0,172$ м; $b=0,168$ м; $h=0,04$ м.

Відносну деформацію λ експериментальних зразків при одновісному стисненні, визначали за виразом [11,12]:

$$\lambda = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (2)$$

де Δh – зміна висоти експериментального зразка, м;
 h_0 – початкова висота зразка, м.

Жорсткість C (Н/м) закладного матеріалу визначалась виходячи із закону Гука [12,13,14,15] за формулою:

$$c = \frac{F}{\Delta h}, \quad (3)$$

де F – величина стискаючої сили, Н.

Для показника стиснення експериментальних зразків застосовували модуль стиснення Δp (мм/м) [7]

$$\Delta p = 1000 \frac{\Delta h}{h_0} \quad (4)$$

Згідно [7], значення модуля стиснення Δp , характеризує величину стиснення стовпа подрібненої породи висотою в 1м при застосуванні додаткового навантаження.

Результати досліджень деформаційних характеристик закладного матеріалу.
На рис. 4 приведені графіки змін висоти h (м) експериментального зразка від величини стискаючої сили F (кН) при одновісному стисненні.

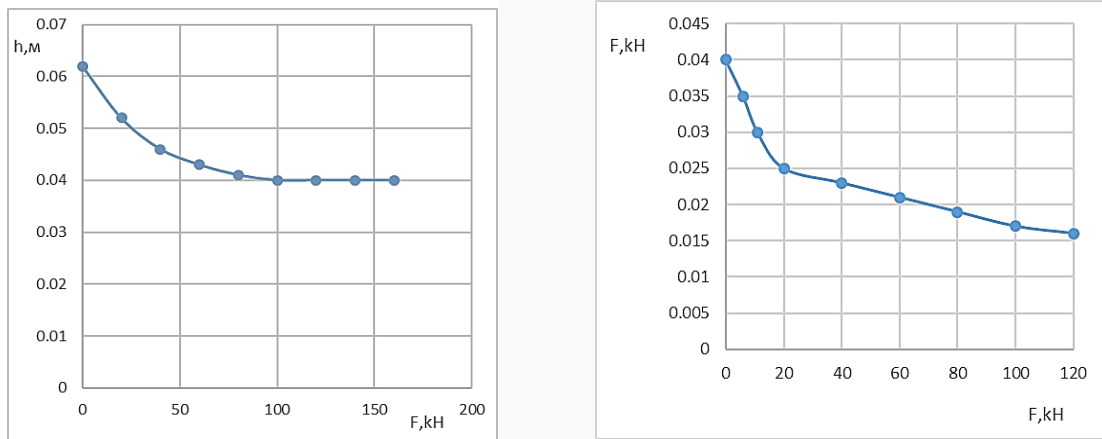


Рисунок 4 – Графіки змін висоти h (м) експериментального зразка від величини стискаючої сили F (кН) при одновісному стисненні: а) в компресійному приладі; б) при можливості бічного розширення подрібненої породи.

З рис. 4а видно, що при дії статичного навантаження, висота експериментального зразка у компресійному приладі змінюється від $h_0=0,063$ м до $h=0,04$ м при дії стискаючої сили $F=100$ кН. З рис. 4б видно, що при одновісному стисненні експериментального зразка, коли можливо бічне розширення подрібненої породи, зміна висоти фіксується з $h_0=0,04$ м до $h=0,017$ м коли значення стискаючої сили становить $F=100$ кН.

На рис. 5 наведені графіки зміни відносної деформації λ експериментальних зразків від величини стискаючої сили F (кН).

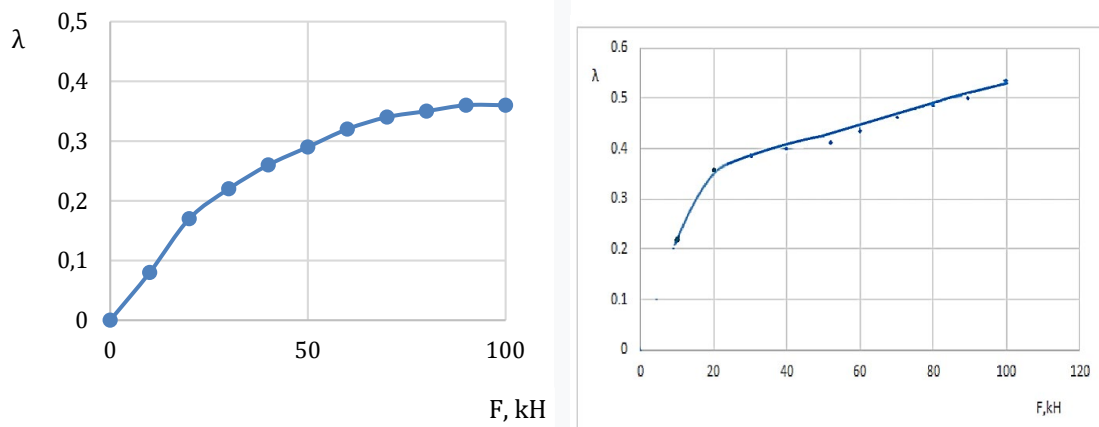


Рисунок 5 – Графіки зміни відносної деформації λ експериментальних зразків від величини стискаючої сили F (кН) при одновісному стисненні: а) в компресійному приладі; б) при можливості бічного розширення подрібненої породи.

В умовах компресійного стиснення подрібненої породи, при максимальному значенні стискаючої сили $F=100$ кН, відносна деформація експериментального зразка становить $\lambda=0,36$. (Рис. 5а). При одновісному стисканні подрібненої породи з

можливістю бічного розширення, коли $F=100$ кН, значення відносної деформації становить $\lambda = 0,55$ (рис. 5б).

У табл.2 наведені дані лабораторних досліджень стискання експериментальних зразків з подрібненої породи.

Таблиця 2 – Дані лабораторних досліджень стискання експериментальних зразків з подрібненої породи

Розмір фракції, мм	Умови стискання експериментальних зразків	Висота експериментального зразка до стискання h_0 , м	Висота експериментального зразка після стискання h , м	Зміна висоти Δh , м	Відносна деформація λ
0,1-5	У компресійному приладі	0,063	0,04	0,023	0,36
	З можливістю розширення подрібненої породи	0,04	0,018	0,022	0,55

На рис. 6 наведено графіки зміни жорсткості C (Н/м) закладного масиву від величини відносної деформації λ в різних умовах стиснення.

З рис. 6а видно, що зі збільшенням жорсткості вихідного матеріалу у компресійному приладі від $C=1,8 \cdot 10^6$ Н/м до $C=4,34 \cdot 10^6$ Н/м, тобто в 2,4 рази, величина відносної деформації змінюється від $\lambda = 0,17$ до $\lambda = 0,36$, тобто фіксується збільшення в 2,1 рази

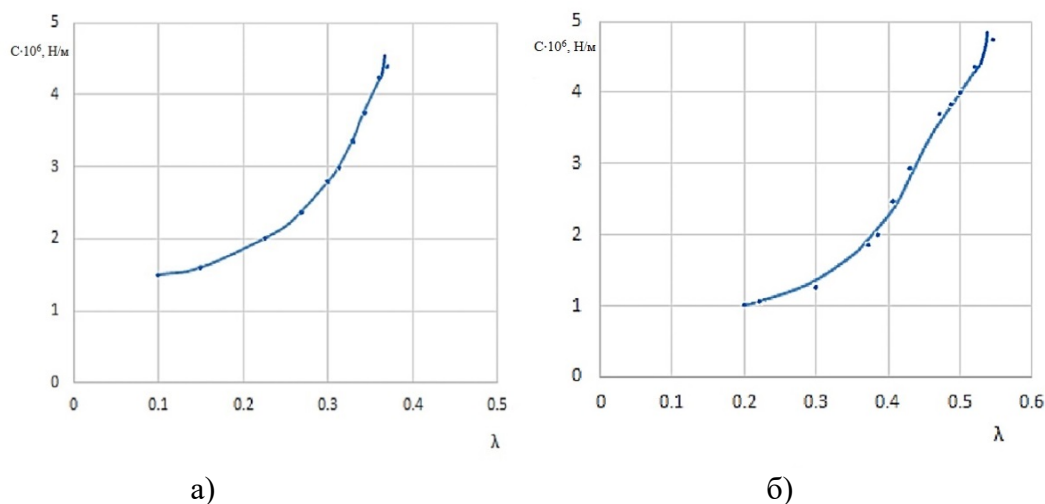


Рисунок – 6 Графіки зміни жорсткості C (Н/м) закладного масиву від величини відносної деформації λ при одновісному стисненні: а) в компресійному приладі; б) при можливості бічного розширення подрібненої породи.

При одновісному стисненні експериментального зразка, коли можливе бічне розширення насипного матеріалу, зі збільшенням жорсткості від $C=1,1 \cdot 10^6$ Н/м до $C=4,5 \cdot 10^6$ Н/м, тобто у 4 рази, відносна деформація збільшується у 2,5 рази, від $\lambda = 0,22$ до $\lambda = 0,55$ (рис 6б)

Позначимо через λ_6 відносну деформацію експериментального зразка з можливістю бічного розширення подрібненої породи, а через λ_k – відносну деформацію в компресійному приладі. Визначивши їхнє відношення у вигляді λ_6/λ_k , побудуємо графік зміни досліджуваного параметра від жорсткості C (Н/м) закладного масиву (рис.7)

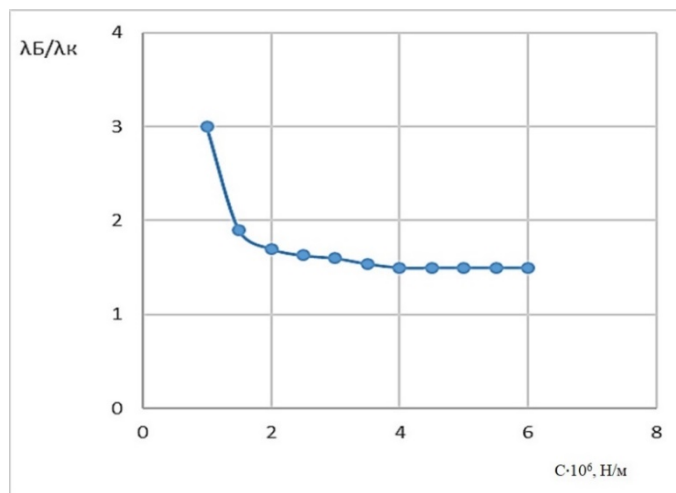


Рисунок 7 – Графіки зміни співвідношення λ_b/λ_k від їх жорсткості C (Н/м): λ_b – відносна деформація закладного масиву при одновісному стисканні з можливістю бічного розширення вихідного матеріалу; λ_k – відносна деформація закладного масиву у компресійному приладі.

З рис.7 видно, що при жорсткості закладного матеріалу $C=1,0 \cdot 10^6$ Н/м, відношення $\lambda_b/\lambda_k=3$. Потім, зі збільшенням жорсткості в інтервалі значень $C=(1,5-3) \cdot 10^6$ Н/м, досліджуваний параметр змінюється від $\lambda_b/\lambda_k=1,9$ до $\lambda_b/\lambda_k=1,6$. При $C>3,0 \cdot 10^6$ Н/м відношення $\lambda_b/\lambda_k=1,5$.

Встановимо різницю Π (%) при порівнянні величини відносної деформації експериментальних зразків із подрібненої породи в умовах компресійного стиснення та одновісного стиснення, з можливістю бічного розширення насипного матеріалу. При порівнянні враховується зміна жорсткості закладного масиву. Складемо табл.3.

Таблиця 3 – Розбіжність (Π ,%) у визначенні величини відносної деформації закладних матеріалів за різних умов стиснення

№	Жорсткість закладного матеріалу $c \cdot 10^6$, Н/м	Відносна деформація		Розбіжність Π , %
		λ_k в компресійному приладі	λ_b при умовах бічного розширення	
1	1,0	0,1	0,3	67
2	1,5	0,18	0,35	40
3	2,0	0,23	0,4	42
4	2,5	0,28	0,44	36
5	3,0	0,3	0,48	38
6	3,5	0,32	0,5	36
7	4,0	0,34	0,52	35
8	4,5	0,35	0,55	35
9	5,0	0,36	0,56	37
10	5,5	0,37	0,58	37
11	6,0	0,38	0,59	36

По даним табл.3 отримано значення Π_i функції (5)

$$\Pi=f(c). \quad (5)$$

Виходячи з рис.8, емпіричну формулу, що приблизно виражає функцію (5), шукаємо з [16], у вигляді

$$\Pi(c)=a \cdot \text{cth}(c)+b. \quad (6)$$

Значення коефіцієнтів a та b емпіричної формули (6), визначено методом найменших квадратів [17, 18].

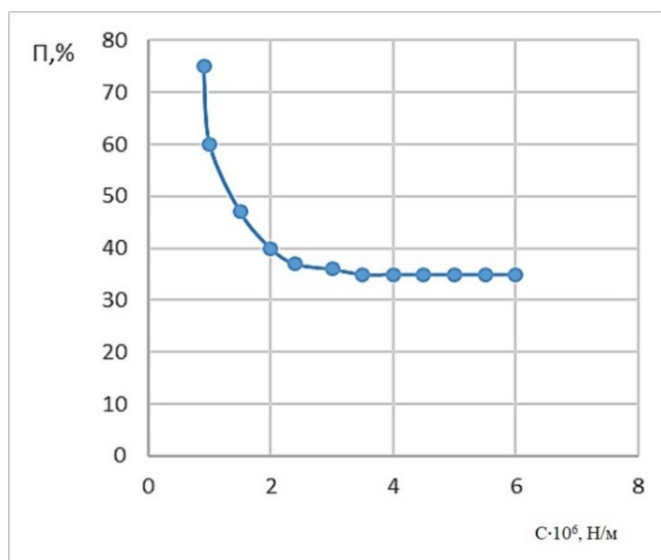


Рисунок 8 – Графік зміни різниці Π (%) при порівнянні величини відносної деформації експериментальних зразків із роздробленою породою за різних умов стиснення закладного матеріалу від жорсткості C (Н/м).

Відомо, що

$$a = r \frac{\sigma_n}{\sigma_c}, \text{ а } b = \bar{\Pi} - a\bar{C}^*$$

де C^* – гіперболічний котангенс жорсткості.

Згідно [17, 18], середні значення визначено як

$$\bar{C}^* = \frac{1}{n} \sum c_i^* \quad (7)$$

$$\bar{\Pi} = \frac{1}{n} \sum \Pi_i \quad (8)$$

Середньоквадратичне відхилення визначається як у [17, 18]

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{\sum (c_i^* - \bar{C}^*)^2}{n}} \quad (9)$$

$$\sigma_{\Pi} = \sqrt{\frac{\sum (\Pi_i - \bar{\Pi})^2}{n}} \quad (10)$$

а коефіцієнт кореляції

$$r = \frac{\text{cov}(C^*, \Pi)}{\sigma_C \sigma_\Pi} \quad (11)$$

де $\text{cov}(c, \pi)$ – коефіцієнтні коваріації.

Коефіцієнт коваріації визначається за виразом [17,18]

$$\text{cov}(C^*, \Pi) = \frac{\sum (c_i^* - \bar{C}^*)(\Pi_i - \bar{\Pi})}{n} \quad (12)$$

Складемо таблицю допоміжних величин (табл.4).

Таблиця 4 – Таблиця допоміжних величин

№ П/П	$c^* = \text{cth}(C)$	$c_i^* - \bar{C}^*$	$\Pi_i - \bar{\Pi}$	$(c_i^* - \bar{C}^*)(\Pi_i - \bar{\Pi})$	$(c_i^* - \bar{C}^*)^2$	$(\Pi_i - \bar{\Pi})^2$
1	1,313	0,2697	27,091	7,3067	0,0727	733,917
2	1,105	0,0615	0,091	0,0056	0,0038	0,008
3	1,037	-0,0060	2,091	-0,0126	0,0000	4,372
4	1,014	-0,0298	-3,909	0,1163	0,0009	15,281
5	1,005	-0,0384	-1,909	0,0732	0,0015	3,645
6	1,002	-0,0415	-3,909	0,1622	0,0017	15,281
7	1,001	-0,0427	-4,909	0,2094	0,0018	24,099
8	1,000	-0,0431	-4,909	0,2115	0,0019	24,099
9	1,000	-0,0432	-2,909	0,1258	0,0019	8,463
10	1,000	-0,0433	-2,909	0,1259	0,0019	8,463
11	1,000	-0,0433	-3,909	0,1693	0,0019	15,281
	11,5	0,0000	0,0	8,4934	0,0899	852,9091

За табл.4 допоміжних величин знаходимо:

- коефіцієнт кореляції

$$r = \frac{8,49}{0,09 * 8,81} = 0,97$$

що свідчить про високу кореляцію досліджуваних величин,

- емпіричні коефіцієнти дорівнюють

$$a = r \frac{\sigma_\Pi}{\sigma_C} = 99,44$$

$$b = \bar{\Pi} - a\bar{C}^* = -58,63$$

тому, шукана модель залежності має вигляд

$$\Pi(c) = a \cdot \text{cth}(c) + b = a \frac{e^c + e^{-c}}{e^c - e^{-c}} + b = 84,44 \text{cth}(c) - 58,63 \quad (13)$$

В табл.5. за виразом (4) наведені експериментальні дані значення модуля стиснення Δp (мм/м) закладного матеріалу з подрібненої породи.

Таблиця 5 – Значення модуля стиснення $\Delta\rho$ (мм/м) закладного матеріалу при експериментальних дослідженнях

Стискаюча сила F, кН	Значення $\Delta\rho$ (мм/м) в умовах	
	Компресійного стиснення	Бічного розширення подрібненої породи
10	60	220
20	170	350
30	230	370
40	250	400
50	300	420
60	310	450
70	330	470
80	340	500
90	350	520
100	360	550

За даними цієї таблиці побудовано графік зміни розбіжності Π (%) при порівнянні величини відносної деформації експериментальних зразків від модуля стиснення $\Delta\rho$ (мм/м) (рис.9)

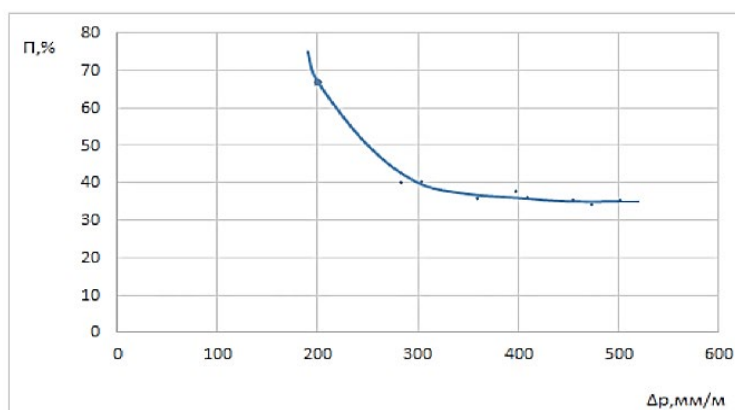


Рисунок 9 – Графік зміни розбіжності Π (%) при порівнянні величини відносної деформації експериментальних зразків від модуля стиснення $\Delta\rho$ (мм/м).

З рис.9 видно, що на початковому етапі деформування, коли модуль стиснення має значення $\Delta\rho \leq 200$ мм/м, розбіжність між значенням відносної деформації складає 65%. При зростанні модуля стиснення в межах $\Delta\rho \geq (350...600)$, різниця зменшується до 35% і у подальшому не змінюється.

Обговорення результатів. У результаті виконаних експериментальних досліджень встановлені особливості деформування закладних матеріалів з подрібненої породи при компресійному стисненні та в умовах одновісного стиснення, з можливістю бічного розширення подрібненої породи. В якості основних показників використовували величини відносної деформації λ охоронних споруд, які знаходилися у різних умовах стиснення, їх жорсткість C (Н/м) та модуль стиснення $\Delta\rho$ (мм/м).

Для експериментальних досліджень використовували подрібнену породу з коефіцієнтом неоднорідності $K_n=4.8$ (вир.1.) Значення цього коефіцієнта відбиває розкид розмірів та форми подрібненої породи, як системи фракцій закладного матеріалу.

Експериментально встановлено, що при мінімальній жорсткості ($C=1 \cdot 10^6$ Н/м) закладних матеріалів та їх одновісному стисненні, з можливістю бічного розширення подрібненої породи, величина відносної деформації ущільнюваного тіла відрізняється від величини відносної деформації при компресійному стисненні на 67% (табл.3, рис.8). Далі, по мірі зростання жорсткості, розбіжність зменшується та при $C \geq 3,0 \cdot 10^6$ Н/м складає 35% (рис.8). Якщо розглядати зміну цієї розбіжності в залежності від модуля стиснення Δp (мм/м) (вир.4), маємо графік функції у вигляді гіперболічного котангенсу (рис.9).

Враховуючи те, що закладання виробленого простору використовується як спосіб охорони підготовчих виробок, слід враховувати те, що в умовах компресійного стиснення насипний матеріал не має можливості бічного розширення. Тому, при стисненні подрібненої породи, її ущільнення змінюється пресуванням, внаслідок чого утворюється ядро, що забезпечує несучу здатність охоронної споруди та її надійну стійкість.

Для закладного матеріалу з можливістю бічного розширення подрібненої породи, в результаті стиснення відбувається переупаковка часток різного розміру в загальному обсязі. На початковому етапі процесу деформування, закладний матеріал практично не створює відсічі і розширюється в сторони. Зі збільшенням жорсткості закладного матеріалу, відносна деформація охоронної споруди збільшується а її несуча здатність наростає, що свідчить про утворення стійкого ядра всередині обсягу. Опорні конструкції, що обмежують переміщення вихідного матеріалу, дозволяють мінімізувати розміри розширення подрібненої породи у виробленому просторі вуглепородного масиву. При дотриманні певних умов, що пред'являються до спорудження опорних конструкцій, можливо забезпечити стійкі охоронні споруди над відкатним штреком по довжині виїмкової ділянки.

Таким чином, деформаційні характеристики закладних матеріалів із подрібненої породи, визначають здатність охоронних споруд підготовчих виробок відгукуватися на вплив зовнішніх факторів, які виявляються при розвантаженні вуглепородного масиву та впливають на стійкість бічних порід. При використанні закладання виробленого простору для охорони підготовчих виробок та обмеження конвергенції бічних порід на контурі, необхідно враховувати зміну жорсткості закладного матеріалу за різних умов стиснення. Ефект від застосування закладання виробленого простору, як способу охорони гірничих виробок, забезпечується при регулюванні бічного розширення подрібненої породи. У таких умовах досягаються характеристики жорсткості охоронних споруд із закладних матеріалів, які дозволяють максимально обмежити переміщення бічних порід у виробленому просторі вуглепородного масиву.

Висновок. Експериментально встановлено, що при застосуванні для підготовчих виробок охоронних споруд із подрібненої породи різного гранулометричного складу, який відображає розкид форми та розмірів первісного матеріалу, як системи фракцій закладного матеріалу, в умовах його компресійного стиснення або одновісного стиснення, з можливістю бічного розширення подрібненої породи зі зростанням жорсткості, розбіжність між значеннями відносної деформації при порівнянні зменшується по гіперболічній залежності у вигляді графіку непарної функції і на початковому етапі деформування, коли модуль стиснення становить $\Delta p \leq 200$ мм/м досягає понад 65%, а після максимального стиснення подрібненої породи, якщо її модуль знаходиться у діапазоні значень $\Delta p \geq (350 \dots 600)$ мм/м при зростанні жорсткості закладних матеріалів понад 3 рази, зменшується до 35% та у подальшому не змінюється, що

необхідно враховувати при оцінці стійкості відкатних штреків або прогнозуванні конвергенції бічних порід у виробленому просторі вуглепородного масиву.

Список літератури

1. Жуков В.Е., Выстороп В.В., Колчин А.М., Григорюк Е.В., Малоотходная технология добычи угля. – К.: Техника, 1984. -186с.
2. Колоколов О.В. Технология закладки выработанного пространства в шахтах и рудниках - Днепропетровск: Січ, 1997. -135с.
3. Сулаев В.И. Обоснование параметров технологии отработки тонких пластов с закладкой присекаемых пород в выработанное пространство: автореф.... к.т.н. 05.15.02. ГГА Украины - Днепропетровск, 1995. -16с.
4. І.В.Іорданов, Ю.І.Сімонова, А.В.Петренко, А.В.Король, Є.С.Подкопаєв, О.П.Каюн, О.І.Єфремов. Експериментальні дослідження фізико-механічних характеристик закладних масивів.// Вісті Донецького гірничого інституту. №1(46). 2020. -с. 45-57
5. Л.Л.Бачурін, І.В.Іорданов, О.П. Когтева, Є.С.Подкопаєв, О.І.Єфремов, А.В.Король, М.О.Григорєць. Експериментальні дослідження деформаційних характеристик охоронних споруд // Вісті Донецького гірничого інституту. -№2(47), 2020. -с. 7-22. doi: <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-2-7-22>
6. Гидравлическая закладка выработанного пространства на угольных шахтах/ В.В. Добровольский, В.И.Симонов, В.В. Журавлев, В.П. Бухгольц. -М.:Недра,1975, - 232с.
7. Цытович Н.А. Механика грунтов. -М: Высшая школа, 1983. -288с.
8. Цирель С.В. Оценка влияния гранулометричного состава на сжимаемость и пустотность закладочного материала / С.В. Цирель, Ю.С. Гапонов, А.Н. Шоков // Горный информационно-аналитический бюллетень. -2013 -№12 -с. 80-83.
9. Тер-Мартиросян З.Г., Мирный А.Ю., Джаро М.Н. Определение прочных характеристик несвязанных грунтов при компрессионных испытаниях // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. 2012.№3. с.1-6.
10. Сипидин В.П., Сидоров Н.Н. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия.-М. -Л.; Гос.из-во по строительству, архитектуре и строит.материалам, 1963. -94с.
11. Лабораторный практикум по курсу “Механика горных пород” / С.В. Подкопаев , Н.Н. Гавриш, Б.М.Деглин, В.И.Каменец - Донецк: ДонНТУ, 2012. -48с.
12. Engineering-Principles and practices for underground coal mining. Springer. 2016- 693p. doi10.1007/978-3-319-25005-2ISBN978-3-319-25005-2
13. Wesley L.D. Fundamentals of Soil Mechanics for Sedimentary and Residual Soils. - John Wiley & Sons, Inc., 2010. -440 p.
14. Ishibashi I., Hazarika H. Soil Mechanics. -CRC Press, 2015. -420p.
15. Robitaille V., Tremblay D. Mecanique des sols: Theorie et pratique. - Canad, 1997. -341 p.
16. Янпольский А.Р. Гиперболические функции : Избранные главы высшей математики для инженеров и студентов вузов. -М: Книга по требованию, 2013. -196с. ISBN978-5-458-25953-8
17. Björck A. Numerical methods for least squares problems. Other Titles in Applied Mathematics, Vol. 103. Miscellaneous Bks, 51. Philadelphia. SIAM, 1996.
18. Cramér H. Mathematical Methods of Statistics. (PMS-9), Vol.9. Princeton university press, 2016. – 302p.

References

1. Jykov V.E., Vistorop V.V., Kolchin A. M., Hruhoryk E.V., Maloothodnaya tehnologiya dobychy uglya. – K.: Tehnika, 1984. – 186 s.
2. Kolokolov O.V. Tehnologiya zakladky vyrabotonnogo prostranstva v shahtah I rydneykah – Dnepropetrovsk: Sich, 1997. – 135 s.
3. Sylae V.I. Obosnovanie parametrov tehnologii otrabotki tonkih plastov s zakladkoy priskekayemykh porod v vyrabotannoe prostranstvo: avtoref...k.t.n. 05.15.02. GGA Ukrainy – Dnepropetrovsk, 1995. -16 s.
4. Iordanov I.V., Simonova Y.I., Petrenko A.V., Korol A.V., Podkopayev E.S., Kayn O.P., Efremov O.I. Eksperimentalni doslidjennya fiziko-mekhanichnih harakterystyk zakladnyh masyviv. // Visti Donetskogo girnychogo institute. №1(46). 2020. –s. 45-57 doi: <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-1-4557>.
5. Bachyrin L.L., Iordanov I.V., Kogteva O.P., Podkopaev E.S., Efremov O. I., Korol A.V., Hryhorets M.O. Eksperimentalny doslidjennya deformaciinyh harakterystyk ohoronnykh sporyd // Visti Donetskogo girnychogo institute. № 2(47). 2020. – S. 7-22. doi: <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-2-7-22>.

6. Hydravlicheskaya zakladka vyrabotennogo prostranstva na ygolnyh shahtah/ V.V. Dobrovolskiy, V.I. Simonov, V.V. Jyравlev, V.P. Byhgolts. – M.:Nedra, 1975, - 232 s.
7. Cytivich N.A. Mekhanika gryntov. – M.: Vyshaya shkola, 1983. – 288 s.
8. Cirel S.V. Ocenka vliyania granylometrichnogo sostava na sjimaemost I pustotnost zakladochnogo materiala / S.V. Cirel, Y.S. Gaponov, A.N. Shokov // Gornyyi inforvacionno-analitycheskiy buleten. 2013. - №12 – S. 80-83.
9. Ter-Martirosyan Z.G., Mirniy A.Y., Djaro M.N. Opredelenye prochnyh harakterystik nesvazannyh gryntov pry kompressionnyh ispitaniyah // Internet-Vestnyk VolgGASU. 2012. №3. С. 1-6.
10. Sipidin V.P., Sidorov N.N. Issledovanye gryntov v ysloviyah trehosnogo sjatiya. – M. – L.: Gos.iz-vo po stroitelstvu, arhitekture i stroit.materialam, 1963. – 94 s.
11. Laboratornyy praktikum po kursu “Mekhanika gornyh porod” / S.V. Podkopaev, N.N. Gavrish, B.M. Deglyn, V.I. Kamenets – Donetsk: DonNTU, 2012. – 48 c.
12. Engineering-Principles and practices for underground coal mining. Springer. 2016 – 693 p. doi10.1007/978-3-319-25005-2ISBN978-3-319-25005-2.
13. Wesley L.D. Fundamentals of Soil Mechanics for Sedimentary and Residual Soils. - John Wiley & Sons, Inc., 2010. - 440 p.
14. Ishibashi I., Hazarika H. Soil Mechanics. - CRC Press, 2015. – 420 p.
15. Robitaille V., Tremblay D. Mecanique des sols: Theorie et pratique. - Canad, 1997. - 341 p.
16. Yanpolskiy A.R. Giperbolicheskie funkcyi : izbrannye glavy vyssheii matematiki dlya ingenerov I studentov vyzov. – M: Kniga po trebovaniy, 2013. -196 s. ISBN978-5-458-25953-8.
17. Björck A. Numerical methods for least squares problems. Other Titles in Applied Mathematics, Vol. 103. Miscellaneous Bks, 51. Philadelphia. SIAM, 1996.
18. Cramér H. Mathematical Methods of Statistics. (PMS-9), Vol. 9. Princeton university press, 2016. – 302 p.

Надійшла до редакції 02.09.2022

Volkov S., Kaiun O.

STUDY OF DEFORMATION CHARACTERISTICS OF PROTECTIVE STRUCTURES OF DEVELOPMENT WORKINGS FOR PREDICTING THE STABILITY OF SIDE ROCKS IN A COAL-ROCK MASSIF

Purpose. To study deformation characteristics of embedded massifs from crushed rock under different compression conditions to ensure the stability of side rocks in the coal massif.

Methodology. To achieve the goal, the laboratory studies of deformation characteristics of embedded massifs during compression of crushed rock and during its uniaxial compression, with the possibility of lateral expansion of the source material, have been performed.

Results. As a result of the performed experimental studies, the characteristic features of the deformation of embedded massifs made of crushed rock have been revealed. It has been established that the deposit array ambiguously determines the ability to respond to the influence of external factors, which are manifested when the coal array is unloaded with the workings. Such ambiguity is due to different compression conditions. The effect of laying the produced space as a method of protection of workings is ensured in conditions where the compression modulus of crushed rock, as a system of fractions of the embedded massif, is in the range of values $\Delta p \geq (350...600)$ mm/m. In this case, the characteristics of the rigidity of the embedded massifs allow limiting the convergence of the side rocks in the produced space of the excavation site.

Scientific novelty. Under conditions of compressive compression or uniaxial compression, with the possibility of lateral expansion of the crushed rock, when the rigidity of embedded massifs increases, when comparing the relative deformation of protective structures at different stages of deformation, the discrepancy between the values of this magnitude changes as a function of hyperbolic cotangent.

Practical significance. It is necessary to take into account the deformation properties of the laying massifs in conditions of lateral expansion of crushed rock when applying the laying of the produced space as a method of protecting the preparatory workings in the excavation areas of coal mines.

Keywords: embedded array, method of protection, roll-back stretch, deformation characteristics, compression modulus, rigidity.

Відомості про авторів

Волков Сергій Володимирович, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; serhii.volkov@donntu.edu.ua

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

Volkov Serhii, associate professor of the Department of Mathematics and Physics, Donetsk National Technical University; e-mail: serhii.volkov@donntu.edu.ua

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

УДК 614.841.4:621.867.2

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-45-55](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-45-55)

І.А. Євстратенко, В.М. Рясний, С.М. Чухарєв, М.О. Кучерук

СУЧАСНИЙ СТАН МЕХАНООЗБРОЄНОСТІ ГІРНИЧОРЯТУВАЛЬНОЇ (АВАРІЙНО-РЯТУВАЛЬНОЇ) СЛУЖБИ ТА ЙОГО ЗНАЧЕННЯ У ПІДВИЩЕННІ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ ГІРНИКІВ

Мета. Отримати обґрунтовані характеристики мобільних технічних засобів гірничорятувального обладнання, яке використовується у аварійних ситуаціях при підземному видобутку корисних копалин, для доставки його до місця події та евакуації постраждалих, що комплексно підвищує ефективність і безпеку праці як рятувальників, так і гірників.

Методи дослідження. Аналіз літературних джерел, технічної документації та практики використання гірничорятувального обладнання в умовах підземної розробки корисних копалин.

Результати. Аналіз фізичних (енергетичних) втрат рятувальників при розвідці, аварійно-рятувальних роботах, ліквідації наслідків аварій та проведенні дослідження дозволили визначити технічні характеристики мобільних засобів для доставки гірничорятувального обладнання до місця аварії та евакуації постраждалих в результаті аварії по горизонтальних та вертикальних гірничих виробках. Виконані роботи дозволили значно підвищити рівень протиаварійного захисту гірничорудних підприємств, безпеки праці гірників, полегшити працю особового оперативного складу і, в кінцевому результаті, ефективність і надійність всієї гірничорятувальної служби.

Наукова новизна. В статті доведено, що тільки комплексний підхід до розробки мобільного гірничорятувального обладнання може забезпечити ефективне технологічне рішення при розробці такого обладнання.

Практична значимість. Розроблені для гірничорятувальних підрозділів спеціальні транспортні засоби придатні до експлуатації саме в умовах підземних гірничих робіт. Нові технічні рішення дозволяють транспортувати обладнання для рятувальних робіт в горизонтальних та підняттях гірничих виробках, що дозволяє економити час та здоров'я гірничих рятувальників. Розроблені та пройшли випробування аварійно-рятувальні технічні засоби, призначені для механізації під час ведення аварійно-рятувальних робіт у вертикальних стволах шахт, а також під час виконання гірничорятувальниками технологічних робіт, пов'язаних з оглядом стану, наприклад, вентиляційних стволів шахт, необладнаних механізованими підйомами. Приймальна комісія підтвердила працездатність розробленого обладнання, відповідність його цільовому призначенню та рекомендувала розроблене обладнання до масового впровадження як на підприємствах, так і в підрозділах ВГРС.

Ключові слова: гірничорятувальна служба, транспортування потерпілих, механоозброєність, безпека праці гірників, ..

Вступ. Наразі перед гірничодобувною промисловістю України стоїть важливе завдання - збільшення ефективності підземного видобутку корисних копалин при одночасному підвищенні рівня безпеки гірничих робіт. З кожним роком видобуток корисних копалин переходить на більш глибокі горизонти. Це, в свою чергу, обумовлює підвищення гірничого тиску, виникнення проблем забезпечення цілісності гірничих виробок та погіршення умов праці гірників. Зважаючи на те, що основним завданням гірничорятувальної служби є поліпшення умов роботи гірників, рятування людей, застигнутих аварією, ліквідація аварій та їх наслідків, профілактична робота, у тому числі обстеження гірничих виробок з метою контролю підготовленості їх до ліквідації аварій, наявності і стану засобів саморятування людей, та протиаварійного захисту проблема технічної забезпеченості гірничорятувальної служби є дуже актуальною.

Мета роботи. Основною метою даної роботи є аналіз існуючих засобів гірничорятувального обладнання, що використовується при виникненні аварійних ситуацій при підземному видобутку корисних копалин та розробка мобільних технічних засобів, що дозволять полегшити працю гірничорятувальників при доставці гірничорятувального обладнання до місця аварії та евакуації постраждалих в результаті аварії.

Виклад основного матеріалу. Воєнізована гірничорятувальна (аварійно-рятувальна) служба ДСНС України (далі – ВГРС), що обслуговує гірничорудні підприємства, щорічно здійснює десятки оперативних виїздів, пов'язаних з різноманітними аваріями та аварійно-небезпечними ситуаціями, а також з необхідністю порятунку працівників і надання їм відповідної допомоги.

Частка оперативних виїздів ВГРС, на прикладі 2021 року [1], за видами аварій та аварійно-небезпечних ситуацій становить:

- пожежі – 39,29%
- обвалення – 16,67%
- аварії на внутрішньошахтному та внутрішньокар'єрному транспорті – 17,86%
- аварії на рудниковому (шахтний) підйомі – 7,14%
- нещасні випадки – 28,57%

Смертельні випадки, а також випадки, внаслідок яких гірники отримували тяжкі травми частіш за все пов'язані саме з цими видами небезпек.

Як правило, аварії в шахтах і створювані ними небезпечні ситуації виникають раптово і розвиваються стрімко, захоплюючи значний простір (особливо при пожежах). Це нерідко створює обстановку дефіциту часу, протягом якого необхідно прийняти правильні рішення і приступити до активних дій по їх ліквідації.

Досвід ведення рятувальних робіт, зокрема, на залізнорудних шахтах, показує, що практично при всіх видах аварій для доставки спеціального гірничорятувального обладнання та оснащення, різних матеріалів, а також під час транспортування постраждалих рятувальники використовують шахтні електровози і вагонетки (табл. 1). Для рятувальників це основний вид транспортних засобів. Однак при аваріях електроенергія часто відключається, на шахтних відкотних шляхах утворюються затори, що ускладнює, а іноді повністю виключає можливість застосування даної техніки.

Таблиця 1 - Гірничорятувальне і допоміжне обладнання, що найбільш часто застосовується, в залежності від виду аварії

Вид аварії	Обладнання, що застосовується	
	гірничорятувальне	Допоміжне
1	2	3
1. Пожежа	- ручні вогнегасники різних типів; - пожежні рукави зі стволами; - універсальне свердло УС-1; - водорозбризкувачі ВВР-1 і МВР-3; - піногенератори; - установки порошкового пожежегасіння; - пакет-перемичка; - гірничоплотницький інструмент; - носилки	- електровоз; - вагонетки
2. Обвалення гірничих порід	- гірничоплотницький інструмент; - домкрати різних типів; - гідравлічні стояки; - апарат газової різки; - носилки; - рятувальне крісло; - апарат, що оживляє (ГС-5)	- електровоз; - вагонетки; - скреперна лебідка; - бурильні молотки; - УГПС; - шпунтовий молоток; - гідростійки; - навантажувальні машини; - шахтний домкрат; - верстати НКР-100М
3. Отруєння газами	- гірничоплотницький інструмент; - пакет-перемичка; - ГС-5; - носилки	- електровоз; - вагонетки

Продовження таблиці 1		
1	2	3
4. Затоплення	- гірничоплотницький інструмент; - носилки	- електровоз; - пневматичні та інші породонавантажувальні машини; - вагонетки
5. Падіння в гірничі виробки	- рятувальне крісло; - рятувальна мотузка; - носилки; - лебідки різних типів; - пристосування ППЛ-1	- баддя; - електровоз; - вагонетки

З цих причин операції з доставки різних вантажів гірничорятувальниками здійснюються вручну з великими витратами фізичної енергії та часу. Залежно від роду аварії і виду оперативних дій (розвідка, аварійно-рятувальні роботи, ліквідація наслідків аварій) рятувальникам доводиться переносити на значні відстані лише мінімальне технічне оснащення загальною масою від 168 до 182 кг, або 28-42 кг на кожного бійця. Невипадково вони відносяться до працівників важкої фізичної праці з добовою витратою енергії в період роботи 15-25 кДж.

Праця оперативного складу ВГРС має ще ряд специфічних особливостей, що значно відрізняє її від інших категорій працівників, наприклад, від гірників. Вони полягають в наступному:

- гірничорятувальники знаходяться в стані постійного очікування (підсвідомого) сигналу «тривога», а також емоційних збуджень, викликаючи підвищення обміну енергії ще на 11-17% [2,3]. За таких обставин прибувши до місця аварії або нещасного випадку, практично ще не розпочинаючи виконання рятувальних операцій, часто вони вже самі потребують допомоги. В цьому стані в них виявлено задихання, підвищену частоту пульсу, різке зниження працездатності;

- проведення рятувальних робіт часто пов'язане з необхідністю знаходження особового складу ВГРС у непридатній для дихання атмосфері та бути «включеними» в респіратор. Але праця в респіраторі масою 10-12 кг (як додаткове навантаження) супроводжується додатковою витратою енергії на 17-25% і більше, по відношенню до звичайних умов праці гірників [2,4].

Слід зазначити, що при диханні через кисневий ізолюючий регенеративний респіратор, оснащений сорбентом із вапна, коли газова суміш в дихальній системі апарата насичена вологою на 100% і нагріта до температури 37-42°C і вище, легені повністю виключаються з системи терморегуляції. Чим вище температура навколишнього середовища і напруга під час виконання роботи, тим негативніше відбивається на загальному процесі тепловіддачі виключення легень. Крім того в легенях відбувається конденсація вологи газової суміші з видаленням прихованої теплоти, і тоді вони перетворюються на джерело додаткового надходження тепла в організм.

Розглядаючи тепловий баланс людини, «включеної» в ізолюючий респіратор, при виконанні певної роботи можливо побачити, що продукowana людиною метаболічна теплота складається з двох складових [2,4]:

- теплопродукції за рахунок виконання зовнішньої корисної роботи – $N_{роб}$;
- теплопродукції за рахунок ізолюючого респілятора. В свою чергу, теплопродукція за рахунок ізолюючого респілятора складається з: теплопродукції на переміщення маси респілятора N_m ; теплопродукції за рахунок подолання опору процесу дихання $N_{дих}$ і теплового потоку N_{mk} . Останній визначається мікрокліматом респілятора і підведеного до органів дихання людини повітря за рахунок того, що тепловміст його в респіраторі, як правило, вище за тепловміст повітря, яке видихається.

При цьому, одна частина продукovanого людиною тепла відводиться в навколишнє середовище за рахунок випарювання поту – $N_{\text{відв.}}$, друга, $N_{\text{нак.}}$, яка в даних умовах не може бути відведена, накопичується в організмі і призводить до підвищення температури тіла.

Враховуючи дані проведеного аналізу, рівняння теплового балансу має вигляд:

$$N_{\text{роб.}} + (N_{\text{м}} + N_{\text{дих.}} + N_{\text{мк}}) = N_{\text{відв.}} + N_{\text{нак.}}$$

Сума членів лівої частини рівняння представляє собою загальну теплопродукцію організму.

Виконаний аналіз теплопродукції за рахунок респіраторів показує, що ізолюючий регенеративний респіратор суттєво збільшує теплоприплив до організму працюючого в ньому гірничорятувальника. В умовах обмеженого тепловідводу це призводить до накопичення тепла в організмі; прискорює настання допустимого теплового стану, а потім і граничного теплового [2].

Дослідниками НДІБПГ здійснена практична оцінка енергетичних навантажень на гірничорятувальників під час переміщення по вертикальній монорейці за допомогою аварійних кігтів, які зараз є основним засобом переміщення [5,6].

Дослідження проводились в реальних умовах підняттявих виробок на шахтах Кривбасу під час проведення гірничорятувальниками тактичних навчань. При обробці матеріалів досліджень до уваги бралися середньо-статистичні дані з максимально-граничними показниками, що дає змогу проаналізувати і найбільш точно оцінити дії та стан і самопочуття гірничорятувальників, в залежності від багатьох факторів реальних обставин та можливих ситуацій.

Багаторазові підйоми-спуски на кігтях монорейкою засвідчили, що найбільш інтенсивно підйом проводиться протягом перших 20-25 метрів підняттявої виробки. Далі підйом відбувається з очевидним зниженням швидкості (настає період втоми гірничорятувальників). За даними спостережень, а також в результаті анкетування респіраторників було визначено, що в цей період (на висоті 20-25 м) фізичне навантаження сягає граничних величин. Подальший підйом до висоти 80-100 м вже супроводжується вольовими зусиллями і критичними тепло та енерговитратами організму, що відбивається на часі підйому до аварійного комплексу.

В свою чергу, збільшення часу перебування гірничорятувальників у відкритій підняттявій виробці, помножене на тяжкий психоемоційний стан (втрата відчуття часу, зниження контрольної функції, поява страху) призводять до високої травмонебезпечності.

Беручи до уваги, що спуск на аварійних кігтях монорейкою не легше за підйом, а в деяких випадках він може проходити в ще більш складних ситуаціях, наприклад під час евакуації (транспортування) по виробці травмованого гірника або при необхідності «включення» в респіратор, стає очевидним, що процес підйому-спуску гірничорятувальників монорейкою необхідно механізувати.

На основі вищесказаного робимо висновок про вкрай велику необхідність полегшення праці, в першу чергу, оперативного складу ВГРС. Вбачаємо, що одним з головних підходів (напрямків) до вирішення цього питання є суттєве підвищення саме рівня механізації їх праці.

З іншої сторони, важливою організаційною частиною діяльності ВГРС є надання допомоги травмованій людині.

Аналіз показує, що у постраждалих на залізнорудних шахтах в основному відзначаються механічні травми. Майже в половині випадків – переломи кісток. При цьому в ході надання медичної допомоги постраждалі нерідко знаходяться в стані травматичного шоку.

Більшість гірників отримує травми на ділянках, найбільш віддалених від ствола (в очисних блоках і прилеглих до них виробках), що вимагає чималих витрат часу на прибуття гірничорятувальників до місця нещасного випадку або аварії і евакуацію постраждалих на поверхню.

За даними досліджень терміни надання першої медичної допомоги коливаються від 5-10 хв до декількох годин. При цьому (табл.) безпосередньо в перші хвилини аварії або нещасного випадку цю допомогу найчастіше надають товариші по роботі.

Встановлено, що транспортування потерпілих на ручних ношах, навіть в горизонтальній виробці, супроводжується ритмічним погойдуванням, яке посилюється при русі носіїв між

рудними шляхами по шпалах. При відпочинку носіїв або при їх зміні, багаторазове опускання і підйом носилок можуть викликати небажані явища.

Таблиця 2 - Надання першої допомоги при травмах в шахтах

Терміни надання першої допомоги, год.	Перша допомога надана, %	
	товаришами по роботі	гірничорятувальниками
Протягом 0,1	2,7	-
0,1-0,25	43,8	-
0,25-1	50,6	20,1
1-3	2,4	40
3-6	0,4	20,5
Більш ніж 6	0,1	10,4

При перевезенні постраждалих на спеціальних візках, на вантажній вагонетці або на інших транспортних засобах, що пересуваються шляхом ручного штовхання, через відсутність у них жорсткого каркаса і амортизації, негативний вплив на людину надають удари на рейкових стиках, на стрілочних переводах, а також безперервна тряска. Ці дії, навіть при порівняно добре фіксованих переломах, можуть викликати зсув кінців зламаної кістки, пошкодження м'яких тканин, і, тим самим, завдавати потерпілому гострий біль.

Якщо ті ж самі транспортні засоби переміщати за допомогою локомотива, то зазначені неприємні впливи можуть бути ще відчутнішими. Смикання, прискорення при рушанні з місця та гальмуванні, а також рух по кривих ділянках шляху, можуть створювати перешкоди для кровообігу потерпілого.

Погіршують стан потерпілого шум локомотива, стукіт коліс, скрипи, а при дизельній тязі ще й вихлопні гази.

Вплив описаних шкідливих чинників з подовженням транспортного шляху зростає в геометричній пропорції і веде до утворення транспортних травм, які тим сильніше, чим важче стан потерпілого і чим гірші умови перевезення.

Численні фахівці обговорювали питання перевезення хворих і постраждалих, в тому числі при аваріях в шахтних умовах, а також недоліки існуючих транспортних засобів, визначивши ті вимоги, які безумовно повинні виконуватися при проектуванні і виробництві всіх транспортних засобів для перевезення хворих і постраждалих. Вони однозначно встановили, що випадкові транспортні засоби або кустарно перетворені технічні рішення, створені для звичайного життя, неприйнятні для перевезення постраждалих в шахтах, оскільки вони не відповідають високим технічним і санітарним вимогам.

Таким чином, можна зробити висновок, що чільним місцем у системі різноспрямованих заходів щодо підвищення оперативності та ефективності дій ВГРС є виключення або доведення до мінімуму ручної праці, в першу чергу на операціях, пов'язаних з доставкою до місця аварії обладнання, оснащення, а також транспортуванням потерпілих.

Експертне опитування гірничорятувальників (анкетування) [7] також показало і підтвердило, що назріла гостра необхідність розробки принципово нових, спеціально призначених для аварійних ситуацій засобів, і в першу чергу:

- транспортних засобів для переміщення гірничими виробками особового складу ВГРС, різних видів вантажу (в тому числі відповідного гірничорятувального, протипожежного та іншого обладнання) з можливістю їх використання під час евакуації тяжкотравмованих гірників;

- засобів механізації під час ведення аварійно-рятувальних робіт у підняттях гірничих виробках різного призначення (при переміщенні гірничорятувальників підняттями, висота яких досягає 100м, та ще й «включеними» в респіратор їх стан оцінюється на межі фізичних можливостей людини);

- засобів механізації під час ведення дуже складних і вкрай небезпечних аварійно-рятувальних робіт у вертикальних стволах шахт. Під час розроблення цих засобів за основу повинні бути взяті наступні критерії: універсалізація, спеціалізація, модульний принцип проектування.

Вирішенням питань механізації гірничорятувальних робіт по цим напрямкам протягом десятиліть займалися вчені багатьох країн світу, в тому числі науковці України. Але з різних причин, в основному пов'язаних зі специфікою гірничорудної галузі України та технології, що застосовується, вітчизняна воєнізована гірничорятувальна служба ще не має на своєму озброєнні засобів, які дозволили б одночасно підвищити безпеку і оперативність гірничорятувальних робіт з наданням ефективної допомоги потерпілим.

В результаті багаторічної та плідної праці науковців НДІБПГ у співдружності із спорідненими спеціалізованими науково-дослідними організаціями та проектними інститутами (в першу чергу з ДП «ДП Кривбаспроект»), а також за участі спеціалістів гірничорудних підприємств та безпосередньо ВГРС, такі засоби були опрацьовані.

Конкретно, за напрямком оснащення гірничорятувальних підрозділів спеціальними транспортними засобами, придатних до експлуатації саме в шахтних умовах, розроблено цілий комплекс технічних рішень, до складу якого входять:

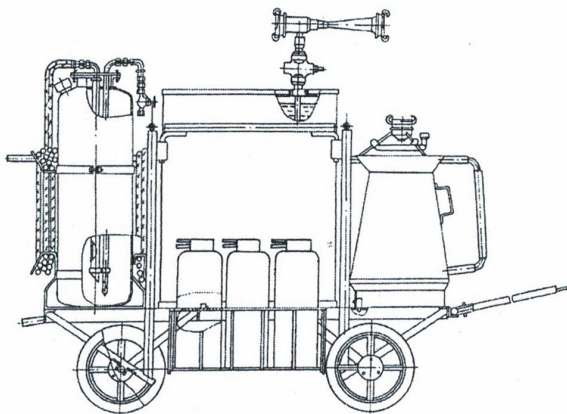


Рисунок 1-Пересувна (на рейковому ході) універсальна водо-піно-порошкова пожежогасильна установка УПП-600/750/900

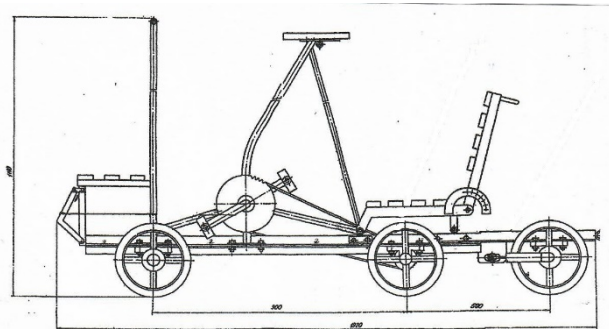


Рисунок 2 -Дрезина гірничорятувальна універсальна ДГУ

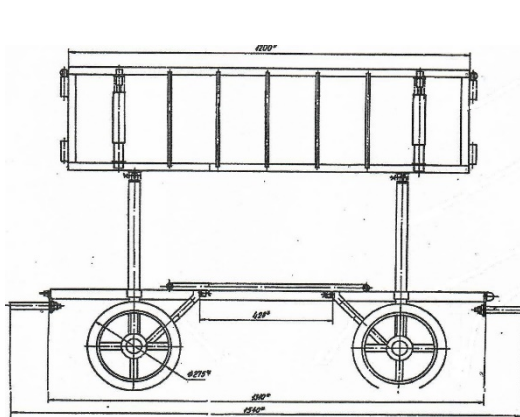


Рисунок 3 -Візок гірничорятувальний універсальний ВГУ-500

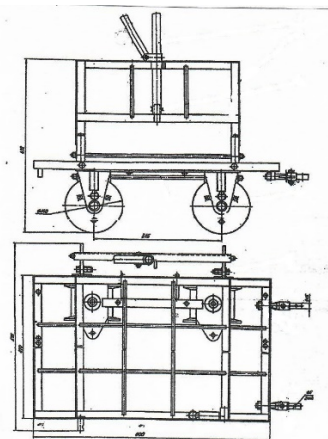
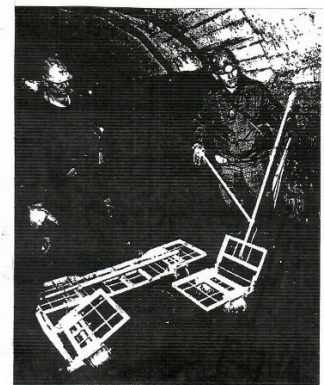


Рисунок 4 - Візок гірничорятувальний малогабаритний ВГМ-80



Особливості конструкції та тактико-технічні характеристики цих засобів детально приведені у звіті по НДДКР [8].

За напрямком засобів механізації гірничорятувальних робіт у підняткових гірничих виробках розроблені.

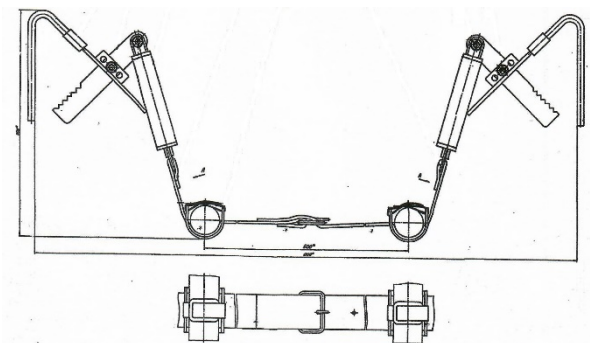


Рисунок 5 - Пристрій для транспортування (евакуації) постраждалих (в тому числі тяжко травмованих) в шахтних вагонетках ПТП-ШВ

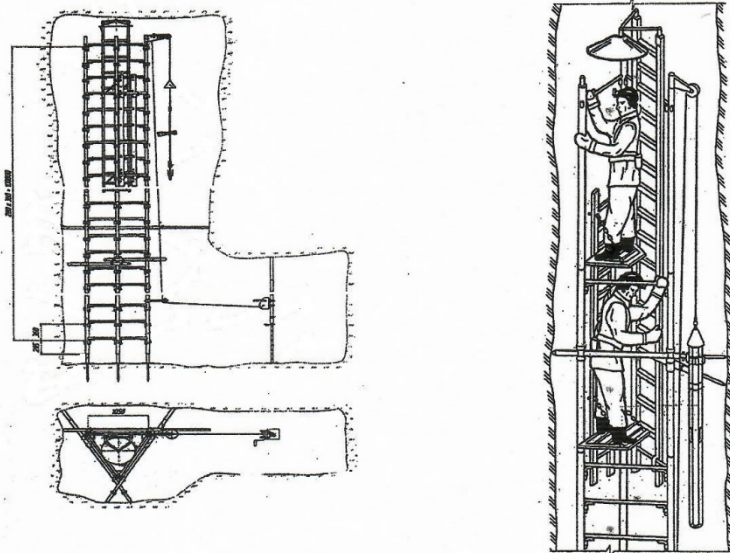


Рисунок 6 - Армувальний комплекс для швидкого зведення тимчасового ходового каналу у підняттевих гірничих виробках «Хід-100 РВМ». Співвиконавцем та підприємством-виготовлювачем дослідного зразку цього засобу є НТТ «Технотрон» (м.Жовті Води).

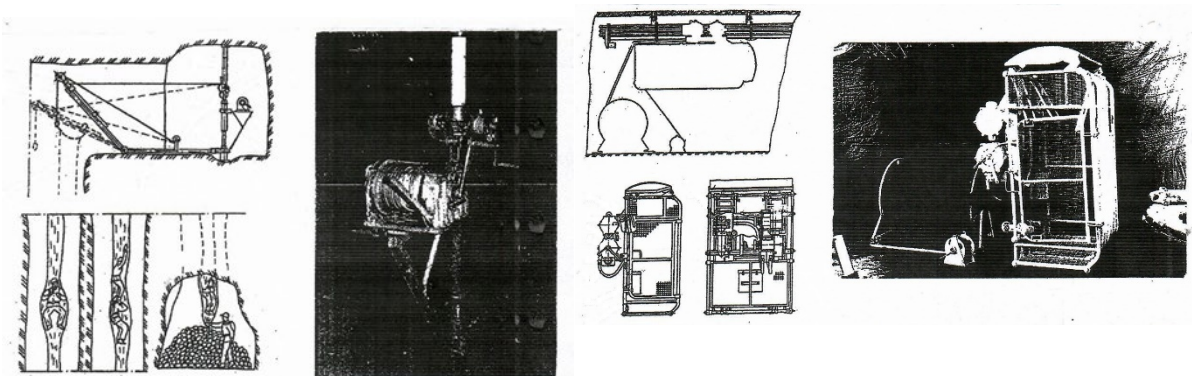


Рисунок 7- Універсальна гірничорятувальна лебідка «ЛГРУ-100 РВМ»

Рисунок 8 - Малогабаритний монорейковий аварійно- рятувальний підйомник «ПГР-350»

Співвиконавцем та підприємством-виготовлювачем дослідних зразків цих засобів є НТТ «Техномаш» (м. Жовті Води).

Особливості конструкції розроблених технічних рішень, їх тактико-технічні характеристики приведені в наукових статтях [7,8,9,10,11,12].

За напрямком засобів механізації під час ведення аварійно-рятувальних робіт у вертикальних стволах шахт, а також під час виконання гірничорятувальниками технологічних робіт, пов'язаних з оглядом стану, наприклад, вентиляційних стволів шахт, необладнаних механізованими підйомами, розроблені:

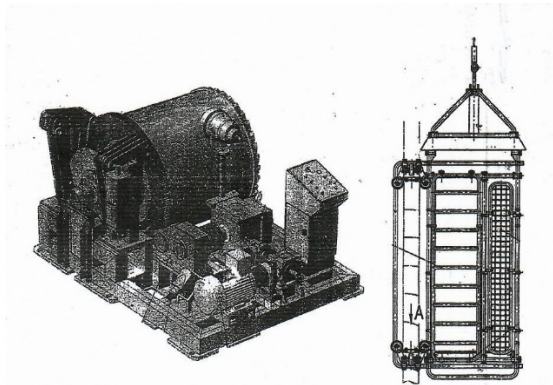


Рисунок 9 - Мобільна аварійно-рятувальна підйомна установка МАСПУ-2,5/1500

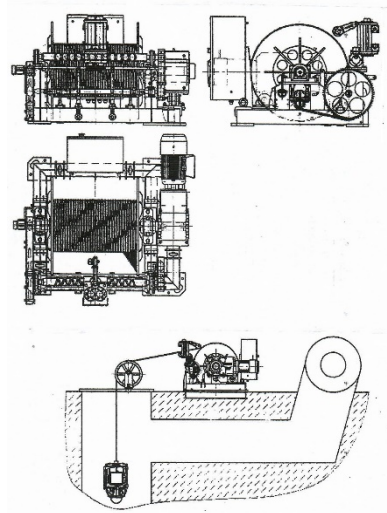


Рисунок 10 - Спеціальний комплекс обладнання для телевізійної інспекції шахтних вентиляційних стволів МКТС-0,5/1500

Головним співвиконавцем та виготовлювачем дослідних зразків цих засобів є ВП «Автоматика та машинобудування» ДП «НАЕК Енергоатом» (м. Жовті води).

Особливості конструкції цих вкрай складних технічних рішень, тактика застосування та технічні характеристики детально приведені в наукових працях [7,10,11,12].

Розроблені вище описані засоби механізації гірничорятувальних робіт пройшли всі етапи у відповідності з вимогами діючого в Україні стандарту ДСТУ 3974-2000 «Система розроблення та поставлення продукції на виробництво», в тому числі на завершальному етапі в умовах діючих шахт проведені державні приймальні випробування.

Висновок. Основні рекомендації приймальних комісій, до складу яких входили фахівці Криворізького гірничопромислового управління, науково-дослідних та проектно-конструкторських інститутів, а також представники гірничорудних підприємств та ДВГРС, були такими:

- розроблене обладнання є працездатним і повністю відповідає своєму цільовому призначенню;
- обладнання рекомендовано до масового впровадження як на підприємствах, так і в підрозділах ВГРС;
- виконані в повному обсязі роботи значно підвищують рівень протиаварійного захисту гірничорудних підприємств, безпеки праці гірників, полегшують працю особового оперативного складу і, в кінцевому результаті, ефективність і надійність всієї гірничорятувальної служби.

Список літератури

1. О. Чередниченко, І. Євстратенко, В. Рясний. На сторожі безпеки . Аналіз стану аварійності на підприємствах гірничорудної галузі України. – НВЖ «Охорона праці» №7, 2022 р., с.11-15 (у додатку до журналу).
2. Диденко Н.С., Карнекин В.В. Профилактика теплового перенапряжения горноспасателей. // Безопасности труда в промышленности, 1983, №11, с.33.
3. Справочник горноспасателя/ Ю.А. Гладков, А.И. Козлюк, Н.И. Привалов, А.Е. Ильин – Донецк: Донбас, 1988, - 247с.
4. Диденко Н.С. Регенеративные респираторы горноспасательных работ. – М:Недра, 1984, - 167с.
5. Доработка и промышленная проверка устройства аварийного передвижения в востоящих выработках по монорельсу. – Отчет НИИБТГ по НИОКР №62-82: Кривой Рог, 1983.
6. Комащенко П.Г. Оцінка та шляхи зниження енергетичних навантажень на гірничорятувальників під час виконання рятувальних робіт в підняттях виробках. – В збірнику наукових праць НДІБПГ. – Кривий Ріг, 1999 р., випуск 1, с.102-110.
7. Технічний прогрес гірничорятувальної служби як фактор підвищення безпеки праці гірників/ В.М. Рясний, В.П. Щокін, І.А. Євстратенко. – Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2019» – Національний гірничий університет. – Дніпро, 2019, с.262-267.
8. Розробити, виготовити, провести випробування та впровадити комплекс технічних засобів для доставки спеціального гірничорятувального обладнання та транспортування постраждалих при нещасних випадках та аваріях в шахтах. – Звіт (пояснювальна записка) НДІБПГ по НДДКР: Кривий Ріг, 2019 р.
9. Поліпшення умов, підвищення безпеки та продуктивності праці гірників під час проведення підняттях гірничих виробок// В.М. Рясний, П.Г. Комащенко, О.В. Моргун, В.М. Чумак, І.А. Євстратенко. – Вісник Криворізького технічного університету: Збірник наукових праць, 2007, випуск 17, с.192-195 (матеріали міжнародної конференції «Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості – 2007).
10. Підвищуємо безпеку гірничих робіт/ О.І. Чередниченко, В.М. Рясний, О. Лисак, Ю. Румянцев, І. Євстратенко. – НВЖ «Охорона праці», №12, 2020 р., с.28-35.
11. Rysanoy V.M., Shchokin V.P., Chukharev S.M., Safety of work of mining workers and anti- saving protection of mining enterprise: problems and solutions. – Modernization and engineering development of resource – saving technologies in mineral mining and processing. Multi-authored monograph.- Petrosani, Romania: UNIVERSITAS Publishing. 2019. – 476 p.
12. М.І. Швидкий, В.М. Рясний/ Інноваційно-інвестиційні розробки спеціальних комплексів обладнання для підвищення рівня безпеки праці гірників та протиаварійного захисту гірничорудних підприємств в умовах ринкової економіки. – НТЖ «Відомості академії гірничих наук України», Кривий Ріг, №8, 2017, с.108-112.

References

1. O. Cherednychenko, I. Yevstratenko, V. Rysanyy. Na storozhi bezpeky . Analiz stanu avariynosti na pidpryyemstvakh hirmychorudnoyi haluzi Ukrainy. – NVZH «Okhrona pratsi» №7, 2022 r., s.11-15 (u dodatku do zhurnalu).
2. Dydenko N.S., Karnekyn V.V. Profylaktyka teplovoho perenapryazhenyya hornospasateley. // Bezopasnosty truda v promyshlennosti, 1983, №11, s.33.
3. Spravochnyk hornospasatelya/ YU.A. Hladkov, A.Y. Kozlyuk, N.Y. Pryvalov, A.E. Yl'yn – Donetsk: Donbas, 1988, - 247s.
4. Dydenko N.S. Reheneratyvnye respyratory hornospasatel'nykh robot. – M:Nedra, 1984, - 167s.
5. Dorabotka y promyshlennaya proverka ustroystva avariynoho peredvyzhenyya v vostayushchykh vyrabotkakh po monorel'su. – Otchet NYIBTG po NYOKR №62-82: Kryvoy Roh, 1983.
6. Komashchenko P.H. Otsinka ta shlyakhy znyzhennya enerhetychnykh navantazhen' na hirmychoryatuval'nykiv pid chas vykonannya ryatuval'nykh robіt v pidnyattyevykh vyrobkakh. – V zbirnyku naukovykh prats' NDIBPH. – Kryvyi Rih, 1999 r., vypusk 1, s.102-110.
7. Tekhnichnyy prohres hirmychoryatuval'noyi sluzhby yak faktor pidvyshchennya bezpeky pratsi hirmychiv/ V.M. Rysanyy, V.P. Shchokin, I.A. Yevstratenko. – Materialy mizhnarodnoyi konferentsiyi «Forum hirmychiv – 2019» – Natsional'nyy hirmichnyy universytet. – Dnipro, 2019, s.262-267.
8. Rozrobyty, vyhotovyty, provesty vyprobuvannya ta vprovadyty kompleks tekhnichnykh zasobiv dlya dostavky spetsial'noho hirmychoryatuval'noho obladnannya ta transportuvannya postrazhdal'nykh pry

neshchasnykh vypadkakh ta avariayah v shakhtakh. – Zvit (poyasnyval'na zapyska) NDIBPH po NDDKR: Kryvyy Rih, 2019 r.

9. Polipshennya umov, pidvyshchennya bezpeky ta produktyvnosti pratsi hirnykiv pid chas provedennya pidnyattyevykh hirnychykh vyrobok// V.M. Rysanyy, P.H. Komashchenko, O.V. Morhun, V.M. Chumak, I.A. Yevstratenko. – Visnyk Kryvoriz'koho tekhnichnoho universytetu: Zbirnyk naukovykh prats', 2007, vypusk 17, s.192-195 (materialy mizhnarodnoyi konferentsiyi «Stalyy rozvytok hirnycho-metalurhiynoyi promyslovosti – 2007).

10. Pidvyshchuyemo bezpeku hirnychykh robit/ O.I. Cherednychenko, V.M. Rysanyy, O. Lysak, YU. Rumyantsev, I. Yevstratenko. – NVZH «Okhrona pratsi», №12, 2020 r., s.28-35.

11. Rysanyy V.M., Shchokin V.P., Chukharev S.M., Safety of work of mining workers and anti- saving protection of mining enterprise: problems and solutions. – Modernization and engineering development of resource – saving technologies in mineral mining and processing. Multi-authored monograph.- Petrosani, Romania: UNIVERSITAS Publishing. 2019. – 476 r.

12. M.I. Shvydkyy, V.M. Rysanyy/ Innovatsiyno-investytsiyni rozrobky spetsial'nykh kompleksiv obladnannya dlya pidvyshchennya rivnya bezpeky pratsi hirnykiv ta protyavariynoho zakhystu hirnychorudnykh pidpryyemstv v umovakh rynkovoyi ekonomiky. – NTZH «Vidomosti akademiyi hirnychykh nauk Ukrayiny», Kryvyy Rih, №8, 2017, s.108-112.

Надійшла до редакції 15.09.2022

I. Yevstratenko, V. Riasnyi, S. Chukharev, M. Kucheruk

THE CURRENT STATUS OF THE MECHANICAL EQUIPMENT OF THE MINING RESCUE (EMERGENCY AND RESCUE) SERVICE AND ITS SIGNIFICANCE IN IMPROVING THE LABOR SAFETY OF MINERS

Purpose. To obtain reasonable characteristics of mobile means of mine-rescue equipment used in emergencies in underground mining to deliver it to the scene and evacuate injured personnel, which comprehensively increases efficiency and safety of work of both rescuers and miners.

Methodology. Analysis of literary sources, technical documentation and the practice of using mining rescue equipment in the conditions of underground mining.

Results. The analysis of the physical (energy) losses of rescuers during reconnaissance, emergency rescue operations, liquidation of the consequences of accidents, and the conducted research have allowed us to determine the technical characteristics of mobile means for delivering mine rescue equipment to the accident site and evacuating the victims of the accident through horizontal and vertical mine workings. The performed works have made it possible significantly increase the level of emergency protection of mining enterprises and occupational safety of miners, facilitate the work of personnel and, ultimately, the improve efficiency and reliability of the entire mining rescue service.

Scientific novelty. The article proves that only a comprehensive approach to the development of mobile mining rescue equipment can provide an effective technological solution in the development of such equipment.

Practical significance. Special vehicles developed for mining rescue units are suitable for operation in underground mining conditions. New technical solutions make it possible to transport rescue equipment in horizontal and vertical mines, which saves time and the health of mine rescuers. Developed and tested emergency and rescue technical means intended for mechanization during emergency and rescue operations in vertical shafts of mines, as well as during the performance by mine rescuers of technological works related to the inspection of the condition, for example, of ventilation shafts of mines that are not equipped with mechanized lifts. The reception commission confirmed the functionality of the developed equipment, its compliance with its intended purpose, and recommended the developed equipment for mass implementation both at enterprises and in units of the paramilitary mining and rescue service.

Keywords: mining rescue service, transportation of victims, mechanized armament, occupational safety of miners.

Відомості про авторів

Євстратенко Ігор Анатолійович, кандидат технічних наук. Державний воєнізований гірничорятувальний (аварійно-рятувальний) загін ДСНС України, м.Кривий Ріг Igor.yevstratenko@gmail.com

Рясний Віталій Мефодійович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник. Науково-дослідний інститут безпеки праці і екології в гірничорудній і металургійній промисловості КНУ, м. Кривий Ріг, rjs-bpg@ukr.net

Чухарев Сергій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри розробки родовищ та видобування корисних копалин Національний університет водного господарства та природокористування (НУВГП); s.m.chukharev@nuwm.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4623-1598>

Кучерук Мирослава Олегівна, старший викладач кафедри розробки родовищ та видобування корисних копалин Національний університет водного господарства та природокористування (НУВГП); m.o.kucheruk@nuwm.edu.ua

Yevstratenko Ihor, Candidate of technical sciences (PhD), State Militarized Mine-Rescue (Rescue) Squad, State Emergency Service of Ukraine, Kryvyi Rih. Igor.yevstratenko@gmail.com

Riasnyi Vitaliy, Candidate of technical sciences (PhD), Senior research scientists of Scientific and Research Institute of Labour Safety and Ecology in Mining and Metallurgical Industry, KNU, Kryvyi Rih. rjs-bpg@ukr.net

Chukharev Serhii, Candidate of technical sciences (PhD), Associate Professor, National University of Water and Environmental Engineering, Rivne. s.m.chukharev@nuwm.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4623-1598>

Kucheruk Myroslava, Senior Lecturer of the Department Development of Deposits and Mining. Rivne National University of Water and Environmental Engineering, (NUWEE), Rivne; m.o.kucheruk@nuwm.edu.ua

УДК 622'17:502.174.1:631.879.3](477.6)

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-56-62](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-56-62)

Костенко В.К., Богомаз О.П., Глушко І.О.

ПОПЕРЕДНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТВЕРДИХ ШАХТНИХ ВІДХОДІВ В ЯКОСТІ ДОБРИВ

Мета: дослідження можливості застосування перегорілої відвальної маси з териконів та донних мулистих відкладень водоєм в якості основних інгредієнтів органо-мінерального добрива, за рахунок визначення показників родючості обробленого відходами ґрунту.

Методика: На основі лабораторних досліджень потенційної родючості ґрунтового середовища та досліджень динаміки схожості рослин на експериментальних ґрунтах були визначені фізичні та хімічні властивості інгредієнтів органо-мінерального добрива.

Результати: У результаті проведених лабораторних досліджень встановлено, що додавання до збагаченого продуктами переробки каліфорнійських дощових черв'яків субстрату перегорілої відвальної маси з териконів та донних мулистих відкладень водоєм не знижує показники родючості субстрату. Додавання подібних домішок до ґрунтів з низькими та середніми показниками потенційної родючості дозволить підвищити їх врожайність.

Наукова новизна: Запропоновано новий склад екологічно безпечного органо-мінерального добрива на основі перегорілих твердих шахтних відходів, донних мулистих відкладень водоєм з додаванням чорнозему, що оброблений червоними каліфорнійськими дощовими черв'яками.

Практичне значення: Використання перегорілої відвальної маси з териконів та донних мулистих відкладень водоєм для виготовлення дешевих композитних органо-мінеральних добрив, дозволить зменшити антропогенне навантаження на довкілля від шахтних відвалів, підвищити вміст гумусу та покращити структуру сільськогосподарських ґрунтів.

Ключові слова: шахтна порода, терикон, добрива, мул, відходи гірництва, каліфорнійські черв'яки.

Вступ. Видобуток та збагачення вугілля супроводжується утворенням значної кількості твердих відходів. В залежності від гірничо-геологічних умов залягання вугільних пластів, на кожні 1000 т добутої корисної копалини припадає 120-390 т пустої породи, а при збагаченні такого ж обсягу вугілля, утворюється понад 100 м³ відходів. Так звана материнська порода залишається у твердому пальному теплових котельних установок та перетворюється у шлаки, які складають у відвалах. Активна робота вугільної промисловості в минулому призвела до накопичення великої кількості твердих відходів, які задепоновані у відвали різної форми та розмірів, кількість яких становить понад тисячу одиниць. Мова йде про сотні мільйонів тонн відвальної маси, що утворилася в Донбасі протягом півтора століття інтенсивного вуглевидобутку [1]. Під шахтними та шлаковими відвалами зайнято тисячі гектарів родючих земель.

Породні відвали знаходяться під постійним впливом кліматичних чинників: вологи, вітру, перепадів температури повітря, сонячної радіації та інших. У складі свіжовидобутої породи міститься значна кількість таких хімічних елементів як сірка, залізо, вуглець та багато інших, які починають інтенсивно окислюватись. Сполуки таких елементів як сірка та залізо служать їжею для бактерій. Хімічні та біологічні процеси у відвальній масі протікають з виділенням підвищеної температури й часто супроводжуються горінням, а іноді вибухами. При окисненні породи утворюються величезні об'єми сірководню, оксидів вуглецю та ряд інших токсичних та парникових газів, а частки породи подрібнюються. Хмари пилу часто розносяться вітром далеко за межі санітарно-захисних зон. Потоки рідких опадів змивають та виносять до поверхневих вод, отруюючи їх, розчинні речовини та дрібні продукти вивітрювання. Це призвело до появи значних екологічних проблем у вугледобувних регіонах.

В результаті біогеохімічних процесів змінюється хімічний склад, а також фізико-механічні властивості породи, що задепонована у відвалах. Слід зазначити, що

внаслідок збільшення пористості та шорсткості поверхні часток, зменшується густина речовини. Змінюється здатність до розмокання та гранулометричний склад дискретного середовища, насипна маса, коефіцієнти фільтрації та ряд інших показників. З часом відсипана у відвал порода стає більш стійкою до впливу агресивних чинників зовнішнього середовища і набуває властивостей низькоякісної кераміки. В ній залишається значна кількість важкорозчинних речовин в тому числі мікроелементів. Використання відвальної шахтної маси на сьогодні є досить незначним, хоча існуючі відвали можна розглядати як цінний сировинний ресурс, свого роду - техногенні родовища.

Іншою проблемою вугледобувних регіонів є забруднення гідрографічної мережі промисловими (значною мірою гірництвом і металургією) та побутовими відходами. Внаслідок чого, водні ресурси стають високомінералізованими, це створює умови для інтенсивного розвитку гідробіонтів, особливо синьо-зелених водоростей, відмирання яких спричиняє накопичення у великому об'ємі донних мулистих мас [2,3]. Ці органічні залишки зі значним вмістом гумусу могли б стати цінною сировиною для рослинництва, однак, сильно забруднені токсичними речовинами та бактеріями, до того ж в Україні наразі відсутні технології утилізації донних відкладень такого типу.

За останні 100 років інтенсивного землеробства стан ґрунтів в Україні відчутно погіршився. Процес зменшення гумусу під час сільськогосподарського використання відбувається перш за все через ерозію ґрунтів та порушення співвідношення органічних речовин та мінералізації. В структурній будові ґрунтів домінують глинисті та мулисті складові, що погіршує умови підземного живлення рослин.

Ситуація з підтримкою родючості сільськогосподарських територій різко погіршилась у зв'язку з порушенням відносин з постачальниками мінеральних добрив – Білоруссю, та енергоносіїв – Росією. В результаті, в кілька разів зросли ціни на мінеральні та штучні добрива. Це створює загрозу конкурентоспроможності України як виробника доступних харчових продуктів.

Таким чином, ідея створення на основі перероблення відходів гірництва дешевих вітчизняних орґано-мінеральних добрив відкриває можливість розв'язання важливої державної задачі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відходи гірництва являють собою велике джерело матеріалів, які можуть бути ефективно застосовані в різних видах діяльності. Так сфери застосування гірських порід досить різноманітні.

Широкого розповсюдження набуло використання відходів гірництва у виготовленні будівельної продукції. Для виробництва будівельних матеріалів придатні близько 30% очисних хвостів, а також практично всі металургійні та паливні шлаки. Відсіві використовуються у виготовленні бетонних сумішей і готової продукції, а саме: тротуарна плитка, бордюрний камінь, пустотілі блоки [4-6].

Наразі проводиться багато досліджень щодо використання матеріалів породних відвалів в якості основи при будівництві автомобільних доріг, що в свою чергу дозволить знизити екологічне навантаження на навколишнє середовище, а також зменшити вартість і термін будівництва автомагістралей [7].

Хімічний склад мінеральної складової гірських порід свідчить про наявність в них сполук магнію, кремнію, кальцію та інших речовин, тобто такі відходи за своїм складом близькі до мінеральних добрив. Тому тверді відходи гірництва часто розглядають як цінний ресурс для виготовлення різного типу добрив. Наприклад, мінеральні фосфати гірських порід, такі як апатит, виступають у ролі основи для таких добрив, як суперфосфат та моноаммонійфосфат [8]. Щодо використання у сільському господарстві перегорілої відвальної маси наукових досліджень не проводилось.

Узагальнення інформації щодо сучасних досягнень у напрямку поводження з відходами гірництва, враховуючи важливість забезпечення добривами рослинництва, дозволили сформулювати робочу гіпотезу щодо можливості отримання дешевих вітчизняних органо-мінеральних добрив для рослинництва у вигляді композиції твердих відходів гірництва та донних відкладень водойм. Дослідження в такому напрямі уявляються актуальною науково-технічною задачею. Основою для її вирішення повинні стати результати дослідження властивостей похідної сировини та обґрунтування параметрів технології виготовлення ефективних добрив у вигляді композиції шахтної породи та донних відкладень. Екологічний ефект від використання такої технології очікується у зниженні антропогенного навантаження на довкілля від шахтних відвалів, підвищення вмісту гумусу та покращення структури сільськогосподарських ґрунтів.

Мета. Дослідження можливості застосування перегорілої відвальної маси з териконів та донних мулистих відкладень водойм в якості основних інгредієнтів органо-мінерального добрива, за рахунок визначення показників родючості обробленого відходами ґрунту.

Методи дослідження. Лабораторні дослідження потенційної родючості ґрунтового середовища та дослідження динаміки схожості рослин на експериментальних ґрунтах.

Виклад основного матеріалу. Для підтвердження висловленої гіпотези було проведено попередні дослідження показників родючості обробленого відходами ґрунту. Результати, що наведено нижче, не є достатніми та надійними. Їх завданням було підтвердити можливість створення композитних добрив з вказаних інгредієнтів.

Для проведення досліджень потенційної родючості ґрунту та можливості його застосування в сільському господарстві було приготовано наступні похідні інгредієнти. З породного відвалу шахти 5/6 міста Мирнограда було відібрано зразки перегорілої породи з якої, надалі, була відсіяна фракція розміром часток не більш 5 мм. Зі ставка «Нульовка» міста Покровська піднято зразки донного мулу, а з приватної ділянки відібрано зразок родючого чорнозему. Для збільшення вмісту гумусу та зниження наявності органічних решток частину чорнозему було оброблено за допомогою червоних каліфорнійських дощових черв'яків.

Оцінку потенційної родючості ґрунтового середовища виконували фертометром *Digital 3-way analyzer*, за допомогою якого визначали вміст необхідних для рослин поживних речовин: азоту (N), фосфору (P) та калію (K). В ході досліджень, відповідно до тарувальної шкали фертометру (табл. 1), фіксували зміну показника потенційної родючості ґрунтового субстрату. Дослідження тривали до отримання стабільних показників, що зайняло 21 добу.

Для дослідження були підготовані три типи ґрунтового субстрату:

- перший – еталонний, це відібраний з присадибної ділянки чорнозем;
- другий зразок – суміш еталонного чорнозему та обробленого дощовими черв'яками, у пропорції 50 на 50%;
- третій – суміш, яка складена з трьох компонентів: 25% перегорілої шахтної породи, 25% мулу та 50% обробленого черв'яками чорнозему [9].

В лабораторних умовах було визначено показник рН донних відкладень. Так, згідно з проведенням аналізом досліджуваних зразків, рН донних відкладень складає 8-9. Такі показники свідчать про те, що донні відкладення мають слаболужне середовище.

Зразки відвальної маси досліджували на кислотність. Згідно із дослідженнями, для відвальної маси териконів Донецької області є характерним значення рН = 5, отже реакція середовища є кислою.

Дослідження показали, що змішування біогумусу з перегорілої породою дозволяє отримати нейтральне середовище з $pH=7$, отримане таким чином добриво не завдає шкоди родючому ґрунту. Процес нейтралізації триває одночасно з проникненням рідкої фази добрива до пор породи. Крім того, ці данні вказують на перспективу регулювання кислотно-лужного стану ґрунтів у відповідності до комфортного для певних видів рослин, а також до нейтралізації закислених ділянок.

Зразки субстратів було поміщено до ємності об'ємом 250мл та зволожено до 70..80%. Рівень вологості вимірювали за допомогою вологоміра АМТ-300 All.

Двічі на тиждень проводили вимірювання за допомогою фертометра. Щуп приладу зануряли до ємності на глибину 5...8 см та фіксували показання. Заміри виконували 4-5 разів в кожному посуді.

Таблиця 1 – Масова концентрація азоту, фосфору та калію у ґрунтовому субстраті, мг/кг

Показання фертометра, бали	0-2	3	4	5	6	7	8-9
N, мг/кг	<50	50	87,5	125	162,5	200	>200
P, мг/кг	<4	4	6,5	9	11,5	14	>14
K, мг/кг	<50	50	87,5	125	162,5	200	>200
Показник потенційної родючості	дуже низький	низький	середній	підвищений	дуже високий		

Результати вимірювань (рис.1) свідчать, що протягом кількох діб показники змінювались.

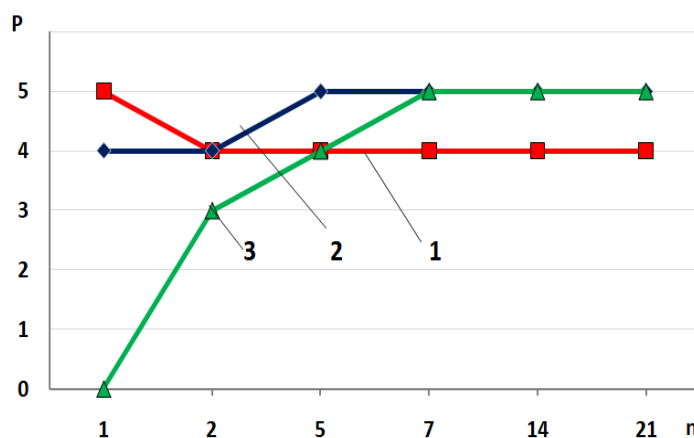


Рисунок 1 – Показники потенційної родючості експериментальних зразків: 1, 2, 3 – номери зразків ґрунтового субстрату; Р – показник фертометра, бал.; n – тривалість спостережень, діб.

Так, у першого він зменшився з 5 до 4 балів – з підвищеного до середнього, а другого, навпаки – збільшився з 4 до 5 балів. Це можливо пояснити впливом води. В першому зразку зволоження призвело до невеликого розчинення поживних речовин. У другому зразку навпаки – відбулася гомогенізація середовища й збагачені гумусом речовини більш рівномірно розсіялись у просторі судини. В третьому композитному матеріалі початкові нульові показання відповідали рівню неживої безплідної породи. Внаслідок наявності пористого породного середовища протягом тижня продовжувались процеси сорбування ним рідких компонентів і це загальмовувало гомогенізацію субстрату. Однак поступово показники зрівнялись до найвищого рівня –

до другого зразка.

Можна зробити попередній висновок, що додавання до збагаченого продуктами переробки черв'яків субстрату перегорілої породи та мулу не знизило показники родючості. Вони були на підвищеному рівні та вище ніж не здобрений еталонний ґрунт. Напрошується передбачення, що додавання подібних домішок до ґрунтів з низькими та середніми показниками потенційної родючості (нижче чотирьох балів, див. табл. 1) дозволить підвищити їх врожайність.

Проведено також дослідження динаміки схожості рослин на експериментальних ґрунтах. Цей дослід свідчив не тільки про потенційну родючість, а й про вплив структури ґрунту. Річ у тім, що донбаські землі мають завеликий вміст глинистих часток, що обумовлює низькі параметри повітрообміну та росту коріння рослин.

В приготовлені зразки ґрунтового субстрату було висаджено по п'ять пророщених зерен томатів. Забезпечено рівні умови освітлення, поливу та температури для всіх субстратів.

Перші сходи насіння у всіх трьох зразках були зафіксовані на 7 день дослідження. Однак, якщо у другому та третьому зразку ґрунту відсоток схожості дорівнював 40%, то в першому зразку лише 20%. На 14 день дослідження відсоток схожості складав: для зразка №1 – 40%, №2 – 40%, №3 – 100%. На 29 день дослідження у першого та другого зразка відсоток схожості не змінився, а у третього зменшився до 60% внаслідок загибелі двох паростків.

Перші два листки у рослин почали з'являтися на 14 день у зразка ґрунтового субстрату №3, на 19 день у зразка №2 та лише на 21 день у зразка №1.

Для кожного зразка ґрунтового субстрату було розраховано середній приріст довжини стебел помідор та побудовано діаграму, що зображена на рисунку 2. Для третього зразка ґрунтового субстрату середній приріст довжини рослин розраховувався для 60% сходів, тобто не враховувалася довжина рослин, що в подальшому відмерли.

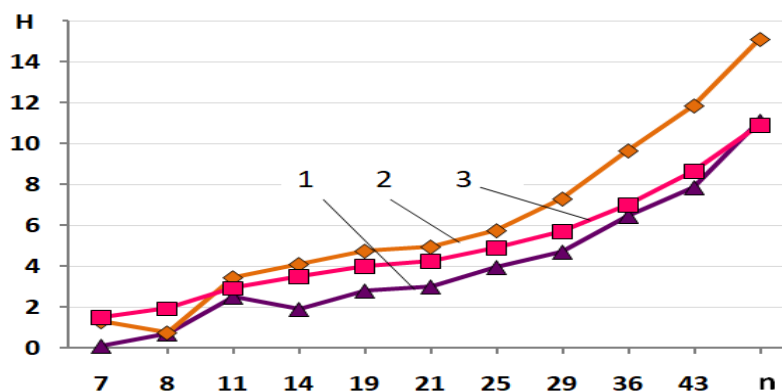


Рисунок 2 – Діаграма росту стебел помідор на експериментальних зразках ґрунту:
1, 2, 3 – номери зразків ґрунтового субстрату; Н – довжина стебел помідор, см;
n – тривалість спостережень, діб.

Найбільший середній ріст стебел помідор був у другому ґрунтовому субстраті, а найменший у №1. Однак, враховуючи той факт, що відсоток схожості у третьому субстраті був на 20% вище ніж у першого та другого, можна вважати, що суміш з 25% перегорілої шахтної породи, 25% мулу та 50% органічного добрива має найвищий показник схожості.

Висновок. Наявність пустої породи, що утворюється внаслідок вуглевидобутку, визначає збільшення собівартості основної продукції шахт та погіршення екологічної

ситуації у гірничопромислових регіонах.

З результатів аналізу можливих шляхів поводження з твердими відходами шахт, та виходячи з наявної ситуації в сільському господарстві України, висунуто гіпотезу, про актуальність і перспективність переробки шахтної породи у композитне органо-мінеральне добриво.

В якості основних інгредієнтів органо-мінерального добрива запропоновано використовувати перегорілу відвальну масу з териконів та донні мулисті відкладення водойм. Проведені попередні випробування підтвердили можливість підвищення схожості та родючості здобрених такими субстратами ґрунтів.

Список літератури

1. Радченко В. В. Стан породних відвалів вітчизняних вугільних шахт / В.В. Радченко, В.А. Куліш, Є.В. Чепіга, В.С. Сторожчук // *Уголь України*. 2013. № 12. С. 44–49.
2. Kostenko V., Zavialova O., Chepak O., Pokalyuk V. Mitigating the adverse environmental impact resulting from closing down of mining enterprises. *Mining of Mineral Deposits*. 2018. No.12. P. 105–112. <https://doi.org/10.15407/mining12.03.105>.
3. Tavrel, M., Kostenko, V., Bohomaz, O., Kostenko, T., Zemlianskyi, O., Pidhornyy, M. Recirculating Airlift for Aeration of Shallow Water Bodies. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2022. 23(5). P. 177–187. <https://doi.org/10.12912/27197050/152114>.
4. Сергієнко М. І. Використання відходів гірничого виробництва для виготовлення гірничої продукції / М. І. Сергієнко // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2014. № 25. С. 44–49.
5. Thang N., Tuan N., Hiep D., Thang V. The Potential Use of Waste Rock from Coal Mining for the Application as Recycled Aggregate in Concrete. *Proceedings of the International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining*. 2020. P. 550–561. DOI: 10.1007/978-3-030-60839-2_29.
6. Shreekant R., Aruna M., Vardhan H. Utilisation of mine waste in the construction industry - A Critical Review. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. 2016. No. 9(1). P. 182–195.
7. Agyeman S., Ampadu S. I. K. Exploring the techno-economic feasibility of mine rock waste utilisation in road works: The case of a mining deposit in Ghana. *Waste Management & Research*. 2016; 34(2): 156–164.
8. The benefits of using Rock or Silicate Minerals as Fertilisers. 2020. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://ecogrowth.com.au/our-company/news/the-benefits-of-rock-minerals-as-fertilisers>
9. Костенко В.К., Ляшок Я.О., Глушко І.О., Богомаз О.П., Зав'ялова О.Л., Когтєва О.П., Картавцева О.Д. Спосіб виробництва органо-мінерального добрива. Пат. на корисну модель № 151740, Україна, МПК C05F 7/00 (2022.01); заявник і власник ДонНТУ. –№ у 2021 07341; заявл. 16.12.2021; опубл. 07.09.2022. Бюл. № 26.

References

1. Radchenko, V.V. State of rock dumps of domestic coal mines / V.V. Radchenko, V.A. Kulish, E.V. Chepiga, V.S. Storozhchuk // *Ugol Ukrainy*. 2013. No. 12. С. 44–49.
2. Kostenko V., Zavialova O., Chepak O., Pokalyuk V. Mitigating the adverse environmental impact resulting from closing down of mining enterprises. *Mining of Mineral Deposits*. 2018. No.12. P. 105–112. <https://doi.org/10.15407/mining12.03.105>.
3. Tavrel, M., Kostenko, V., Bohomaz, O., Kostenko, T., Zemlianskyi, O., Pidhornyy, M. Recirculating Airlift for Aeration of Shallow Water Bodies. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2022. 23(5). P. 177–187. <https://doi.org/10.12912/27197050/152114>.
4. Sergienko M. I. The use of mining waste for the production of mining products / M. I. Sergienko // *Bulletin of NTUU "KPI". "Mining" series*. 2014. No. 25. С. 44–49.
5. Thang N., Tuan N., Hiep D., Thang V. The Potential Use of Waste Rock from Coal Mining for the Application as Recycled Aggregate in Concrete. *Proceedings of the International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining*. 2020. P. 550–561. DOI: 10.1007/978-3-030-60839-2_29.
6. Shreekant R., Aruna M., Vardhan H. Utilisation of mine waste in the construction industry - A Critical Review. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. 2016. No. 9(1). P. 182–195.
7. Agyeman S., Ampadu S. I. K. Exploring the techno-economic feasibility of mine rock waste utilisation in road works: The case of a mining deposit in Ghana. *Waste Management & Research*. 2016; 34(2): 156–164.
8. The benefits of using Rock or Silicate Minerals as Fertilisers. 2020. [Електронний ресурс] – Режим

доступу до ресурсу: <https://ecogrowth.com.au/our-company/news/the-benefits-of-rock-minerals-as-fertilisers>

9. Kostenko V.K., Lyashok Y.O., Hlushko I.O., Bohomaz O.P., Zavyalova O.L., Kohteva O.P., Kartavtseva O.D. The method of production of organo-mineral fertilizer. Stalemate. for utility model No. 151740, Ukraine, IPC C05F 7/00 (2022.01); applicant and owner of DonNTU. – No. u 2021 07341; statement 12/16/2021; published 09/07/2022. Bul. No. 26.

Надійшла до редакції 15.09.2022

V. Kostenko, O. Bohomaz, I. Hlushko

PRELIMINARY RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF USING SOLID MINE WASTE AS FERTILIZER

Purpose. Study of the possibility of using burned waste from slagheaps and bottom silty deposits of reservoirs as the main ingredients of organo-mineral fertilizer, due to determination of fertility indicators of soil treated with waste.

Methodology. On the basis of laboratory studies of the potential fertility of the soil environment and studies of the dynamics of plant germination on experimental soils, the physical and chemical properties of the ingredients of the organo-mineral fertilizer have been determined.

Results. As a result of the laboratory studies, it has been found that the addition of burned waste material from slagheaps and bottom silty deposits of reservoirs to the substrate enriched with the products of the processing of Californian earthworms does not reduce the fertility indicators of the substrate. The addition of such admixtures to soils with low and medium indicators of potential fertility will increase their productivity.

Scientific novelty. A new composition of ecologically safe organic-mineral fertilizer based on burnt solid mine waste, bottom muddy sediments of reservoirs with the addition of chernozem treated with red California earthworms has been suggested.

Practical significance. The use of burned waste mass from slagheaps and bottom silty deposits of reservoirs for the production of cheap composite organo-mineral fertilizers will reduce the anthropogenic load on the environment from mine wastes, increase the content of humus and improve the structure of agricultural soils.

Keywords: mine rock, slagheap, fertilizers, sludge, mining waste, California worms.

Відомості про авторів

Костенко Віктор Климентович, д.т.н., проф., завідувач кафедри природоохоронної діяльності ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; e-mail: vk.kostenko@gmail.com

Богомаз Ольга Петрівна, Ph. D., доцент кафедри природоохоронної діяльності ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; e-mail: olha.bohomaz@donntu.edu.ua

Глушко Інна Олександрівна, аспірант кафедри природоохоронної діяльності ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; e-mail: inna.hlushko@donntu.edu.ua

Kostenko Viktor, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Environmental Protection, Donetsk National Technical University; e-mail: vk.kostenko@gmail.com

Bohomaz Olha, Ph. D., associate professor of the Department of Environmental Protection of Donetsk National Technical University; e-mail: olha.bohomaz@donntu.edu.ua

Hlushko Inna, graduate student of the Department of Environmental Protection, Donetsk National Technical University; e-mail: olha.bohomaz@donntu.edu.ua

УДК 621.39:622.81+004.6

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-63-72](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-63-72)

А.М. Лабузова, А.О. Воропаєва, В.Я. Воропаєва

СТРУКТУРА ТА ФУНКЦІОНАЛ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПІДСИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВИДОБУВНИХ ЗАБОЇВ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

Актуальність. Комунікаційні системи, використовувані на сьогоднішній день у вугільній промисловості, пройшли довгий шлях з моменту розробки. Більшість шахт використовують застарілі системи зв'язку між диспетчером та гірниками. Безпечна робота у вугільній промисловості надзвичайно важлива. Таким чином, вимоги до контролю збору даних для спостереження, моніторингу та обміну інформацією у реальному часі, повинні зростати з поліпшенням технічних можливостей систем позиціонування і переходити на більш високий рівень контролю індивідуальних параметрів стану здоров'я.

Мета. Підвищення рівня безпечних умов праці при підземних роботах шляхом забезпечення операторського контролю технологічних процесів, системи збору, обробки та архівування інформації про об'єкт. Можливість моніторингу показників життєдіяльності та визначення місцезнаходження конкретного шахтаря у реальному часі.

Результати. У статті проведено аналіз використовуваних систем та методів позиціонування гірників. Встановлено переваги та недоліки існуючих систем моніторингу технологічних показників вугільних шахт, оптимальної технології передачі даних та визначення місцезнаходження підземного працівника. Встановлено напрямки подальших досліджень із підвищення контролю показників життєдіяльності, можливості оперативної передачі сигналу диспетчеру у разі виникнення надзвичайної ситуації та індивідуальній персоналізації гірника на базі технології RFID. Практичне значення отриманих результатів полягає у функціональному доповненні використовуваних систем, що дозволить вчасно та з великою точністю забезпечити порятунк застряглих шахтарів з можливістю вистежування показників їх стану.

Наукова новизна. У статті запропоновано новий функціонал та структуру автоматизованої підсистеми моніторингу та контролю технологічних показників видобувних забоїв вугільних шахт, що відрізняються від існуючих персональним контролем показників життєдіяльності робітників у реальному часі за рахунок використання активних RFID міток вбудованих в індивідуальні пристрої.

Практична значимість. Підвищення безпеки ведення підземних робіт.

Ключові слова: позиціонування, вугільна шахта, технологія RFID, система контролю, сигнал, автоматизоване керування, реальний час, моніторинг, показники життєдіяльності, шахтар, передача даних.

Загальна постановка проблеми. Одним із фундаментальних напрямів розвитку економіки Східних регіонів України вважаються гірничо-технічні та вуглевидобувні галузі. Останнім часом можна відмітити явну тенденцію до модернізації технологічних процесів та впровадження новітніх технологій задля підвищення ефективності та безпеки гірничого виробництва. Поряд з цим, в зазначених галузях зростає рівень аварійності та травматизму, а професія шахтаря є однією з небагатьох сучасних з вкрай високим рівнем ризику. Під час аварійних ситуацій виникає проблема, що полягає у складності визначення місцезнаходження підземного працівника з достатньою точністю та оперативністю, а також здійснення моніторингу та контролю у реальному часі показників його життєдіяльності. Під час нормальної робочої ситуації показники життєдіяльності кожного шахтаря так само можуть змінюватись, викликаючи необхідність вчасного реагування на погіршення та надання першої медичної допомоги.

Ця проблема пов'язана не тільки з небезпечними умовами в шахті, а й із застарілим обладнанням. Тому актуальним напрямком модернізації технологічного устаткування гірничо-видобувних підприємств є створення безпечних умов праці, а

саме застосування автоматизованої підсистеми моніторингу та контролю технологічних показників видобувних забоїв вугільних шахт, зокрема показників життєдіяльності підземних працівників для забезпечення операторського контролю за технологічними процесами та показниками життєдіяльності підземних працівників у реальному часі.

Постановка задачі дослідження. Мета роботи полягає в розробці підходів до підвищення ефективності автоматизованої підсистеми моніторингу технологічних показників видобувних забоїв вугільних шахт для забезпечення операторського контролю за технологічними процесами та показниками життєдіяльності підземних працівників у реальному часі. Досягнення мети забезпечується розв'язанням наступних завдань:

- аналіз існуючих систем;
- розробка функціоналу автоматизованої підсистеми моніторингу;
- вибір оптимальної технології передачі даних;
- аналіз методів визначення місцеположення підземного працівника;
- розробка структури автоматизованої підсистеми моніторингу.

Аналіз існуючих систем. Функціонал та принцип організації систем, що вирішують вищезазначені проблеми, обумовлюється діючою нормативною базою і тому суттєво різняться в різних країнах. В Україні це передусім нормативно-правові акти з охорони праці, що стосуються ведення гірничих робіт та описують загальні вимоги до автоматизованих систем технологічних процесів вугільної шахти, моніторингу та протиаварійного захисту. Відповідно до «Правил безпеки у вугільних шахтах. Наказ Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду 22.03.2010 № 62» Єдина система моніторингу - одна або кілька автономних автоматизованих систем з подібним призначенням, об'єднаних для виконання певних функцій з метою виключення їх дублювання [1]. Згідно з Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості № 661 від 24.09.2014, автоматизована система протиаварійного захисту - комплекс взаємозв'язаних засобів технічного, програмного, інформаційного і організаційного забезпечення для запобігання аварійним ситуаціям.

Автоматизовані системи технологічних процесів вугільних шахт набули масового використання завдяки своїм основним перевагам: безпека, ефективність та продуктивність робочого процесу. Серед яких виділяють наступні: Caterpillar, ГРАНЧ та Mine Radio Systems.

Обладнання системи автоматизації Caterpillar (CAT) в очисних забоях для видобутку вугілля дозволяє передавати інформацію шляхом множини датчиків, що керуються програмованими контролерами CAT сімейства RMC. Вся інформація про обладнання лави спочатку збирається в електронних компонентах кожної одиниці обладнання, а потім передається в забій штреку, де в режимі реального часу візуалізуються дані про стан обладнання та рівень видобутку, що дає повне уявлення що відбувається у шахті [2]. Функціоналі пакети HEALTH та COMMAND підтримують функціонал виробництва та забезпечують максимальну продуктивність.

• HEALTH – відстежує режим роботи кожної одиниці обладнання у лаві, з точністю до проценту та градуса. Система здатна подавати сигнал тривоги, якщо відбувається зміна у заданих характеристиках обладнання;

• COMMAND – контролює процес видобутку та експлуатаційного горизонту, забезпечуючи максимальну продуктивність та коригує навігацію необхідну для системи, щоб залишатись у зоні видобутку.

Компанія Caterpillar постійно вдосконалює свою продукцію і наразі надає можливість відслідковувати роботу обладнання за допомогою камер

відеоспостереження та відповідних датчиків. Також розробляється технологія на базі штучного інтелекту, здатна приймати рішення про управління обладнанням у вибої, це дозволить вийти на рівень повної автономії системи. У складі компанії понад 480 підрозділів, що розташовані у 50 країнах світу на п'яти континентах. Штаб-квартира знаходиться в США. Обладнання системи Caterpillar функціонує на багатьох підприємствах України, таких як: ПП «Агроекологія», «Полтавський ГЗК», ТОВ "Універбур", ТОВ «Біланівський ГЗК», ОВ «Єрстівський ГЗК», ДТЕК "Курахівська ТЕС", ТОВ "Павлоград вугілля", "ЛІТМАШ" та інші.

Обладнання науково-виробничої компанії «ГРАНЧ» є сукупністю електричних, електронних та програмованих технічних засобів, об'єднаних у підземну інформаційну систему, що дозволяє керувати практично будь-яким підземним обладнанням. Споживачами виступають гірничі підприємства країн СНД, США, Таїланда, Малайзії, Еквадора. Програмні контролери "Granch Adaptive Linker" встановлюються на рухоме кероване шахтне устаткування та забезпечують збір інформації від електротехнічних пристроїв різних рухомих об'єктів та подальшу її передачу на сервер, утворюючи таким чином багаторозмірну телекомунікаційну систему. Інформація передається в режимі реального часу на головний комп'ютер диспетчеру. У разі відсутності зв'язку з сервером контролер зберігає дані вимірювань у вбудованій «чорній скриньці» [3]. Крім адаптивної передачі потоку даних контролер можна використовувати для підключення до нього стороннього обладнання, наприклад відеокамер, датчиків, пульта машиніста або пульта механіка. Функціональні можливості системи «ГРАНЧ» допускають доповнення у вигляді нових датчиків та контролерів.

Mine Radio Systems є масштабним програмно-апаратним комплексом технічних засобів, що забезпечує вирішення завдань з організації безпечного виробництва, а також контролю та управління технологічними процесами в нормальних та аварійних умовах рудників та шахт. Розгалужена мережа сервісної підтримки охоплює 6 континентів і включає 12 філій, а географія впроваджень налічує понад 40 країн. Спеціалізована технічна система об'єднана програмно-апаратним комплексом із загальним інформаційним середовищем та єдиною базою даних підсистеми. Всі компоненти комплексу інтегровані в єдине програмне середовище «Flexcom», на основі якого можуть бути розгорнуті системи оперативного радіозв'язку із зонами обслуговування на поверхні та в підземній частині шахти [4]. Окрім обладнання Mine Radio Systems у програмному забезпеченні (ПЗ) можлива інтеграція апаратури автоматизації різних виробників, що відповідає вимогам промислової безпеки. Реалізація кожної функції забезпечується окремою підсистемою, що входить до складу ПЗ Flexcom. Специфікація підсистем визначається під час проектування і може змінюватися під час експлуатації та забезпечує:

- виявлення та локалізацію одного чи кількох шахтарів у «завалі», забезпечення рятувальної команди інформацією про спрямування та відстань до кожного шахтаря;
- інформування кожного шахтаря у «завалі» про факт його виявлення.

Детальний порівняльний аналіз, відповідно до діючою нормативної бази, перелічених вище систем наведено в таблиці 1.

З таблиці 1 можна зробити висновок, що найкраще висунутим вимогам відповідають системи автоматизації гірничого виробництва Caterpillar та Mine Radio Systems. Головна перевага Mine Radio Systems полягає у сповіщенні гірника під час аварійної ситуації про його пошук, що становить важливу складову в функціоналі автоматизованої підсистеми моніторингу. Але вагомими недоліками усіх проаналізованих систем є відсутність збору даних про стан шахтаря при аварійній та нормальній роботі та неможливість забезпечити екстрений зворотній зв'язок з диспетчером у разі виникнення надзвичайної ситуації.

Таблиця 1 – Порівняння автоматизованих систем

	Caterpillar	«ГРАНЧ»	Mine Radio Systems
Моніторинг гірників у реальному часі	+	+	+
Візуалізація технологічного процесу	+	+	+
Сигналізація про відключення обладнання від робочого процесу	+	+	+
Сигнал SOS на ПУ диспетчера	-	-	-
Можливість розширення	+	+	+
Персоналізація	+-	+-	+-
Контроль кожної одиниці обладнання	+	-	+
Збір даних про стан шахтаря при аварійній та нормальній роботі	-	-	-
Оповіщення шахтаря під час аварійної ситуації про його пошук	-	-	+

Для усунення цього недоліку рекомендована прив'язка даних не до номера пристрою, а персонально до робітника, з архівуванням інформації про індивідуальні параметри та показники життєдіяльності. Виходячи з проведеного аналізу, можна зробити висновок, що система Caterpillar яка широко впроваджена в українських та закордонних компаніях, є більш привабливою за доступністю обладнання для усунення недоліків шляхом розширення функціональних пакетів. Саме на цій системі і пропонується розробляти автоматизовану підсистему моніторингу та контролю технологічних показників видобувних заходів вугільних шахт, яка має володіти наступним функціоналом:

- контроль показників життєдіяльності шахтаря при нормальній чи аварійній ситуації для вчасного реагування на погіршення стану та надання першої медичної допомоги;

- моментальна передача сигналу SOS у разі виникнення аварійної чи надзвичайної ситуації;

- індивідуальна персоналізація гірника.

Реалізація такого функціоналу потребує високошвидкісної і надійної телекомунікаційної інфраструктури промислової мережі, важливу частину якої в сучасних умовах складають технології бездротової передачі даних.

Технології бездротової передачі даних в підземному просторі шахти. Актуальність впровадження бездротових рішень в гірничому виробництві обумовлена наступними факторами:

- можливість підключення там, де неможливе кабельне з'єднання;

- повна мобільність.

Перелічені чинники особливо важливі для шахт, що характеризуються складною топологією підземних гірничих виробок і споруд на поверхні. Розглянемо основні технології бездротової передачі даних та можливість використання у підземному просторі. Система локального позиціонування на основі бездротових мереж є мережею стаціонарних вузлів, а також рухомі вузли, що є мобільними об'єктами, координати яких необхідно визначити. До основних технологій бездротової передачі даних в промисловості відносять - Wi-Fi, Bluetooth и ZigBee.

- Wi-Fi. Технологія Wi-Fi заснована на стандартах IEEE 802.11 b/g/n, та складається з сімейства протоколів передачі даних за допомогою надвисокочастотних радіохвиль на короткі відстані [5, С. 178]. Спеціальні виносні антени Wi-Fi пристрою можуть передавати сигнал на відстань до 500 м. Технологія передачі даних орієнтована

на підключення не менше одного клієнта(датчик, смартфон, ПК) та здійснюється у діапазоні частот 2,4 ГГц.

- **BlueTooth.** Технологія BlueTooth заснована на стандартах IEEE 802.15, вона дозволяє створити бездротову персональну мережу передачі даних (WPAN) [5, С. 166]. Передача даних здійснюється по радіоканалу на невеликій відстані (10-100 м.) у діапазоні частот 2,4 ГГц і з'єднувати ПК, мобільні телефони та датчики.

- **ZigBee.** Технологія ZigBee заснована на стандартах IEEE 802.15.4 .Передача даних здійснюється за допомогою радіохвиль з максимально низькими енерговитратами на невеликій відстані (10-100 м) у діапазоні частот 2,4 ГГц [5, С. 169]. Протоколи ZigBee розроблені для використання у вбудованих програмах, що вимагають низьку швидкість передачі даних та низьке енергоспоживання.

Порівняльні характеристики основних протоколів передачі даних, що застосовуються в системах автоматизації вугільної промисловості приведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Протоколи передачі даних в підземному просторі

Технології бездротової передачі даних в підземному просторі шахти	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee
Пропускна спроможність, (кбіт/с.)	11 000	723,1	250
Частотний діапазон, (ГГц)	2,4 – 2,483	2,4 – 2,483	2,4 – 2,483
Діапазон дії, (м.)	20-300	10-100	10-100
Час безперервної роботи від батареї, (дні)	0,5-5	1-10	100-1000

З таблиці 2 можна зробити висновок, що найкраще висунутим вимогам відповідають бездротові передачі даних в підземному просторі шахти Bluetooth та ZigBee. Головна перевага ZigBee полягає у низькому енергоспоживанні. Стандарт дозволяє створювати мережі з багато осередковою топологією, таким чином обслуговуючи дуже велику кількість вузлів та збільшуючи дальність зв'язку без додаткових витрат на підсилювачі потужності. Технологія ZigBee не призначена для передачі великих обсягів інформації, таких як Wi-Fi або Bluetooth. Однак для передачі показників датчиків, об'єм яких рідко перевищує десятки байт, не потрібні високі швидкості — технологія містить оптимальне співвідношення енергоспоживання ціни та надійності. Бездротову передачу даних в підземному просторі шахти на базі ZigBee можна розширити використанням RFID технологій, до якої відносяться активні, пасивні та напівпасивні мітки:

- **Активні RFID** мітки оснащені вбудованим джерелом живлення та можуть передавати сигнали для відстеження розташування об'єкта. Оскільки батарея в активних мітках може підвищити потужність сигналу, вони зазвичай мають велику дальність зчитування (до 100 метрів) [6, С. 39]. Ці мітки використовуються для контролю місцезнаходження персоналу та транспорту.

- **Пасивні RFID** мітки не оснащені вбудованим джерелом живлення. Живлення мітки відбувається за рахунок електромагнітної енергії, яка надходить від RFID сканера. За рахунок чого, вони не можуть передавати данні, а тільки їх отримувати та зчитувати [6, С. 38]. Ці мітки використовуються для ідентифікації особистості та оплати послуг.

- **Напівпасивні RFID** мітки оснащені вбудованим джерелом живлення, але не передають періодичний сигнал, як активні мітки. Батарея використовується тільки для увімкнення мітки при отриманні сигналу. Мітка може зберігати дані які були задані тільки один раз, при виготовленні [6, С. 40]. Ці мітки використовуються

для маркування.

Враховуючи всі параметри проаналізованих технологій RFID, для впровадження автоматизованої підсистеми моніторингу та контролю технологічних показників видобувних забоїв вугільних шахт пропонується застосувати активні RFID мітки вбудованими в індивідуальний пристрій носія. Для повного функціоналу автоматизованої підсистеми моніторингу крім технологій передачі даних є важливим підбір методу щодо визначення місцеположення гірника.

Аналіз методів визначення місцеположення підземного працівника

Вибір методу щодо визначення місцеположення шахтаря ділиться на три групи:

- Триангуляція - визначення розташування мобільного пристрою по кутах щодо базових станцій;
- Трилатерація - визначення розташування мобільного пристрою по відстані від базових станцій;
- Вимір сили сигналу.

Перший метод. AoA (angle of arrival) складається з визначення напрямку джерела сигналу. В ньому задіяні базові станції з антеною, що обертається. Після отримання інформації на базову станцію (БС) від активної мітки (ЕМ) вбудованого у каску гірника, залежно від напрямку джерела сигналу, визначається місце знаходження об'єкта [7]. В цьому випадку, від кількості базових станцій залежить радіус точного визначення зони з місцезнаходженням шахтаря.

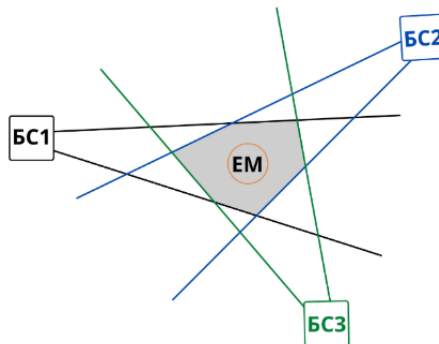


Рисунок 1 - Визначення місцезнаходження електронного модуля вбудованого у каску гірника за методом AoA.

Переваги методу AoA полягають:

- Великий радіус дії.

Недоліки методу AoA полягають:

- Дальність рівню сигналу, що отримується базовою станцією від ЕМ приблизно 5 м в умовах підземного простору, але такі перешкоди, як стіни та металеві елементи, можуть зменшити радіус дії на 25-30%.

Другий метод. Метод TDoA (time difference of arrival) складається з вимірювання різниці часу між передачею сигналу від ЕМ до БС [8]. Для роботи даного методу потрібно знати різницю в часі отримання сигналу за допомогою математичної обробки, після чого можна отримати відстань від ЕМ до БС.

Переваги методу TDoA полягають:

- Великий радіус дії;
- Висока точність позиціонування ЕМ.

Недоліки методу TDoA полягають:

- Необхідність у синхронізації.

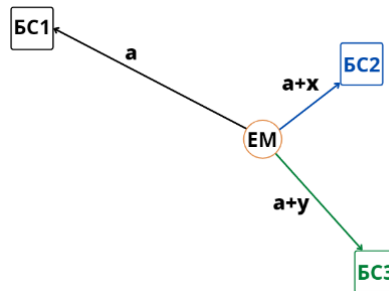


Рисунок 2 – Визначення місцезнаходження електронного модуля вбудованого у каску гірника за методом TDoA.

Третій метод. TWR RSSI (received signal strength indicator) завдяки даному методу можна визначити місце розташування ЕМ, виходячи з рівня інтенсивності сигналу, який отримано від БС чи навпаки від БС до ЕМ. Для того, щоб користуватись методом, застосовується перетворення рівня потужності сигналу в відстань [9].

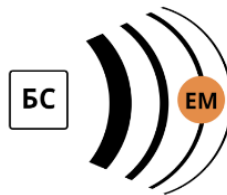


Рисунок 3 – Визначення місцезнаходження електронного модуля вбудованого у каску гірника за методом TWR RSSI

Переваги методу TWR RSSI полягають:

- Мінімальна енерговитрата ЕМ.

Недоліки методу TWR RSSI полягають:

- Дальність рівню сигналу, що отримується базовою станцією від ЕМ приблизно дорівнює 5 м в умовах підземного простору, але такі перешкоди, як стіни та металеві елементи, можуть зменшити радіус дії на 25-30%.

Виходячи з аналізу методів визначення місцеположення у підземному просторі рекомендовано поєднати технологію ZigBee з методом трилатерації. Комбінування забезпечить точності позиціонування об'єкта та можливості великого радіусу дії для визначення місцезнаходження за допомогою математичної обробки вимірювання різниці часу між передачею сигналу від мітки до базової станції.

Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності автоматизованої системи моніторингу. Впроваджені системи вирішують представлені «Правила безпеки у вугільних шахтах. Наказ Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду 22.03.2010 N 62» [1], але мають ряд недоліків. В існуючих методах моніторингу працівників активну мітку розташовано у гірничій касці. Під час аварійної ситуації точність визначення місцеположення значно знижується за рахунок ідентифікація пристрою (каски чи газоаналізатора), а не конкретного шахтаря. Крім того, відсутня можливість у екстреному зворотному зв'язку з диспетчером, зборі, збереженні та архівуванні інформації про індивідуальні

показників життєдіяльності. Для вирішення недоліків, пропонується розробити автоматизовану підсистему описану вище, яка буде мати ряд переваг:

- точність позиціонування;
- контроль та облік робочого часу;
- застосування двостороннього зв'язку між шахтарем та гірничим диспетчером;
- можливість зберігання додаткової інформації про показники життєдіяльності з подальшою можливістю у збереженні та архівуванні даних.

Застосування технології RFID [10] для впровадження підсистем передачі даних на базі автоматизованої системи моніторингу Caterpillar, набуває можливості у доповненні функціональних пакетів вказаних вище, які ще не застосовуються. За рахунок чого, збільшиться рівень безпечних умов праці при підземних роботах, що дозволить вчасно та з великою точністю забезпечити порятунок застряглих шахтарів з можливістю відстежування індивідуальних показників їх стану та екстрений зворотній зв'язок з диспетчером.

Підключення підсистеми передачі даних автоматизованої системи моніторингу у підземному просторі шахти доцільно представити у вигляді схеми (рис.4).

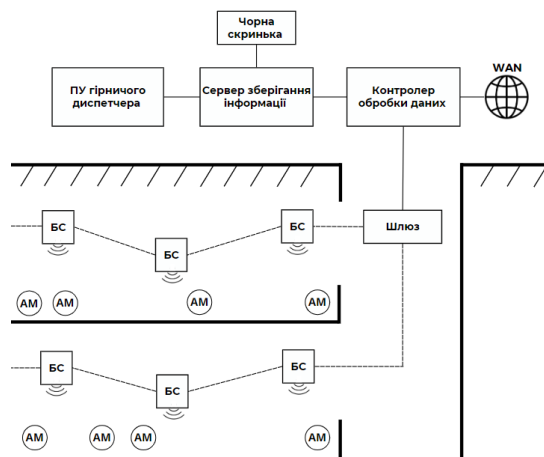


Рисунок 4 – Структура підсистем передачі даних автоматизованої системи моніторингу

Передача сигналу від активної RFID мітки (АМ) поступає до базової станції (БС), де вона фіксує факт передачі даних, зчитує інформацію з мітки і передає її на шлюз. Після чого сигнал надходить до контролера, де відбувається збір даних та їх первинна обробка за встановленими алгоритмами з заданими показниками [11]. До серверу зберігання інформації надходять всі дані з подальшою математичною обробкою, реєстрацією, архівацією інформації та технологічних параметрів за вказаними алгоритмами і дублюванням їх до чорної скриньки. Якщо данні не відповідають заданим параметрам, автоматично надходить сигнал на пульта керування (ПУ) гірничого диспетчера з персональною інформацією носія та порушеними показниками. Підсистема моніторингу повинна мати інформаційний характер з можливістю точного позиціонування, постійного запису та оцінки стану показників життєдіяльності гірника.

Висновок. Проведено аналіз найбільш розповсюджених на сьогоднішній день систем моніторингу технологічних показників видобувних заобів вугільних шахт, бездротової передачі даних та методів визначення місцеположення підземного працівника. У статті встановлено пріоритетні напрямки подальших досліджень щодо модернізації технологічних процесів та впровадженні новітніх технологій на базі системи Caterpillar, задля підвищення ефективності та безпеки гірничого виробництва.

Функціональне доповнення системи Caterpillar дозволить впровадити підсистему для точного позиціонування, можливості диспетчерського контролю індивідуальних показників життєдіяльності під час нормальної чи аварійної ситуації та екстреної передачі сигналу SOS на пульт керування диспетчера. Таким чином, сформовано методику для проектування підсистеми з застосування технологій RFID.

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/print> (дата звернення)
2. Головна сторінка компанії Caterpillar Cat MineStar. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.cat.com/en_US/by-industry/mining/underground-mining/underground-technology.html
3. Шкундин С.З. Оптимизация канала передачи информации в многофункциональной системе безопасности угольных шахт / Шкундин С.З., Хиврин М.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 2. С. 222–229.
4. Головна сторінка компанії Mine Radio Systems . [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://granch.ru/ru/sistemy-bezopasnosti/mnogofunktsionalnaya-sistema-bezopasnosti-sbgps-gornass>
5. Промислові мережі. Навчальний посібник / Воропаєва В.Я., та інші. Покровськ, Одеса, Харків, 2017. 223 с.
6. Слободчук А.Ю. Застосування систем контролю доступу та розробка макету приладу на основі RFID технології / Слободчук А.Ю., Позняков В.О., Ноздрачова К.Л., Юданова Н.М., Якіменко В.В. // Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". 2019. – № 1. – С. 35-47
7. Tan Chee Sheng / Time difference of arrival estimation using fast fourier transform overlap for underwater positioning // Universiti sains Malaysia, 2019. - page. 12-30.
8. Munoz D., Bouchereau F., Vargas C., Enriquez R. / Position Location Techniques and Applications // no. 29 April, 2009. - page. 68-75.
9. Foerster Alexander., Foerster Anna. / Emerging Communications for Wireless Sensor Networks // Jeneza Trdiene 9, 51000 / Rijeka, Croatia, 2010.- pp .228.
10. Occhiuzzi C., Amendola S., Nappi S., D'Uva N., Marrocco G. / RFID Technology for Industry 4.0: Architectures and Challenges // International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). 25-27 September, 2019. - page. 100 - 109.
11. Лабузова А.М. Використання технологій бездротового зв'язку для моніторингу позиціонування підземних працівників. / Лабузова А.М., Воропаєва, В.Я. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Наукові досягнення та відкриття сучасної молоді.(Покровськ, 28 квітня 2021 року). - С. 30-33.

References

1. Safety rules in coal mines. Order of the State Committee of Ukraine on Industrial Safety, Labor Protection and Mining Supervision 22.03.2010 № 62. [Electronic resource]. – Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0398-10/print>
2. The main page of the company Caterpillar Cat MineStar. [Electronic resource]. – Access mode: https://www.cat.com/en_US/by-industry/mining/underground-mining/underground-technology.html
3. Shkundin S. (2018), "Optimization of the information transmission channel in the multifunctional security system of coal mines". Mining Information and Analytical Bulletin. № 2. - page. 222–229.
4. The main page of the company Mine Radio Systems . [Electronic resource]. – Access mode <https://granch.ru/ru/sistemy-bezopasnosti/mnogofunktsionalnaya-sistema-bezopasnosti-sbgps-gornass>
5. Voropayeva V. and other (2017), "Industrial networks". Tutorial. Pokrovsk, Odessa, Kharkiv.- pp.223
6. Slobodchuk A., Poznyakov V., Nozdrachova K., Yudanov N., Yakimenko V. (2019), "Application of access control systems and development of device model based on RFID technology". National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". – page . 35 - 47.
7. Tan Chee Sheng (2019), "Time difference of arrival estimation using fast fourier transform overlap for underwater positioning" Universiti sains Malaysia. - page. 12-30.
8. Munoz D., Bouchereau F., Vargas C., Enriquez R. (2009) "Position Location Techniques and Applications". no. 29 April. - page. 68-75.
9. Foerster Alexander., Foerster Anna. (2010), "Emerging Communications for Wireless Sensor Networks", Jeneza Trdiene 9, 51000 / Rijeka, Croatia. - pp. 228.

10. Occhiuzzi C., Amendola S., Nappi S., D'Uva N., Marrocco G. (2019), "RFID Technology for Industry 4.0: Architectures and Challenges". International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). 25-27 September. - page. 100 - 109.

11. Labuzova A., Voropaieva V. (2021), "Use of wireless communication technologies to monitor the positioning of underground workers". Scientific works of the Donetsk National Technical University Scientific achievements and discoveries of modern youth. Pokrovsk, April 28. - page. 30 - 33.

Надійшла до редакції 25.10.2022

A. Labuzova, A. Voropaieva, V. Voropaieva

STRUCTURE AND FUNCTIONALITY OF THE AUTOMATED SYSTEM OF MONITORING AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL INDICATORS OF COAL MINES

Purpose. Increasing the level of safe working conditions in underground works by providing operator control of technological processes, systems for collecting, processing and archiving information about the object. Ability to monitor vital signs and determine the location of a particular miner in real time.

Methods. The communication systems used today in the coal industry have come a long way since their development. Most mines use outdated communication systems between a dispatcher and miners. Working safely in the coal industry is extremely important. The requirements for the control of data collection for observation, monitoring and exchange of information in real time should grow with the improvement of the technical capabilities of positioning systems and move to a higher level of control of individual health parameters.

Results. The article analyzes the used systems and methods of positioning miners. The advantages and disadvantages of the existing systems for monitoring the technological indicators of coal mines, the optimal technology of data transmission and determining the location of an underground worker have been established. The directions of further research on improving the control of vital activity indicators, the possibility of prompt transmission of a signal to the dispatcher in the event of an emergency, and individual personalization of the miner based on RFID technologies have been determined. The practical value of the obtained results lies in the functional addition of the used systems, which allows timely and highly accurate rescue blocked miners with the possibility of tracking their condition indicators.

Scientific novelty. The article offers a new functionality and structure of an automated subsystem for monitoring and controlling the technological indicators of mining pits of coal mines, which differ from the existing personal monitoring of vital indicators of workers in real time due to the use of active RFID tags embedded in separate devices.

Practical importance. Improving the safety of underground works.

Keywords: positioning, coal mine, RFID technology, control system, signal, automated control, real time, monitoring, vital signs, miner, data transfer.

Відомості про авторів

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

Воропаєва Анна Олександрівна, к.т.н., доц., доцент кафедри інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем, ДВНЗ «Івано-Франківський національний технічний університет нафти та газу»; anna.voropaieva@nuing.edu.ua.

Воропаєва Вікторія Яківна, к.т.н., доцент, проректор з науково-педагогічної роботи, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; viktoriia.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.

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

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

УДК 623.437.093

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-73-85](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-73-85)

Є.Є. Лашко, О.О. Ченчева, С.В. Сукач, С.В. Шлик, С.М. Геращенко, В.В. Дяченко

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ДЛЯ БРОНЕЗАХИСТУ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ТРАНСПОРТУ

Мета. Підвищення техніко-економічних показників технології імпульсної обробки металів і засобів їх діагностики на основі розвитку теоретичних основ формозміни під дією імпульсного впливу та розрахунку енергосилових параметрів.

Методика. Числове моделювання вибухового навантаження пластини зі сталі Quardian 500 виконувалося у системі Ansys AUTODYN із застосуванням опису властивостей матеріалу, що зазнає імпульсного впливу, й ітераційної процедури. У розрахункову систему входили атмосферне повітря, заряд вибухової речовини (9,9 кг тринітротолуолу), пластина-ударник, досліджувана пластина та ґрунт.

Результати. Проведено експериментальне дослідження динамічного вибухового навантаження сталі Quardian 500 і співставлення отриманих результатів з аналітичними розрахунками, отриманими у системі Ansys AUTODYN із застосуванням розробленої ітераційної процедури. Визначена адекватність розробленої математичної моделі числового дослідження вибухового навантаження результатам натурного експерименту.

Наукова новизна. Вирішення цієї задачі у подальшому можна використовувати для оцінювання пластичних властивостей матеріалів при зварюванні та зміцненні вибухом, а також при штампуванні вибухом заготовок і суміщенні операцій зварювання та штампування вибухом; при імпульсних методах штампування – магнітно-імпульсному, електрогідравлічному, газодетонаційному тощо, коли відбулося зіткнення частини заготовки з матрицею, а інша продовжує деформуватися; при штампуванні на молотах; при дробленні матеріалів ударом жорсткого тіла; дробленні вибухом багатокомпонентних середовищ і визначенні балістичної стійкості елементів бойової та спеціальної техніки.

Практичне значення. Розроблена математична модель може застосовуватися для оцінки захисту екіпажів машин і підвищення рівня тактико-технічних характеристик при розмінуванні.

Ключові слова: імпульсна обробка металів, бронезахист, транспортний засіб, мінна небезпека, захист екіпажів, математична модель.

Вступ. Проблема мінної небезпеки для населення України не є новою. Починаючи з 2014 року в результаті збройної агресії російської федерації близько 16 000 км² території окупованих Луганської та Донецької областей виявилися найбільш насиченими вибухонебезпечними предметами. В умовах нинішніх бойових дій, з початку повномасштабного військового вторгнення рф від 24 лютого 2022 року, вже очевидно, що наявність вибухових пристроїв на території України викликає значні занепокоєння тим, що їх розташування заважає безпечному пересуванню цивільних громадян, провідних технічних фахівців ремонтних бригад з відновлення електро-, водо-, та газопостачання, аграріїв та інших. Після Перемоги фахівцям доведеться ще довго вивчати кількість і карту розташування таких небезпечних «знахідок». Уже зараз зрозуміло, що йдеться про десятки й сотні тисяч смертельно небезпечних предметів, які окупанти залишають на нашій землі. Подолання наслідків вторгнення потребуватиме тривалого часу: вибухонебезпечні залишки ракет і снарядів, протипіхотні міни, закладені ворогом, уже зараз не можна ігнорувати, оскільки це призводить до значних жертв і каліцтв. Навіть звільнені території певний час не будуть придатні до нормального життя до повного знешкодження фахівцями з розмінування смертельних знахідок. За попередніми даними, на повне розмінування України піде 5–7, а може, навіть і 10 років. Ідеться про гуманітарне розмінування, яке, на відміну від оперативного та бойового, передбачає комплексний огляд усієї території, де тривали бойові дії. У гуманітарному розмінуванні територія поділяється на три категорії: сумнівна поверхня, де можуть бути міни та вибухові речовини; забруднена територія, де вже виявлені міни й вибухові речовини; очищена територія. Отже, в найближче десятиріччя в Україні буде існувати проблема очищення територій від вибухонебезпечних пристроїв та існуватиме необхідність розробки таких технічних рішень для спеціалізованого транспорту, які б

дозволили мінімізувати людські втрати від впливу вибухових речовин, артилерійських снарядів, осколків та інших наслідків військових дій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі виконана велика кількість досліджень з імпульсного деформування та руйнування матеріалів і конструкцій в широкому діапазоні зміни швидкостей деформацій імпульсних навантажень [1]. Незважаючи на це, ще не вирішені питання можливості застосування статичних показників напруженого стану, методів оцінювання граничного стану, застосовності діаграм пластичності, впливу схем навантаження тощо.

Параметр, що визначає залежність граничної пластичності від напруженого стану, на думку багатьох дослідників [2–4], уявляється у вигляді певного відношення. Як правило, знаменник це інтенсивність напружень, а чисельник – перший інваріант тензора напружень, октаедричне нормальне напруження добутку інваріантів тензорів напружень. Це відношення носить назву показника напруженого стану або показника жорсткості напруженого стану.

З огляду на те, що в показник напруженого стану входять величини, що залежать від інваріантів тензора напружень, величина інтенсивності напружень пропорційна другому інваріанту напружень. Найбільш адекватно описує схему напруженого стану показник напруженого стану, що включає третій інваріант напружень, тому в сучасних дослідженнях необхідно визначити, як зміняться інваріанти тензора напружень в умовах імпульсного навантаження. Для цього треба визначити напружений стан у точці в умовах імпульсного навантаження, головні напруження, а потім інваріанти тензора напружень з урахуванням імпульсного характеру навантаження. При такому навантаженні хвилі, що поширюються в металі, можна розглядати як систему поздовжніх і поперечних хвиль. Падіння пласкої ударної хвилі нормально до поверхні навантаження призводить до виникнення напруженого стану тривісного нерівномірного стиснення.

Вирішення цієї задачі у подальшому можна використовувати для оцінювання пластичних властивостей матеріалів при зварюванні та зміцненні вибухом, а також при штампуванні вибухом заготовок і суміщенні операцій зварювання та штампування вибухом; при імпульсних методах штампування – магнітно-імпульсному, електрогідравлічному, газодетонаційному тощо, коли відбулося зіткнення частини заготовки з матрицею, а інша продовжує деформуватися; при штампуванні на молотах; при дробленні матеріалів ударом жорсткого тіла; дробленні вибухом багатокомпонентних середовищ і визначенні балістичної стійкості елементів бойової та спеціальної техніки.

Мета досліджень. Підвищення техніко-економічних показників технологічних процесів імпульсної обробки металів і засобів їх діагностики на основі розвитку теоретичних основ формозміни під дією імпульсного впливу та розрахунку енергосилових параметрів. Запропонований у роботі математичний апарат розрахунку параметрів імпульсної ударної хвилі та її взаємодії із навантажуваною поверхнею є дієвим та ефективним також у міцнісних розрахунках балістичної стійкості елементів бронетехніки та легкого бронезахисту.

Виклад основного матеріалу. Ефективність і достовірність запропонованої методики перевірялась при оцінюванні стійкості конструкції броньованого корпусу спеціальних броньованих автомобілів КрАЗ «Shrek» і КрАЗ «Fiona» до вибухового навантаження, викликаного підривом вибухової речовини фугасної дії. На основі теоретичних та експериментальних досліджень параметрів формозміни матеріалу кузова під дією вибухового навантаження у роботі проведено з'ясування механізмів руйнування кузова для встановлення заявленої виробником відповідності протимінної стійкості автомобілів угоди зі стандартизації NATO AEP-55 STANAG 4569[5, 6].

На сьогоднішній день фактичним стандартом для броньованих транспортних засобів військового призначення є відповідність класу MRAP (Mine Resistant Ambush Protected – захищений від підриву й атак із засідок). Протимінний захист транспортних засобів цього класу забезпечується V-подібною (клиноподібною) формою нижньої частини корпусу,

підвищеною міцністю днища та застосуванням енергопоглинаючих сидінь. Цільовим призначенням бронекорпусу з V-подібним днищем є збільшення протимінної стійкості та підвищення виживання екіпажу на полі бою за рахунок відхилення в бічному напрямку фугасної дії (імпульсу тиску продуктів вибуху) при підриві під корпусом машини мін різного призначення або саморобних вибухових пристроїв (за термінологією НАТО – IED, Improvised explosive device). Таке рішення, крім перерозподілу вивільненої енергії вибуху, забезпечує збільшення дорожнього просвіту та висоти днища (підлоги бойового та десантного відділення).

Договір по стандартизації NATO AEP-55 STANAG 4569 (табл. 1) визначає необхідним для транспортних засобів класу MRAP захист екіпажу при підриві протитанкової міни фугасної дії (маса заряду – 6кг у тротиловому еквіваленті) під будь-яким з коліс або гусеницею та під центром днища.

Таблиця 1 – Вимоги NATO AEP-55 STANAG 4569 щодо захисту екіпажів логістичних і легких броньованих автомобілів

Рівень	Тип кулі	Відстань	Швидкість кулі	Гранатна та мінна загрози
I	M80 (проста) набою $7,62 \times 51$ мм	30 м	833 м/с	Ручні гранати, бойові елементи артилерійських снарядів, що не вибухнули, та протипіхотні вибухові пристрої у разі підриву під машиною
	SS 109 набою $5,56 \times 45$ мм НАТО		900 м/с	
	M193 (проста) набою $5,56 \times 45$ мм НАТО		937 м/с	
II	БЗ, бронебійно-запалювальна набою $7,62 \times 39$ мм	30 м	695 м/с	підри्व протитанкової міни фугасної дії (маса заряду 6 кг вибухової речовини): 2a — вибух міни від наїзду колесом або гусеницею; 2b — підри्व міни під днищем
III	бронебійна Bofors Carl Gustaf FFV AP M993 (сердечник WC) набою $7,62 \times 51$ мм	30 м	930 м/с	підри्व протитанкової міни фугасної дії (маса заряду 8 кг вибухової речовини): 3a — вибух міни від наїзду колесом або гусеницею; 3b — підри्व міни під днищем
IV	Б-32 набою $14,5 \times 114$ мм	200 м	911 м/с	підри्व протитанкової міни фугасної дії (маса заряду 10 кг вибухової речовини): 4a — вибух міни від наїзду колесом або гусеницею; 4b — підри्व міни під днищем
V	набою «Ерлікон-Контравес» PMB 073	500 м	1258 м/с	немає даних

Корпус зразка являє собою кузов цільного типу несучої конструкції, зібраний із 8-мм сталевих бронелистів Quardian 500 (табл. 2). Згідно з описом виробника, конструкція кузова та застосований матеріал забезпечує протимінний захист у вигляді стійкості до вибуху двох мін ТМ-57 під будь-яким колесом, що відповідає вибухам, еквівалентним 14 кг тротилу, та однієї міни ТМ-57 під днищем (7 кг тротилу). Балістичний захист екіпажу забезпечується бронею, що відповідає B6+/STANAG 4569 рівень 2. Quardian 500 застосовується у

громадській галузі (захист посольств, урядових, громадських будівель і банківських установ), галузі спеціального захисту та військовому застосуванні (бронювання гелікоптерів, човнів, машин розмінування та бронетранспортерів).

Таблиця 2 – Механічні властивості сталі Quardian 500

Твердість, Бринелль	Ударна в'язкість (надріз, -40°C (мін.)), Дж	Межа плинності, МПа	Межа міцності, МПа	Видовження A50, %
480 – 540	24	1200	1450 – 1800	8

Важливим критерієм, що визначає достовірність результатів, отриманих розрахунковим шляхом, та адекватність складеної математичної моделі реальному процесу, є відповідність отриманих розрахункових результатів даним, отриманим у результаті експериментальних випробувань.

Для експериментальних досліджень використовувалась сталеві пластина з матеріалу Quardian 500 товщиною 8 мм та розміром 500х500 мм (рис. 1).

Пластина розташовувалась у піщаному ґрунті (рис. 2) та піддавалась динамічному вибуховому навантаженню за допомогою детонації суміші амоніту 6ЖВ і нітрату амонію. Тротильовий еквівалент суміші складав 0,99, маса суміші – 10кг.



Рисунок 1 – Пластина зі сталі Quardian 500

Система тестування пластини матеріалу Quardian 500 за допомогою динамічного вибухового навантаження у повному зборі показана на рисунку 4. При проведенні експерименту реєструвалися значення динамічних переміщень деформованої пластини (рис. 5). Для цього дослідна пластина розбивалася на шістнадцять рівних сегментів з розміром сторони 125 мм. Лінії перетину сторін сегментів утворювали собою вузлові точки, у яких вимірювались прогини досліджуваної пластини (рис. 6). Прогини груп точок 1–3, 4–6, 7–9 вимірювались відносно ліній А–В, С–D та Е–F відповідно.

Числове моделювання вибухового навантаження пластини зі сталі Quardian 500 виконувалося у системі Ansys AUTODYN із застосуванням опису властивостей матеріалу, що зазнає імпульсного впливу, й ітераційної процедури. У розрахункову систему входили атмосферне повітря, заряд вибухової речовини (9,9 кг тринітротолуолу), пластина-ударник, досліджувана пластина та ґрунт. Отримана розрахункова система показана на рисунку 7.



Рисунок 2 – Пластина матеріалу Guardian 500, заглиблена у піщаний ґрунт

Для кращої передачі динамічного вибухового навантаження на пластину зі сталі Guardian 500 і можливості більш чіткої реєстрації прогинів дослідного матеріалу в системі застосовувалась пластина-ударник зі сталі 110Г13Л (сталь Гадфільда) розміром 125х375 мм та товщиною 5 мм (рис. 3). Пластина-ударник розташовувалася на дослідній пластині під зарядом вибухової речовини.



Рисунок 3 – Пластина-ударник зі сталі 110Г13Л після вибуху

Ураховуючи безпрецедентну здатність сталі Гадфільда до зміцнення шляхом наклепу при пластичній деформації, пластина-ударник при розрахунку задавалася як абсолютно тверде тіло. Таким чином, при моделюванні детонації вибухової речовини енергія розширення вибухової хвилі витрачалась на роботу пружно-пластичної деформації дослідної пластини без витрат на деформацію пластини-ударника.

Розташування вузлових точок контролю прогинів досліджуваної пластини задавалося шляхом створення нових систем координат, розташованих послідовно зі зміщенням на 125 мм відносно вихідної системи координат, яка знаходилася у лівому нижньому куті верхньої площини досліджуваної пластини. В отриманих системах координат задавалися п'ятнадцять точок проб (рис. 8), у яких вимірювалися осьові переміщення пластини внаслідок деформації під дією вибухового навантаження.



Рисунок 4 – Пластина матеріалу Guardian 500 зі встановленим зарядом вибухової речовини та детонатором



Рисунок 5 – Дослідна пластина, деформована після вибухового навантаження



Рисунок 6 – Розташування вузлових точок контролю прогинів досліджуваної пластини

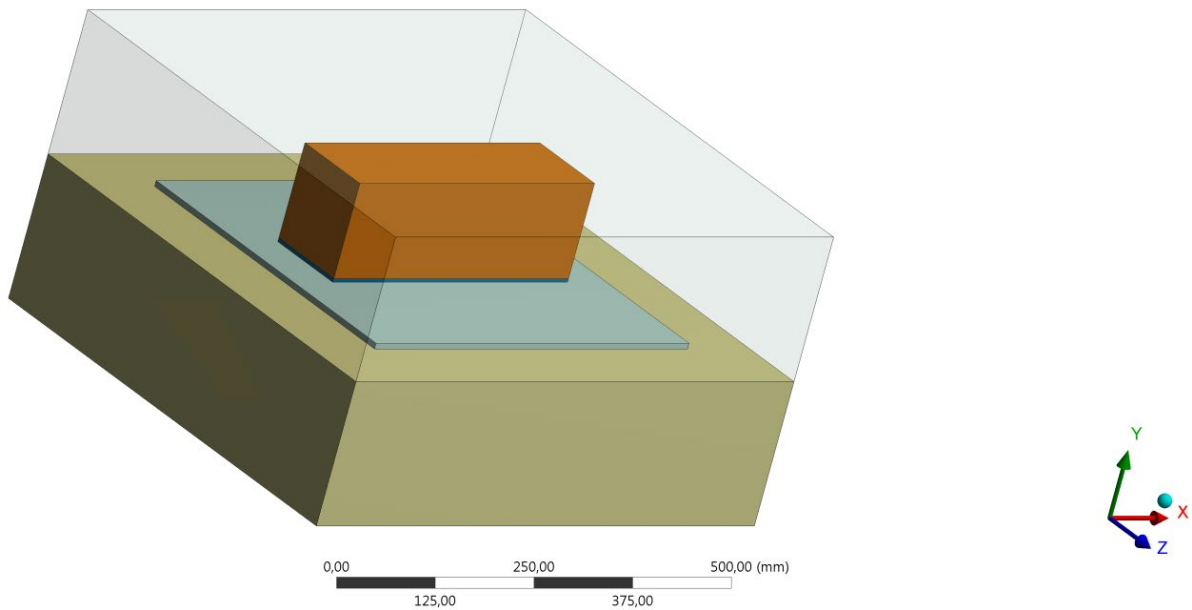


Рисунок 7 – Розрахункова модель вибухового навантаження пластини зі сталі Quardian 500

У крайових точках проб А–F переміщення пластини вимірювалися відносно вихідної системи координат, тоді як у груп точок 1–3, 4–6, 7–9 переміщення вимірювались відносно утворених ліній А–В, С–D та Е–F відповідно.

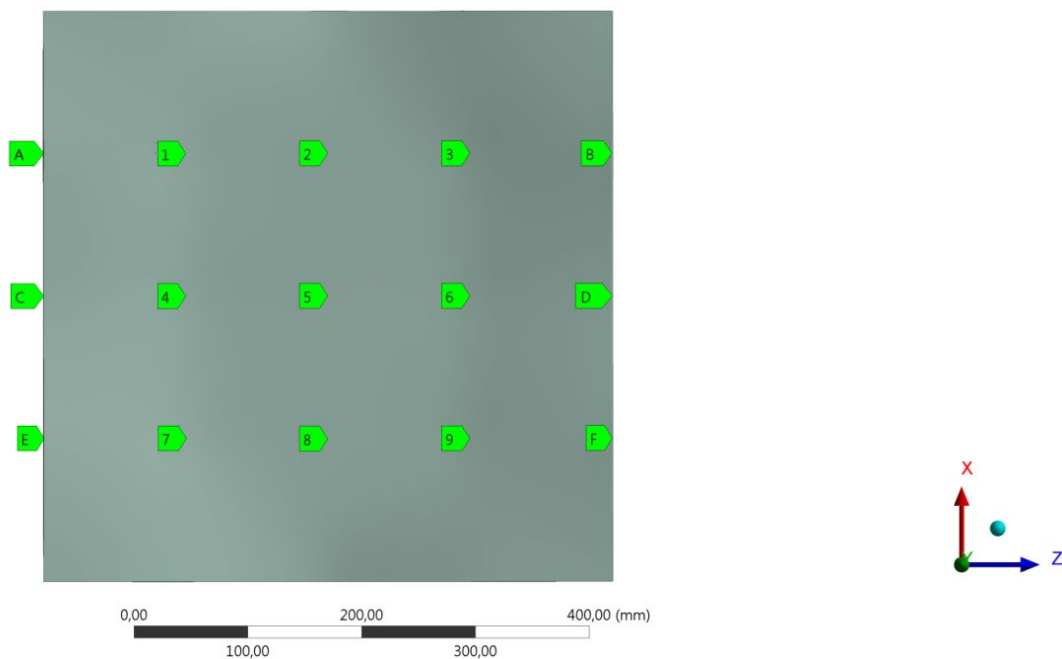


Рисунок 8 – Розташування точок проб на поверхні досліджуваної пластини

Загальна картина деформацій системи та деформації досліджуваної пластини у вертикальному напрямку (вісь Y) представлені на рисунку 9. Вектори напрямку й інтенсивності деформацій досліджуваної пластини наведені на рисунку 10.

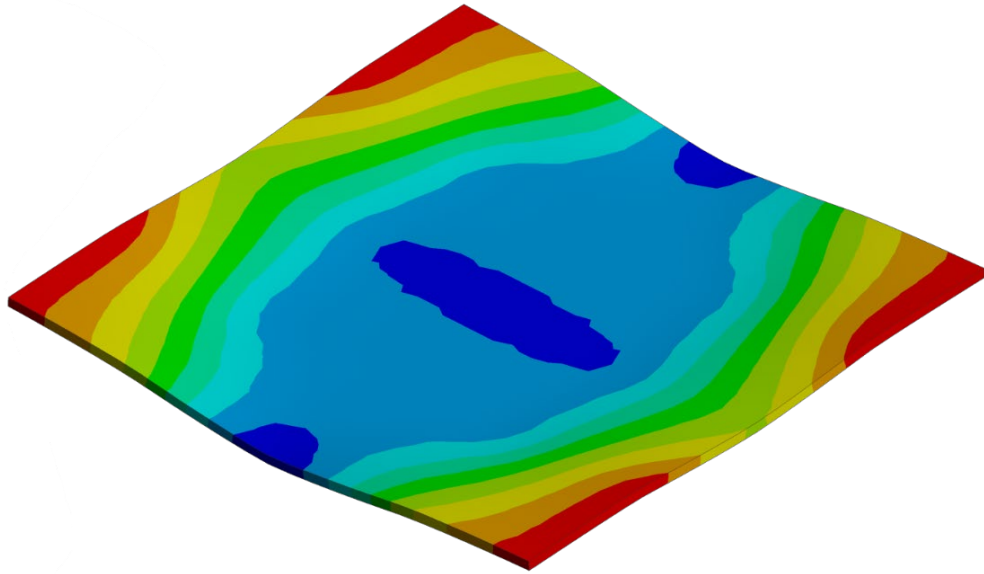


Рисунок 9 – Епюра деформацій досліджуваної пластини вздовж осі Y

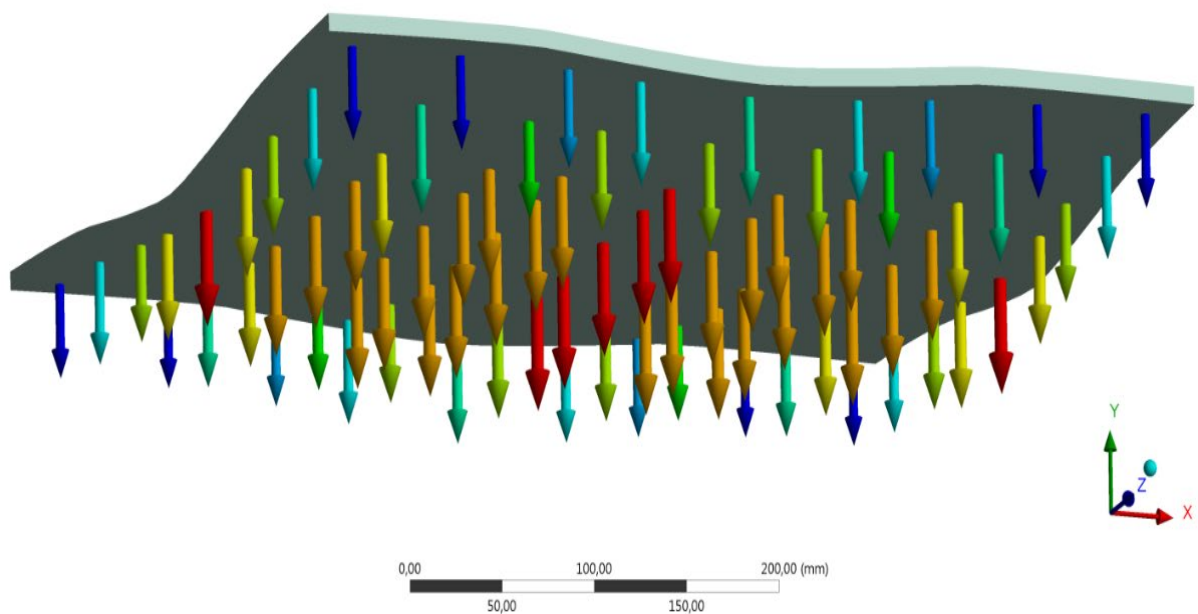


Рисунок 10 – Вектори напрямку й інтенсивності деформацій пластини

Отримані величини переміщень вузлових і крайових точок наведені у таблиці 3. Величини переміщень контрольних точок і динаміка їх зміни, отримані шляхом числового моделювання вибухового навантаження пластини наведені у таблиці 4 та на рисунку 11. У таблиці 5 наведені значення різниць прогинів у контрольних точках, отриманих натурним і числовим експериментом, а також відносна похибка отриманих значень.

Графіки на рисунку 12 ілюструють розташування значень прогинів, отриманих шляхом натурного та числового експериментів.

Таблиця 3 – Величини прогинів (мм) досліджуваної пластини у контрольних точках

Точка	Вимірювальна база			
	лінія А – В	лінія С – D	лінія Е – F	точка 5
1	12,67			
2	27,1			
3	10,19			
4		15,07		
5		34,19		
6		12,36		
7			15,25	
8			36,25	
9			13,63	
A				38,73
B				35,24
C				35,12
D				32,69
E				44,85
F				40,19

Таблиця 4 – Величини прогинів (мм) досліджуваної пластини у контрольних точках, отримані шляхом числового моделювання

Точка	Вимірювальна база			
	лінія А – В	лінія С – D	лінія Е – F	точка 5
1	12,93668			
2	31,67452			
3	12,93653			
4		13,71599		
5		33,62412		
6		13,71583		
7			12,93668	
8			31,67416	
9			12,93668	
A				39,42527
B				39,42512
C				33,62412
D				33,62396
E				39,42491
F				39,42491

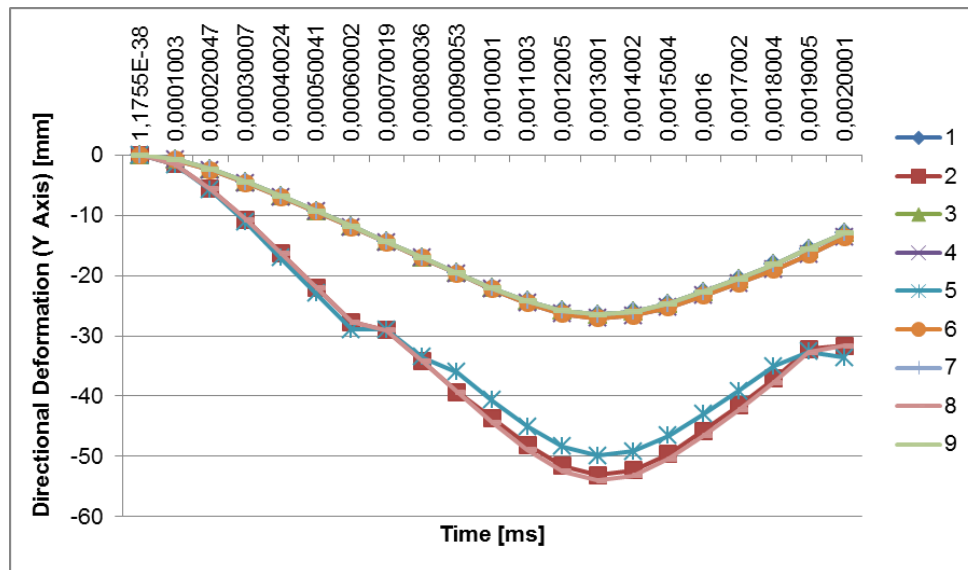


Рисунок 11 – Динаміка зміни величин переміщень вузлових точок досліджуваної пластини, отримана в AUTODYN

Таблиця 5 – Різниця прогинів і їх відносна похибка у контрольних точках

Точка	Різниця прогину, мм	Δ , %
1	2	3
A	-0,69527	1,79
1	-0,26668	2,10
2	-4,57452	16,88
3	-2,74653	26,95
B	-4,18512	11,88
C	1,49588	4,26
4	1,35401	8,98
5	0,56588	1,66
6	-1,35583	10,97
D	-0,93396	2,86
1	2	3
E	5,42509	12,10
7	2,31332	15,17
8	4,57584	12,62
9	0,69332	5,09
F	0,76509	1,9

Як видно з наведених графіків, криві прогинів на лініях А–В і Е–F, отримані для натурального експерименту, однаково нахилені вправо відносно кривих, отриманих для числового експерименту.

При цьому найбільша різниця на лінії А–В досягається для точок, наближених до точки В, включаючи саму точку В, на лінії Е–F найбільша різниця досягається для точок, наближених до точки Е з точкою Е включно. При цьому на середній лінії С–D спостерігається близькість розташування величин прогинів у контрольних точках.

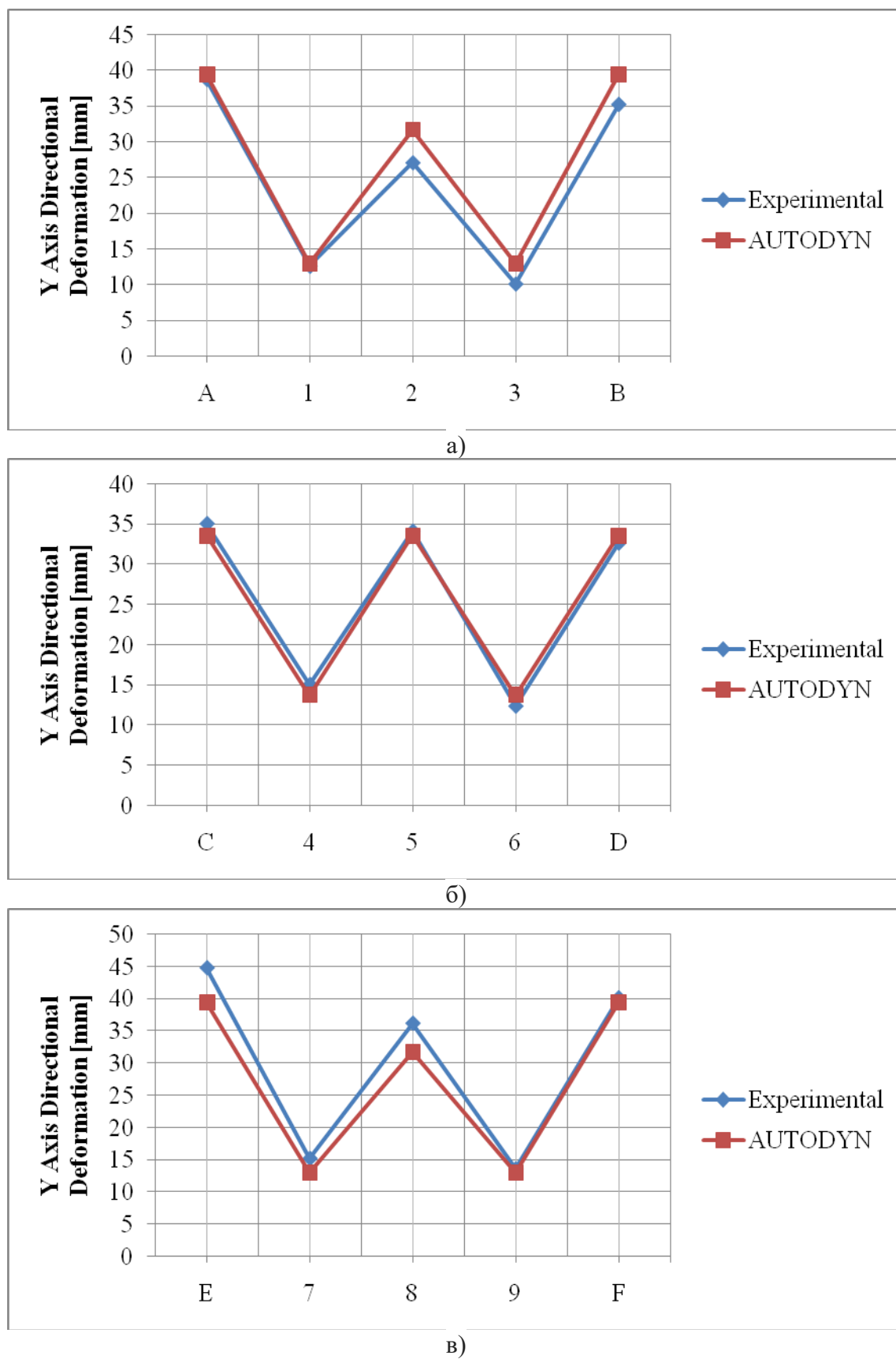


Рисунок 12 – Величини прогинів у контрольних точках для натурального та числового експерименту: а – на лінії А–В; б – на лінії С–D; в – на лінії Е–F

Висновки. Таким чином, розроблена математична модель для числового рішення імпульсного вибухового навантаження дозволяє з високою точністю моделювати процес вибухового навантаження дослідної пластини та може застосовуватися для оцінки захисту екіпажів машин і підвищення рівня тактико-технічних характеристик при розмінуванні.

Список літератури

1. Shlyk S., Drahobetskyi V., Trotsko O., Chenchewa O., Klets D. The Explosive Expansion of Electrical Equipment Housings with Variable Curvature. 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice(PAEP). 2020. pp. 1-5. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240822
2. Yang Cao, Song Ni, Xiaozhou Liao, Min Song, Yuntian Zhu. Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation. Materials Science and Engineering: R: Reports. 2018. pp. 1-59. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.06.001>
3. Bagherpour E., Pardis N., Reihanian M. et al. An overview on severe plastic deformation: research status, techniques classification, microstructure evolution, and applications. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 100. pp. 1647-1694. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2652-z>
4. Segal V. Review: Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD). Materials. 2018. 11(7):1175. <https://doi.org/10.3390/ma11071175>
5. Королько С. В. Аналіз і оцінка можливостей застосування сучасних матеріалів для броньованої техніки та захисту особового складу від ураження. *Системи озброєння і військова техніка*. 2015. № 2. С. 163-167.
6. Подригало М. А., Баулін Д. С., Горелишев С. А., Манжура С. А., Ільченко М. І., Одейчук М. П., Іванець Г. В., Віштак І. В. Аналіз додаткового бронезахисту легкоброньованої техніки Збройних Сил України та іноземних держав. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вип. 14(2). С. 89-96. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-89-96>

References

1. Shlyk S., Drahobetskyi V., Trotsko O., Chenchewa O., Klets D. The Explosive Expansion of Electrical Equipment Housings with Variable Curvature. 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice(PAEP). 2020. pp. 1-5. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240822
2. Yang Cao, Song Ni, Xiaozhou Liao, Min Song, Yuntian Zhu. Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation. Materials Science and Engineering: R: Reports. 2018. pp. 1-59. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.06.001>
3. Bagherpour E., Pardis N., Reihanian M. et al. An overview on severe plastic deformation: research status, techniques classification, microstructure evolution, and applications. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 100. pp. 1647-1694. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2652-z>
4. Segal V. Review: Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD). Materials. 2018. 11(7):1175. <https://doi.org/10.3390/ma11071175>
5. Korolko S. V. Stitutionalism opportunities and evaluation of modern materials and equipment for protection armored personnel from injuries. Systems of Arms and Military Equipment. 2015. No. 2. pp. 163-167.
6. Podrigalo M., Baulin D., Horielyshev S., Manzhura S., Ilchenko M., Odeychuk M., Ivanets H., Vishtak, I. Analysis of additional armor protection for lightly armored vehicles of the armed forces of Ukraine and foreign states. Journal of Mechanical Engineering and Transport. Vol. 14(2). pp. 89-96. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-89-96>

Надійшла до редакції 25.10.2022

Ye. Lashko, O. Chenchewa, S. Sukach, S. Shlyk

APPLICATION OF THE TECHNOLOGY OF IMPULSE PROCESSING OF METALS FOR ARMOR PROTECTION OF SPECIALIZED VEHICLES

Purpose. Increasing the technical and economic indicators of the technology of impulse processing of metals and means of their diagnostics based on the development of the theoretical foundations of shape change under the impulse impact and the calculation of power parameters.

Methodology. Numerical simulation of explosive loading of a plate made of Quardian 500 steel was performed in the Ansys AUTODYN system using a description of the properties of the material subjected to impulse impact and an iterative procedure. The calculation system included atmospheric air, an explosive charge (9.9 kg of trinitrotoluene), a striker plate, a test plate and soil.

Results. An experimental study of the dynamic explosive load of Quardian 500 steel has been carried out and the results have been compared with the analytical calculations obtained in the Ansys AUTODYN system using the

developed iterative procedure. Adequacy of the developed mathematical model of the numerical study of the explosive load to the results of the natural experiment has been determined.

Scientific novelty. The solution of this problem can be used in the future to evaluate the plastic properties of materials during welding and explosion hardening, as well as during explosion stamping of blanks and the combination of welding and explosion stamping operations; with impulse stamping methods - magnetic-pulse, electro-hydraulic, gas detonation, etc., when part of the workpiece collides with the matrix, and the other part continues to deform; when stamping on hammers; when crushing materials by the impact of a rigid body; explosion fragmentation of multicomponent environments and determination of ballistic resistance of elements of combat and special equipment.

Scientific significance. The developed mathematical model can be used to evaluate the protection of machine crews and increase the level of tactical and technical characteristics during demining.

Keywords: impulse processing of metals, armor protection, vehicle, mine danger, crew protection, mathematical model.

Відомості про авторів

Лашко Євгеній Євгенович, кандидат технічних наук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; evgeny.lashko.lj@gmail.com.

Ченчева Ольга Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; chenchevaolga@gmail.com.

Сукач Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; sergvs69@ukr.net.

Шлик Сергій Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; svshlyk@gmail.com.

Герашенко Сергій Миколайович, Кременчуцьке районне управління ГУ ДСНС України в Полтавській області; sngerashenko@gmail.com

Дяченко Владислав Володимирович, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти зі спеціальності 263 «Цивільна безпека», Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; inspektorvlad23@gmail.com

Lashko Ye. Ye., Candidate of Technical Sciences, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University; evgeny.lashko.lj@gmail.com.

Chencheva O. O., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University; chenchevaolga@gmail.com.

Sukach S. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University; sergvs69@ukr.net.

Shlyk S. V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University; svshlyk@gmail.com.

Gerashchenko S. M., Kremenchuk District Administration of the State Emergency Service of Ukraine in Poltava region; sngerashenko@gmail.com

Diachenko V. V., second (masters) level of higher education in specialty 263 Civil Security, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University; inspektorvlad23@gmail.com

УДК[622.411.33:533.17]:622.817.47

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-86-93](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-86-93)

С.П. Мінєєв, Л.А. Новіков, М.А.Лютий, Р.В. Макаренко

ВПЛИВ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ДЕГАЗАЦІЙНОГО ГАЗОПРОВОДУ НА ПРИПЛИВИ ПОВІТРЯ І КОНЦЕНТРАЦІЮ МЕТАНУ

Мета. Метою даної роботи є дослідження закономірностей зміни припливів повітря і концентрації метану у вакуумному дегазаційному газопроводі.

Методика. При проведенні досліджень використовувалися аналітичні залежності для визначення абсолютного тиску, об'ємної витрати і температури газової суміші у ланці дегазаційного газопроводу, емпірична залежність для визначення об'ємної витрати повітря в припливах, що надходять через фланцеві з'єднання ланок газопроводу.

Результати. З урахуванням прийнятих припущень отримано формулу для визначення величини зазору у фланцевому з'єднанні ланок дегазаційного газопроводу. Наведено результати розрахунку припливів повітря і концентрації метану по довжині горизонтальної ділянки газопроводу. Аналіз отриманих результатів показав, що припливи повітря через фланцеві з'єднання ланок дегазаційного газопроводу зростають у напрямку руху газової суміші, а концентрація метану, навпаки, зніжується. При цьому збільшення припливів повітря обумовлено зростанням розрядження у дегазаційному газопроводі, а зниження концентрації метану пояснюється збільшенням об'ємної витрати газової суміші. На основі аналізу характеру зміни концентрації метану по довжині горизонтальної ділянки дегазаційного газопроводу визначено відстань від початку газопроводу, де величина концентрації метану стає нижче допустимого значення і виникає ймовірність займання газової суміші. Встановлено, що при нормативних припливах повітря концентрація метану по довжині газопроводу змінюється незначно.

Наукова новизна. Отримано формулу для визначення величини зазору між плоскою гумовою прокладкою та буртом фланцевого з'єднання ланок дегазаційного газопроводу, при якій сумарні припливи повітря у газопроводі збігаються з нормативним значенням.

Практичне значення. Визначення величини зазору у фланцевому з'єднанні ланок дегазаційного газопроводу дозволяє на базі результатів вимірювань об'ємної витрати газової суміші, концентрації метану і величини розрядження розрахувати припливи повітря та оцінити герметичність фланцевих з'єднань газопроводу.

Ключові слова: дегазаційний газопровід, фланцеві з'єднання, зазор, припливи повітря, концентрація метану.

Вступ. Метан вугільних родовищ є екологічно чистим енергоносієм, що дозволяє заповнити дефіцит традиційних енергоресурсів [1, 2]. При цьому розробка метанонасичених вугільних пластів може супроводжуватися раптовими викидами та займанням шахтного метану, що призводить до виникнення пожеж та нещасних випадків [2, 3, 4]. Крім того, аварійні ситуації виникають при порушенні роботи систем дегазації та вентиляції [2, 5, 6].

Основними завданнями шахтної дегазаційної системи є забезпечення безпечної концентрації метану в гірничих виробках і збереження якості газової суміші при її транспортуванні. При експлуатації дегазаційної мережі виникають проблеми, пов'язані зі зниженням концентрації метану в дегазаційних газопроводах у наслідок припливів повітря [6, 7] та зниженням дебіту метану, що надходить з дегазаційних свердловин. Порушення цілісності дегазаційних газопроводів викликано усуненнями гірських порід, техногенними впливами та процесами корозії. Вплив зазначених факторів призводить до пошкодження стінок газопроводів і порушення герметичності їх фланцевих з'єднань. В результаті відбувається збільшення об'ємної витрати газової суміші, зниження концентрації метану і зменшення розрядження у гирлах віддалених дегазаційних свердловин, що змушує підключати додаткові вакуум-насоси. Однак це призводить до зворотного ефекту, оскільки відбувається збільшення припливів повітря і гідравлічного опору дегазаційної мережі. При зниженні концентрації метану нижче 25% виникають умови для займання та вибухів газової суміші [6, 8].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі [9] розглянуто багатофакторну модель витоків газу в газопроводах. Модель дозволяє аналізувати характеристики витоків газу, а також припливів повітря у вакуумних газопроводах. Результати моделювання показали, що несприятливим варіантом, при якому виникають аварійні ситуації, є виникнення витоків газу з газопроводу вище за течією над датчиком газу. У роботі [10] представлений метод розрахунку параметрів шахтних дегазаційних систем з урахуванням топологічних особливостей дегазаційної мережі, числа та розташування дегазаційних свердловин, визначено оптимальні параметри дегазаційних систем. У роботах [7, 11, 12] розглянуті полімерні дегазаційні газопроводи. Використання цих газопроводів дозволяє уникнути процесів корозії та знизити втрати абсолютного тиску газової суміші на тертя. Однак при експлуатації цих газопроводів також існує проблема герметичності фланцевих з'єднань. Полімерні газопроводи мають меншу жорсткість у порівнянні зі сталевими трубами. Тому на їх герметичність більшою мірою впливає зміщення гірських порід. Крім того існує ймовірність виникнення електростатичних розрядів [9].

В даний час немає повної інформації про аналітичне визначення величини проміжку між гумовою прокладкою і буртом фланцевого з'єднання ланок дегазаційного газопроводу. У зв'язку з цим використовуються емпіричні залежності.

Мета роботи. Дослідження закономірностей зміни припливів повітря і концентрації метану у вакуумному дегазаційному газопроводі.

Методи дослідження. При проведенні досліджень використовувалися аналітичні залежності для визначення газодинамічних параметрів газової суміші в дегазаційному газопроводі з негативним тиском, емпірична залежність для визначення величини припливів повітря в газопровід через фланцеві з'єднання його ланок.

Виклад основного матеріалу. Дегазаційні газопроводи (дільничні та магістральні) прокладають у гірничих виробках та встановлюють на опорах або підвісах. Газопроводи складаються з ланок, які з'єднуються за допомогою зварювання чи фланців. Сумарна довжина ділянок дегазаційної мережі в середньому досягає 15-20 км. У зв'язку з цим припливи повітря можуть призводити до значного збільшення гідравлічного опору дегазаційної мережі [2, 5, 6].

Розглянемо рух газової суміші на горизонтальній ділянці дегазаційного газопроводу з припливами повітря (рис. 1)

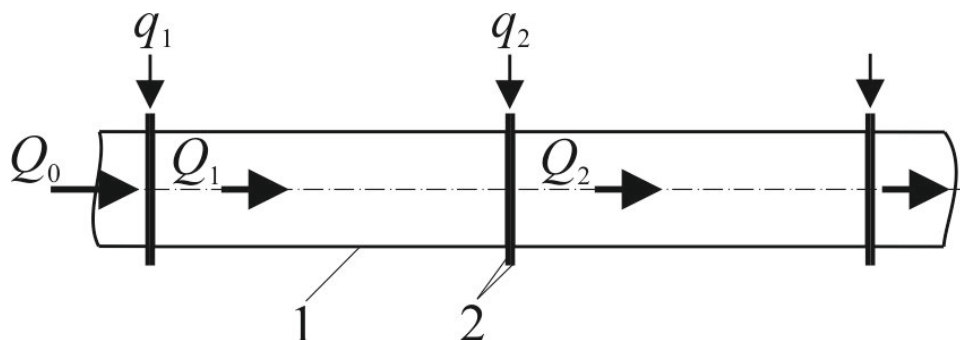


Рисунок 1 – Рух газової суміші в дегазаційному газопроводі з припливами повітря: 1–ланка газопроводу; 2 – фланцеве з'єднання ланок; q_1, q_2 – припливи повітря відповідно на початку і наприкінці ланки, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_1, Q_2 – об'ємні витрати газової суміші відповідно на початку і наприкінці ланки, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_0 – об'ємна витрата газової суміші перед її змішуванням з припливами повітря на початку ланки, $\text{м}^3/\text{с}$.

Абсолютний тиск газової суміші наприкінці ланки дегазаційного газопроводу (рис. 1) визначається за формулою [13]

$$p_2 = \sqrt{p_1^2 - p_1 \rho_1 Q_1^2 S^{-2} 0,11 [\Delta(d - 2s)^{-1} + 68 Re_1^{-1}]^{0,25} l \cdot d^{-1}},$$

де $S = 0,25\pi d^2$ – площа прохідного перерізу газопроводу, m^2 ;

d, l, s – зовнішній діаметр газопроводу, довжина його ланки і товщина стінки, відповідно, m ;

Δ – абсолютна еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні газопроводу, m ;

p_1 – абсолютний тиск газової суміші на початку ланки, $kg/(m \cdot s^2)$;

ρ_1 – щільність газової суміші на початку ланки, kg/m^3 ;

Re_1 – число Рейнольдса на початку ланки.

Щільність газової суміші у дегазаційному газопроводі визначається за формулою

$$\rho = \rho_v + (\rho_m - \rho_v) c \cdot 100^{-1},$$

де ρ_v – щільність повітря, kg/m^3 ;

ρ_m – щільність метану, kg/m^3 ;

c – концентрація метану, %.

При розрахунку параметрів газової суміші значення витрат у дегазаційному газопроводі наводяться до нормальних умов:

$$Q_1 = (Q_0 + q_1) p_1 T_0 (p_0 T_1)^{-1};$$

$$Q_2 = (Q_0 + q_1 + q_2) p_2 T_0 (p_0 T_2)^{-1},$$

де T_1, T_2 – температури газової суміші відповідно на початку і наприкінці ланки, K ;

T_0 – температура газу при нормальних умовах, K ;

p_0 – тиск газу при нормальних умовах, $kg/(m \cdot s^2)$.

Концентрації метану в газовій суміші наприкінці ланки газопроводу:

$$c_2 = c_1 Q_1 Q_2^{-1},$$

де c_1 – концентрація метану на початку ланки, %.

Температуру газової суміші визначимо за формулою [14]

$$T_2 = T_a + (T_1 - T_a) e^{-\frac{\bar{\alpha} \pi d}{\rho_1 Q_1 C} l},$$

де T_a – температура повітря в гірничій виробці, K ;

$\bar{\alpha}$ – середній коефіцієнт теплопередачі від газової суміші до навколишнього середовища, $W/(m^2 \cdot K)$;

C – питома теплоємність газової суміші, $W \cdot s/(kg \cdot K)$.

Нормативна величина сумарних припливів повітря в дегазаційний газопровід визначається за формулою [6]

$$q_c = kx, \quad (1)$$

де $k = 10^{-3} 60^{-1} m^3/(s \cdot m)$ – коефіцієнт, що враховує норму припливів повітря на 1 м газопроводу;

x – відстань уздовж осі газопроводу в напрямку руху газової суміші, м.

Формула (1) не враховує вплив розрядження у газопроводі та величини зазору у фланцевих з'єднаннях ланок газопроводу на припливи повітря. У зв'язку з цим скористаємося емпіричною формулою [15]

$$q = \frac{\pi h^3 (p_a - p)}{2v_a \rho_a \ln(D_3 D_{\text{вн}}^{-1})}, \quad (2)$$

де h – величина зазору між плоскою гумовою прокладкою та буртом фланцевого з'єднання, м;

$D_3, D_{\text{вн}}$ – діаметри гумової прокладки відповідно зовнішній і внутрішній, м;

p – абсолютний тиск газової суміші в дегазаційному газопроводі, кг/(м·с²);

v_a – кінематична в'язкість повітря в гірничій виробці, м²/с;

p_a – тиск повітря в гірничій виробці, кг/(м·с²);

ρ_a – щільність повітря в гірничій виробці, кг/м³.

Отримані значення параметрів газової суміші в кінці першої ланки газопроводу використовуються як вихідні дані для розрахунку другої ланки. Таким чином здійснюється послідовний розрахунок усіх ланок дегазаційного газопроводу.

Введемо припущення: значення параметрів $h, D_3, D_{\text{вн}}$ однакові для всіх фланцевих з'єднань. У цьому випадку умова, за якої сумарні припливи повітря через фланцеві з'єднання ланок дегазаційного газопроводу рівні своїм нормативним значенням має вигляд

$$kL = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{\pi h^3 (p_a - p_i)}{2v_a \rho_a \ln(D_3 D_{\text{вн}}^{-1})}, \quad (3)$$

де $n = L \cdot l^{-1}$ – число ланок газопроводу;

p_i – тиск газової суміші у місці припливів повітря через фланцеве з'єднання, кг/(м·с²).

З умови (3) отримаємо формулу для визначення величини зазору при якій сумарні припливи повітря через фланцеві з'єднання ланок дегазаційного газопроводу рівні своїм нормативним значенням

$$h = \sqrt[3]{\frac{2kL v_a \rho_a \ln(D_3 D_{\text{вн}}^{-1})}{\pi \sum_{i=1}^{n+1} (p_a - p_i)}}. \quad (4)$$

На рис. 2 представлені результати розрахунку припливів повітря і концентрації метану у дегазаційному газопроводі діаметром $d = 0,325$ м і довжиною $L = 800$ м (довжина ланок $l = 4$ м)

Аналіз рис. 2,а показує, що припливи повітря, які отримані за формулою (1), не змінюються і дорівнюють припливам для ланки газопроводу. Це пояснюється тим, що за формулою (1) визначаються лише сумарні нормативні припливи повітря. При використанні формули (2) припливи повітря прямо пропорційні величині зазору h і збільшуються у напрямку руху газової суміші (рис. 2,а). Останнє викликано зниженням абсолютного тиску в газопроводі у результаті втрат на тертя і відповідно зростанням величини розрядження.

Аналіз рис. 2,б показує, що припливи повітря призводять до збільшення об'ємної витрати газової суміші в дегазаційному газопроводі, а отже і до зниження концентрації метану. При нормативних припливах повітря, які отримані за формулою (1), зниження

концентрації метану по довжині газопроводу буде незначним. При визначенні припливів повітря за формулою (2) концентрація метану зворотно пропорційна величині зазору h (рис. 2, б). При $h = 0,0008$ м концентрація метану стає менше 25% на відстані $x > 736$ м від початку газопроводу (рис. 2, б), тобто виникають умови для займання газової суміші.

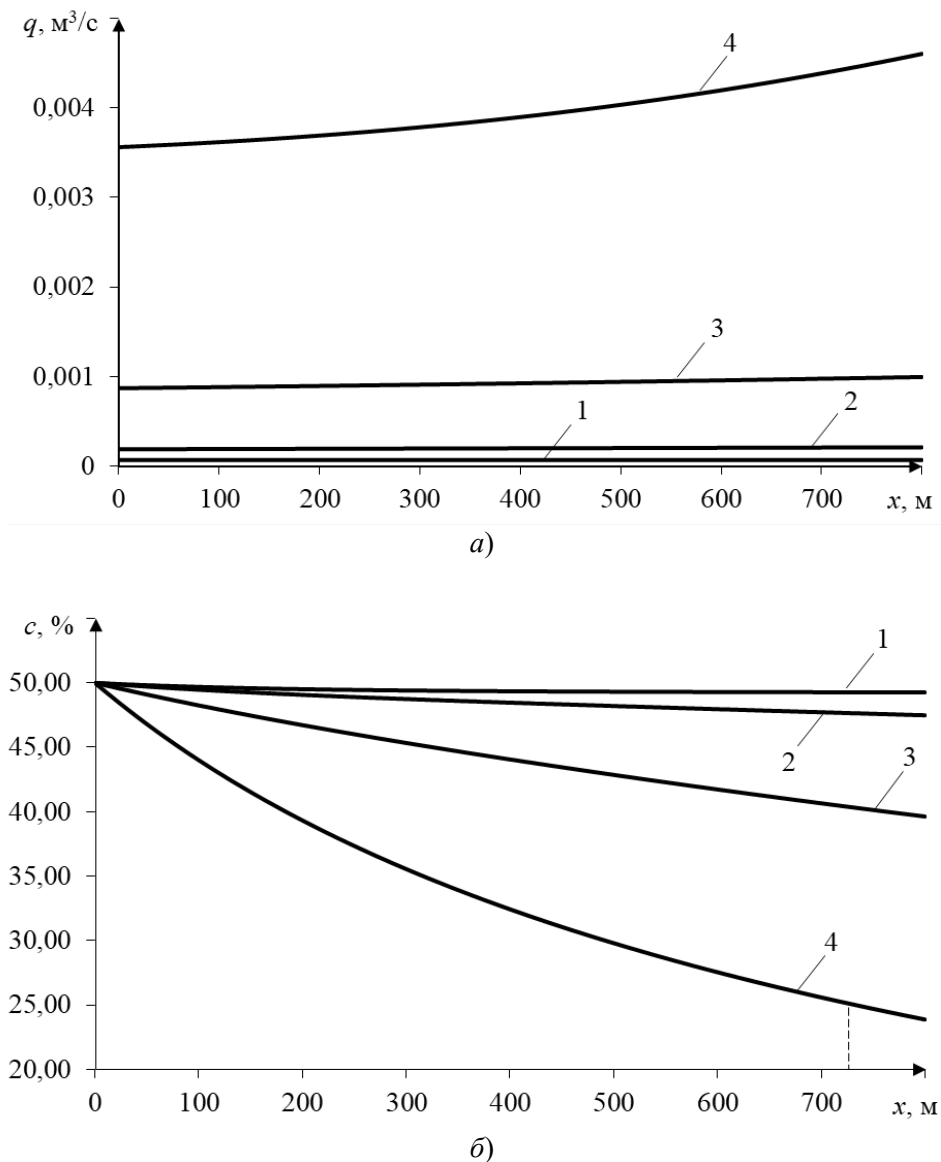


Рисунок 2 – Зміна припливів повітря (а) та концентрації метану (б) по довжині дегазаційного газопроводу при різній величині зазору у фланцевому з'єднанні: 1 – нормативні припливи; 2 – $h = 3 \cdot 10^{-5}$ м; 3 – $h = 5 \cdot 10^{-5}$ м; 4 – $h = 8 \cdot 10^{-5}$ м

Висновки. Припливи повітря в дегазаційному газопроводі прямо пропорційні величині зазору у фланцевих з'єднаннях його ланок і знижуються у напрямку руху газової суміші. При цьому втрати абсолютного тиску в газопроводі призводять до збільшення величини розрядження, припливів повітря та об'ємних витрат газової суміші. Концентрація метану в дегазаційному газопроводі зворотно пропорційна об'ємній витраті газової суміші та величині зазору у фланцевих з'єднаннях. При величині зазору 0,0008 м концентрація метану стає менше 25% на відстані $x > 736$ м від початку газопроводу. Отримано формулу для визначення величини зазору між плоскою

гумовою прокладкою та буртом фланцевого з'єднання, при якій сумарні припливи повітря у дегазаційному газопроводі збігаються з нормативним значенням.

Список літератури

1. Zhou A., Zhang M., Wang K., Zhang X., Feng T. Quantitative study on gas dynamic characteristics of two-phase gas-solid flow in coal and gas outbursts. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020. Vol. 139. pp. 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.037>.
2. Булат А.Ф., Минеев С.П., Смоланов С.Н., Беликов И.Б. Пожары в горных выработках. Изоляция аварийных участков. Харьков: В деле, 2021. 709 с.
3. Zheng C., Jiang B., Xue S., Chen Z., Li H. Coalbed methane emissions and drainage methods in underground mining for mining safety and environmental benefits: A review. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019. Vol. 127. pp. 103–124. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.010>.
4. Qu Q., Guo H., Balusu R. Methane emissions and dynamics from adjacent coal seams in a high permeability multi-seam mining environment. *International Journal of Coal Geology*. 2022. Vol. 253. p. 103969. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.103969>.
5. Абрамов Ф.А., Фельдман Л.П., Святный В.А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии. Киев: Наукова думка, 1981. 284 с.
6. СОУ 10.1.00174088.001-2004. Дегазация вугільних шахт. Вимоги до способів та схем дегазації. [Чинний від 2004-11-17]. Вид. офіц. Київ: Мінпаливенерго України, 2004. 126 с.
7. Yegorchenko R. R., Mukha O. A., Shirin L. T. The methods to calculate expediency of composite degassing pipelines. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022. №. 4. pp. 23–27. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-4/023>.
8. Минеев С.П. Прогноз и предотвращение выбросов угля и газа на шахтах Украины. Мариуполь: Східний видавничий дім, 2016. 254 с.
9. Cai J., Wu J., Yuan S., Liu Z., Kong D. Numerical analysis of multi-factors effects on the leakage and gas diffusion of gas drainage pipeline in underground coal mines. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 151. pp. 166–181. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.05.017>.
10. Муха О. А., Пугач И. И. Расчёт параметров дегазационных систем. Днепропетровск: НГУ, 2009. 183 с.
11. Shirin L. N., Bartashevsky S. E., Denyshchenko O. V., Yegorchenko R. R. Improving the capacity of mine degassing pipelines. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. №. 6. pp. 166–181. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-6/072>.
12. Doroshenko Ya. V., Kucheriavy V. A., Andriishyn N. M., Stetsiuk, S. M., Levkovych, Yu. M. The current methods to construct industrial gas-and-oil pipelines. *Exploration and development of oil and gas fields*. 2019. Vol.3. № 72. pp. 19–31. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-3\(72\)-19-31](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-3(72)-19-31).
13. Novikov L., Bokii O. Calculation of degassing networks taking into account the accumulation of the liquid phase. *Essays of Mining Science and Practice: Materials of International Conference, Dnipro, 25-27 June. 2019. Dnipro, 2019. Vol. 109. pp. 1–7. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900063*.
14. Khujaev I., Atamirzaev M., Khujaeva S. Formulas for calculating temperature and pressure in a relief main gas pipeline. *ISJ Theoretical & Applied Science*. 2019. Vol. 78, № 10. pp. 41–45. <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2019.10.78.6>.
15. Лаврик В.Г., Кирик В.В., Малашкина В.А., Заславчик В.С. Расчет негерметичного газопровода шахтной дегазационной установки с помощью ЭВМ. *Разработка месторождений полезных ископаемых*. Киев: Техника, 1987. № 58. С. 75–77.

References

1. Zhou, A., Zhang, M., Wang, K., Zhang, X., & Feng, T. (2020). Quantitative study on gas dynamic characteristics of two-phase gas-solid flow in coal and gas outbursts. *Process Safety and Environmental Protection*, (139), 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.037>.
2. Bulat, A. F., Mineev, S. P., Smolanov, S. N., & Belikov, I. B. (2021). Pozhary v gornyh vyrabotkakh. Izoljacija avarijnyh uchastkov [Fires in mine workings. Isolation of emergency sections]. Harkov: V dele, Ukraine.
3. Zheng, C., Jiang, B., Xue, S., Chen, Z., & Li, H. (2019). Coal bed methane emissions and drainage methods in underground mining for mining safety and environmental benefits: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, (127), 103–124. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.010>.
4. Qu, Q., Guo, H., & Balusu, R. (2022). Methane emissions and dynamics from adjacent coal seams in a high permeability multi-seam mining environment. *International Journal of Coal Geology*, 253, 103969. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.103969>.

5. Abramov, F. A., Feldman, L. P., & Sviatnyi, V. A. (1981). Modelirovanie dinamicheskikh processov rudnichnoy aerologii [Modelling the dynamic processes of mine aerology]. Kiev: Naukova dumka, Ukraine.
6. Ukraine Ministry of Fuel and Energy (2004). 10.1.00174088.001-2004. Dehazatsiia vuhilnykh shakht.Vymohy do sposobiv ta skhem dehazatsii: Standart Minpalyvenerho Ukrainy [10.1.00174088.001-2004. Degassing of Coal Mines. Requirements for Ways and Schemes of Degassing: Standard of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine], Ukraine Ministry of Fuel and Energy, Kiev, Ukraine.
7. Yegorchenko, R. R., Mukha, O. A., & Shirin, L. T. (2022). The methods to calculate expediency of composite degassing pipelines. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 23–27. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-4/023>
8. Mineev, S. P. (2016). Prognoz i predotvrashhenie vybrosov uglja i gaza na shahtah Ukrainy [Forecasting and prevention of coal and gas emissions on mines in Ukraine]. Maryupol: Skhidnyi vydavnychiy dim, Ukraine.
9. Cai, J., Wu, J., Yuan, S., Liu, Z., & Kong, D. (2021). Numerical analysis of multi-factors effects on the leakage and gas diffusion of gas drainage pipeline in underground coal mines. *Process Safety and Environmental Protection*, (151), 166–181. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.05.017>.
10. Muha, O. A., & Pugach, I. I. (2009). Raschjot parametrov degazacionnyh system [Calculating the parameters of degassing systems]. Dnepropetrovsk: NMU, Ukraine.
11. Shirin, L. N., Bartashevsky, S. E., Denyshchenko, O. V., & Yegorchenko, R. R. (2021). Improving the capacity of mine degassing pipelines. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, 6, 166–181. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-6/072>.
12. Doroshenko, Ya. V., Kucheriavy, V. A., Andriishyn, N. M., Stetsiuk, S. M., & Levkovych, Yu. M. (2019). The current methods to construct industrial gas-and-oil pipelines. *Exploration and development of oil and gas fields*, 3(72), 19-31. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-3\(72\)-19-31](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2019-3(72)-19-31).
13. Novikov, L., Bokii, O. (2019). Calculation of degassing networks taking into account the accumulation of the liquid phase. E3S Web of Conferences. International Conference Essays of Mining Science and Practice, 109, 1–7. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900063>.
14. Khujaev, I., Atamirzaev, M., & Khujaeva, S. (2019). Formulas for calculating temperature and pressure in a relief main gas pipeline. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 10(78), 41–45. <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2019.10.78.6>.
15. Lavrik, V. G., Kirik, V. V., Malashkina, V. A., & Zaslavchik, B. C. (1987). Raschet negermetichnogo gazoprovoda shahtnoj degazacionnoj ustanovki s pomoshh'yu JeVM [Calculation of a Leaky Gas Pipeline of a Mine Degassing Plant UEC]. *Razrabotka mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh*, (58), 75–77.

Надійшла до редакції 17.10.2022

S. Minieiev, L. Novikov, M. Liutyi, R. Makarenko

IMPACT OF DEGASIFICATION PIPELINE TIGHTNESS ON AIR INFLOWS AND METHANE CONCENTRATION

Purpose. The purpose of this work is to investigate the patterns of change in air inflows and methane concentrations in the vacuum degassing gas pipeline.

Methods. Analytical dependencies for determining the absolute pressure, volume flow rate and temperature of the gas mixture in link of degassing gas pipeline and an empirical dependence for determining the volume flow rate of air in the inflows coming through the flange connections of the gas pipeline links were used in the studies.

Results. With these assumptions in mind, the formula for determining the gap in the flange joint of the degassing gas pipeline links has been obtained. The results of calculating air inflows and methane concentrations along the length of the horizontal section of the degassing gas pipeline have been presented. Analysis of the results showed that air inflows through the flange joints of the degassing gas pipeline links increase in the direction of the gas mixture flow, while the methane concentration, on the contrary, decreases. In this case, the increase in air inflows is due to an increase in vacuum in the degassing gas pipeline, while the decrease in methane concentration is due to an increase in the volume flow of the gas mixture. Based on the analysis of the methane concentration character of change along the length of the horizontal section of the degassing gas pipeline, the distance from the beginning of the pipeline where the methane concentration value becomes below the permissible value and the probability of ignition of the gas mixture arises. It has been established that methane concentration varies insignificantly along the length of the gas pipeline at normative airflows.

Scientific novelty. A formula is derived for determining the size of the gap between the flat rubber gasket and a shoulder of a flange connection of the degassing gas line links, at which the total air inflows in the gas line coincide with the standard value.

Practical significance. The determination of the size flange joint clearance of the degassing gas pipeline links makes it possible to calculate the air inflows and assess the tightness of the gas pipeline flange joints on the basis of measurements of the gas mixture volume flow rate, methane concentration and the depression value.

Keywords: degasification gas pipeline, flange connections, clearance, air inflows, methane concentration.

Відомості про авторів

Мінсєв Сергій Павлович, доктор технічних наук, професор, завідувачий відділом Управління динамічними проявами гірського тиску, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМНАН України), м. Дніпро, Україна, sergminee@ukr.net.

Новіков Леонід Андрійович, кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу геомеханічних основ відкритої розробки родовищ, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМНАН України), м. Дніпро, Україна, lnov710@gmail.com.

Лютий Максим Олексійович, заступник начальника 8 загону ДВГРС України, м. Павлоград, Україна, sergminee@ukr.net.

Макаренко Роман Володимирович, заступник головного інженера «Шахтоуправління ім. Героїв космосу» ПрАТ "ДТЕК Павлоградвугілля", м. Павлоград, Україна, sergminee@ukr.net.

Minieiev Serhii, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of the Department of Pressure Dynamics Control in Rocs, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine; sergminee@ukr.net.

Novikov Leonid, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Researcher of the Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine; lnov710@gmail.com.

Liutyi Maksym, Deputy Head of the 8th Detachment of the PMRS of Ukraine, Pavlohrad, Ukraine; sergminee@ukr.net.

Makarenko Roman, Deputy Chief Engineer of Mining Management named after Space Heroes PJSC "DTEK Pavlohradvuhillia", Pavlohrad, Ukraine; sergminee@ukr.net.

УДК 622.361.2

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-94-105](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-94-105)

В.Т. Підвисоцький, В.В. Котенко, С.І. Башинський, І.А. Піскун

ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЗВОРОТНІХ ЗВАЖЕНИХ ВІДСТАНЕЙ ДЛЯ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ЙОСИПІВСЬКОГО РОДОВИЩА КАОЛІНУ

Мета. Описати порядок виконання кластеризації родовища каоліну з метою визначення закономірностей розподілу якісних показників, виокремлення перспективних ділянок та підрахунку об'ємів корисної копалини різних кондицій.

Методика. Виконання систематизації, аналізу і статистичної обробки результатів геологічного дослідження родовища. Ідентифікація критеріїв для оцінки якісних властивостей корисної копалини. Виконання інтерполяції на основі результатів геологічних досліджень з метою встановлення якісних показників корисної копалини та закономірностей їх розподілу в межах родовища. Обґрунтування доцільності застосування методу зворотніх зважених відстаней для досягнення поставлених цілей. Виконання кластеризації родовища та підрахунку об'єму запасів різних кондицій.

Результати. Головним результатом кластеризації родовища є безпосередньо виокремлення ділянок в межах яких розташовані другорядні кондиції корисної копалини. Результати кластеризації дозволяють: відобразити вміст складових компонентів в контурах родовища; визначити перспективні для відпрацювання ділянки; визначити оптимальний напрямок напроєктування фронту видобувних робіт; визначити оптимальне місце розташування розкривних гірничих виробок; підрахувати об'єми корисних копалин в межах родовища за різними торговими марками; провести усереднення гірничої маси з метою підвищення її якості.

Наукова новизна. Виконано систематизацію і огляд існуючих методів геометризації родовищ корисних копалин. Емпіричним шляхом досліджено доцільність застосування методу інтерполяції з метою геометризації складноструктурного Йосипівського родовища первинного каоліну. Обґрунтовано доцільність застосування такого методу, виконано оцінку релевантності одержаних результатів.

Практична значимість. Результати одержані в ході написання статті дозволяють оптимізувати процес проєктування гірничого підприємства з видобутку каоліну за рахунок одержання детального та наочного розподілу родовища на кластери у відповідності до бажаних якісних показників: мінерального складу, хімічного складу, фізико-механічних показників і т.д. Разом з тим, одержані результати дозволяють спрогнозувати закономірності поширення різного роду властивостей в межах родовища та з вищим показником точності оцінити загальний економічний ефект від його розробки.

Ключові слова: каолін, кластеризація, інтерполяція, метод зворотніх зважених відстаней, якісні показники корисних копалин.

Вступ. Україна володіє потужною і досить розвиненою мінерально-сировинною базою, до складу якої входить значна кількість каолінових родовищ. Станом січень 2021 року, частка каолінових родовищ що розробляються, становила 18% від загальної кількості родовищ які здані в експлуатацію, тобто, майже кожне п'яте родовище на території України спеціалізується на видобуванні каоліну. Загалом в Україні налічується близько 150 каолінових родовищ, як первинного (Великогадоминецьке, Просянівське, Глуховецьке та ін.), так і вторинного (Новоселицьке, Кіровоградське, Пологівське та ін.). Держбалансом враховані запаси 35 родовищ, сумарне значення яких становить 1100 млн.т. Значна кількість родовищ дозволяє з легкістю забезпечити виробничі потреби у високоякісній сировині як в середині нашої країни, так і за її межами [1].

Характерною ознакою каолінових родовищ, особливо вторинного типу, є значна мінливість показників потужності по корисній копалині, та неоднорідність хімічного складу і фізико-механічних властивостей. Це дуже часто стає проблемою, оскільки призводить до зниження економічного ефекту від видобування та реалізації каолінової продукції, і збільшення кількості непередбачуваних виробничих ситуацій, пов'язаних з неоднорідністю геологічної будови родовищ. Чи не найкращим способом уникнення

вище вказаних проблем може стати використання детального проектування покладу корисної копалини родовища з його подальшою геометризациєю. Застосування геометризациї дозволяє спрогнозувати основні закономірності розповсюдження хімічних елементів, фізико-механічних параметрів чи інші показники, що в свою чергу дозволяє проаналізувати та розподілити на класи корисну копалину в межах родовища.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Фундаментальне значення в ході написання даної роботи мала праця І. Шепеля «Геолого-економічна оцінка Йосипівського родовища первинного каоліну», в якій зібрано відомості стосовно вивченості Йосипівського родовища, періодів проведення розвідувальних робіт, інформацію про результати бурових робіт та плани відбору проб. Зокрема, серед всього іншого, в даній роботі наведено результати хімічного аналізу проб первинного каоліну Йосипівського родовища [2].

Актуальність висвітленої теми підкреслюється працею Гурського Д.С. «Концептуальні засади державної мінерально-сировинної політики щодо використання стратегічно важливих для економіки корисних копалин» [1], Ващука О.М. та Соболевського Р.В. «Дослідження перспективності багатofакторної геометризациї покладів каоліну за якісними показниками для умов України» [3] та Гелета О.Л. «Мінеральні ресурси України. Глини» [4].

Важливу роль в ході написання роботи відіграє чітке розуміння вимог, які ставляться вітчизняною промисловістю до якості каолінової сировини. Відповідно, визначення вимог тієї чи іншої галузі промисловості до якості каолінової продукції визначалось виходячи з ряду Державних стандартів України та Технічних умов стосовно якості будівельних гірських порід [5-6].

Значна частина опрацьованої літератури стосувалась саме аспектів методу інтерполяції та висвітлення її математичної суті [8-11]. В даних публікаціях наводяться приклади та оцінка різних методів інтерполяції. Інформація викладена в цих публікаціях дозволяє сформулювати загальне уявлення про процес інтерполяції, детально описує головні завдання інтерполяції та методи і механізми її виконання. Зокрема праця А. Buda [8] описує переваги застосування інтерполяції, наводить приклад задач які можна використати за допомогою даного методу прогнозування просторових змін та коротко висвітлює математичну суть даного методу. Публікації [8] та [11] описують закордонний досвід застосування методу інтерполяції безпосередньо для аналізу родовищ корисних копалин та моделювання параметрів родовищ.

Мета статті. Описати порядок виконання геометризациї родовища каоліну з метою визначення закономірностей розподілу якісних показників, виокремлення перспективних ділянок та підрахунку об'ємів корисної копалини різних кондицій.

Методи дослідження. У відповідності до мети даної роботи, використовуючи результати геологічних дослідження у вигляді емпіричних даних, було виконано їх статистичну обробку з метою встановлення розкиду значень за вмістом різних хімічних компонентів. Одним з базових в контексті даної роботи є метод інтерполяції втілений шляхом застосування методу зворотніх зважених відстаней. Підрахунок запасів в межах виокремлених ділянок виконувався методом геологічних блоків.

Виклад основного матеріалу. У геологічній будові Йосипівського родовища первинного каоліну беруть участь докембрійські кристалічні породи, кора вивітрювання цих порід, неогенові і четвертинні піщано-глинисті відклади.

У межах родовища кристалічні породи природних виходів на денну поверхню не мають, залягають під товщею каоліну і жорстви та кайнозойськими породами. Глибина залягання кристалічних порід на родовищі змінюється від 11,6 м до більше ніж 33 м. Поверхня кристалічного фундаменту нерівна, чергується впадинами і підняттями.

Мігматити в межах родовища розповсюджені майже по всій площі розвитку покладу лужного каоліну, вміщують невеликі тіла пегматоїдних гранітів і пегматитів. Мінеральний склад мігматитів наступний: кварц 10-15%, плагіоклаз 55-58%, мікроклін 15-20%, мусковіт 8-12%, гранат 3-4%, серицит до 3%. Складаються з тріщинуватих зерен польових шпатів, різко-ксенобластового кварцу, крупних орієнтованих лусок мусковіту і витягнутих нагромаджень гранату. Розмір зерен коливається від 0,2 до 6 мм, гранату – не перебільшує 1,0 мм. Плагіоклаз кислого складу, спостерігається у вигляді тріщинуватих зерен, інколи зруйнованих по краях каоліном, зрідка по тріщинах, мусковітизований. Характерні крупні видовжені до 6 мм луски мусковіту. Зерна гранату ізометрично-округлої форми, інколи з пойкилітовими зростками кварцу.

Граніти розповсюджені у північній частині площі підрахунку запасів і у південно-західному кутку площі. Мінеральний склад: мікроклін 40-57%, кварц 20-25%, плагіоклаз 15-20%, біотит 3-5%, мусковіт, серицит, лейкоксен, циркон. Розмір зерен мінералів коливається від 0,2 до 1,5 мм. Плагіоклаз слабо-серпентинизований, подекуди в результаті калієвого метасоматозу інтенсивно заміщений мікрокліном.

Пегматоїдні граніти і пегматити зустрічаються в полі мігматитів у вигляді невеликих тіл неправильної жиллоподібної форми. Породи крупнозернисті рожево-сірого, світло-сірого або сірого кольору, пегматоїдної або гіпідіоморфнозернистої структури. Складені, в основному, мікрокліном і мікроклін-пертитом, кварцом, плагіоклазом, біотитом і мусковітом, як домішки зустрічаються апатит, циркон, гранат, турмалін, рутил, монацит.

Кора вивітрювання кристалічних порід Йосипівського родовища залягає на глибинах від 3,0 м до 22,8 м, потужність змінюється від 1 м до 23 м і більше, в середньому становить 15 м. Максимальні потужності спостерігаються в центральній і південній частинах площі підрахунку запасів, мінімальні – у північній частині. За межами підрахунку запасів на схід і захід від покладу зустрічаються невеликі ділянки, де кора вивітрювання відсутня, кристалічні породи виходять під кайнозойські відклади.

У профілі кори вивітрювання знизу вверх виділяються такі зони: зона дезінтеграції і початкового вивітрювання (зона жорстви); гідрослюдисто-каолінітова зона, яка включає поклад лужного каоліну; каолінітова зона.

Для зони дезінтеграції Йосипівського родовища характерні добра збереженість і велика кількість мікрокліну у корі вивітрювання гранітоїдів, який разом зі стійким в гіпергенних умовах кварцом і акцесорними мінералами надає породі характерний вигляд жорстви. Для кори, розвинутої по гнейсах, де відносно стійкі мінерали знаходяться у підпорядкованій кількості, утворення жорстви не характерно, тут спостерігається поступовий перехід від кристалічних порід до гідрослюдисто-каолінітових утворень.

Гідрослюдисто-каолінітова зона в межах родовища розповсюджена майже повсюди, характеризується різким переважанням вторинних мінералів над вихідними продуктами.

У цій зоні завершується каолінізація плагіоклазу, гідратація мусковіту і біотиту. Мікроклін, незважаючи на значну каолінізацію, ще зберігається у значній кількості.

На багатих мікрокліном гранітах і мігматитах гідрослюдисто-каолінітова зона представлена лужним каоліном, лужність якого пов'язана, в основному, з напів-каолінізованим реліктовим мікрокліном

Каолінітова зона (зона повної каолінізації) представляє собою кінцевий продукт хімічного вивітрювання кристалічних порід в умовах гумідного клімату. До цієї зони віднесені каоліни, які складаються із каолініту і кварцу. Решта мінералів знаходяться тут у дуже незначній кількості. На родовищі ця зона виділена у самій верхній частині

профілю вивітрювання порід. Вона спостерігається у південно-східному кутку площі родовища.

Горизонт строкатих глин набуває повсюдного розповсюдження, потужність змінюється від 1,7 до 8,5 м, в середньому 4,5 м. Горизонт плащовидно перекриває кору вивітрювання. Глини бурувато-сірі, з темно-бурими і малиново-червоними плямами, в'язкі, інколи з лінзами піщаного матеріалу. В підшві глин інколи зустрічаються домішки крупнозернистого матеріалу.

Породи четвертинної системи розповсюджені по всій площі, представлені пісками, суглинками, супісками і ґрунтово-рослинним шаром. Піски кварцові, різнозернисті, невідмучені, жовто-сірого кольору. Потужність змінюється від 0 до 5,0 м, в середньому становить 0,7 м. Рудні мінерали спостерігаються у пісках в дуже малій кількості, по вмісту глиняних мінералів піски не придатні для будівельних робіт. Суглинки та супіски коричнево-сірі, жовто-сірі, мало пластичні, з лусками слюди. Розповсюджені на незначних ділянках, потужність змінюється від 0 до 2,8 м, що в середньому становить 1,3 м. Ґрунти на родовищі піщаністі, суглинисті, інколи торф'яні. Потужність змінюється від 0,2 до 1,0 м, середня потужність по ґрунтам 0,6м.

Лужний каолін та жорства гранітоїдів Йосипівського родовища складають пластовидний поклад, просторово і генетично пов'язані з корою вивітрювання гранітоїдних порід. Поклад корисної копалини складають два промислові типи руди: верхній поклад – лужний каолін з вмістом не менше 30% глинистої складової і нижній – польовошпатована жорства з вмістом глинистої складової 15-30%

Таблиця 1 – Стратиграфічна колонка Йосипівського родовища каоліну

Система	Індекс	Потужність, м		Назва порід
		від-до	середня	
Четвертинна	Q	0,2-1	0,6	Ґрунт піщанистий, суглинистий.
		0,0-2,8	1,3	Суглинки та супіски жовто-коричневі.
		0,0-5,2	0,7	Пісок кварцовий різнозернистий.
Неогенова	N ₁ S	1,7-8,5	4,5	Горизонт барвистих глин.
Мезо-кайнозойська	MZ-KZ	0,0-13,2	0,2	Каолін первинний озалізнений.
		2,0-23,0	5	Корисна копалина. Каолін первинний лужний світло-сірий з реліктами мікрокліну більше 8%, зі значною кількістю піщаного залишку.
		3,0-13,0	2,2	Корисна копалина. Жорств'яна кора вивітрювання гранітоїдів мікроклінових. Вміст фракції менше 0,063 мм від 15 до 30%.
Протерозойська	PR ₁	-	-	Мігматити мікроклінові, гранат-мусковітові середньо-крупнозернисті.

Поклад корисної копалини має складну внутрішню будову і морфологію. Центральна частина покладу складена каоліном, утвореним по мігматитах, північна і південна – переважно по гранітах.

У плані поклад має неправильну форму з протяжністю у субширотному напрямку до 1,2 км, у субмеридіальному – до 0,8 км. Потужність корисних копалин змінюється від 2 м до 23 м. Максимальні потужності спостерігаються на півдні родовища. Потужність залежить від рельєфу кристалічних порід і глибини ерозійного зрізу поверхні каоліну. Потужність каоліну на деяких ділянках різко змінюється у сусідніх свердловинах.

Згідно «Інструкції із застосування Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр до родовищ каоліну» Йосипівське родовище можна віднести до 2-ої групи 2-ої підгрупи: родовище складної будови, представлене дрібним, близьким до середнього, за запасами пластовидним покладом, з нерівномірним розподілом шкідливих компонентів (оксидів заліза і титану).

Враховуючи геологічну будову та дані хімічного аналізу первинного каоліну Йосипівського родовища (табл. 2), можна прийти до висновку, що найбільш доцільним

та економічно вигідним є його використання в якості сировини для виготовлення керамічних виробів.

Таблиця 2 – Узагальнені показники хімічного складу каоліну Йосипівського родовища

№ з/п	Компонент	Описова характеристика
1	Fe_2O_3	Мінімальна концентрація 0,31 %, максимальна 1 %. Середнє значення по родовищу 0,66 %. 16 із 109 проаналізованих зразків не відповідають вимогам, поставлених для марок КШФ та КШС, проте, знаходяться в межах допустимих значень для марок КШБ та ЖШ.
2	TiO_2	Мінімальна концентрація 0,11 %, максимальна 0,37 %. Середнє значення по родовищу 0,26 %. 18 із 109 проаналізованих зразків не відповідають вимогам, поставлених марками КШФ та ЖШ, проте, знаходяться в межах допустимих значень для марок КШС та КШБ.
3	Al_2O_3	Мінімальна концентрація 14,68 %, максимальна 23,26 %. Середнє значення по родовищу 18,61 %. 1 із 109 проаналізованих зразків не відповідає вимогам, поставлених маркою КШФ, проте, знаходиться в межах допустимих значень для марок КШС, КШБ та ЖШ.
4	K_2O	Мінімальна концентрація 3,69 %, максимальна 7,05 %. Середнє значення по родовищу 5,59 %. 16 із 109 проаналізованих зразків не відповідають вимогам марки ЖШ та 4 зі 109 зразків не відповідають вимогам стосовно марки КШФ, проте, вони є більшими за мінімально допустиме значення, і задовольняють вимоги марок КШС та КШБ.
5	CaO	Мінімальна концентрація 0,08 %, максимальна 0,29 %. Середнє значення по родовищу 0,15 %. 34 із 34 проаналізованих зразків відповідають вимогам всіх торгових марок.
6	В.П.П	Мінімальне значення 28,34 %, максимальна 53,34 %. Середнє значення по родовищу 36,76 %. 3 зі 109 проаналізованих зразків не задовольняють вимоги марок КШФ, КШС та КШБ, проте, відповідають вимогам марки ЖШ.

Первинний каолін, до якого безпосередньо відноситься каолін Йосипівського родовища, може використовуватись для виготовлення кераміки як у незбагаченому вигляді (каолін сирець), так і після збагачення. Залежно від хімічних та фізичних властивостей і сфери застосування, первинний каолін поділяється на марки вказані в таблиці 3.

Таблиця 3 – Марки каоліну первинного, незбагаченого (сирцю)

Матеріал	Марка	Сфера застосування
Каолін первинний	КШФ	Для тонкокерамічного виробництва (художньої та господарської порцеляни, електротехнічної порцеляни)
	КШС	Для виробництва санітарно-технічної кераміки
	КШБ	Для виробництва будівельних матеріалів
Жорства	ЖШ	Каолінізована кварц-польовошпатова сировина

Оцінка якості каоліну виконується у відповідності до спеціально-розроблених технічних умов та діючих стандартів. Зокрема, в ході оцінки сировини Йосипівського родовища, аналіз якості каоліну сирцю регламентується у відповідності до ТУ У В.2.7-14.2-05468498-006-2007 «Каолін первинний, не збагачений» [12]. У відповідності до вище наведених стандартів, первинний каолін вказаних марок має відповідати вимогам наведеним у таблиці 4.

Таблиця 4 – Технічні вимоги до первинного каоліну та жорстви Йосипівського родовища

Найменування показників	Позначення показників	Нормативні вимоги до марок			
		КШФ	КШС	КШБ	ЖШ
Масова частка оксиду заліза (не більше), %	Fe_2O_3	0,8	0,8	1,0	1,0
Масова частка двоокису титану (не більше), %	TiO_2	0,3	0,4	0,4	0,3
Масова частка оксиду алюмінію (не менше), %	Al_2O_3	15	14	14	12
Масова частка оксиду калію (не менше), %	K_2O	4,5	3,0	3,0	5,0
Масова частка оксиду кальцію (не більше), %	CaO	0,6	0,8	0,8	0,6
Співвідношення масових часток оксидів калію та натрію (не менше)	-	5,0	4,0	Не нормується	
В.П.П (не менше), %	-	30,0	30,0	30,0	15,0

Для оконтурення ділянок покладу у відповідності до їх хімічного складу та приналежності тій чи іншій торговій марці, спочатку необхідно виконати інтерполяцію. Основою для виконання інтерполяції є відповідні результати геологічної розвідки родовища. Інтерполяція виконувалась методом зворотніх зважених відстаней (надалі МЗЗВ) за допомогою додатку «ArcMap» [9].

МЗЗВ побудований на припущенні, що об'єкти, які знаходяться близько один від одного, є більш подібні між собою, ніж об'єкти, які знаходяться на великих відстанях. Щоб визначити значення елемента у частині родовища, яка не була досліджена в ході виконання геологорозвідувальних робіт, МЗЗВ використовує відомі виміряні значення, які розташовані навколо площини інтерполяції [10].

При цьому, відомі виміряні значення, які знаходяться найближче до площини інтерполяції, мають більший вплив на прогнозоване значення, ніж значення віддалені від нього на значну відстань. МЗЗВ передбачає, що кожна вимірювана точка здійснює локальний вплив, який зменшується зі збільшенням відстані. Відповідно до цього, при виконанні інтерполяції за допомогою цього методу, на площину інтерполяції ключовий вплив несуть значення вмісту, які знаходяться найближче до неї. Результатом цього є те, що сила впливу точки зменшується як функція від відстані, тому даний метод і отримав назву зворотних зважених відстаней.

Як було зазначено вище, сила впливу точки на площину інтерполяції пропорційна зворотним відстаням (між точкою даних і площиною інтерполяції), піднесеними до степені (p). В результаті цього, при збільшенні відстані сила впливу точки на площину інтерполяції буде стрімко зменшуватися. Ступінь зменшення сили впливу точки на площину інтерполяції буде залежати головним чином від значення степеню (p). Якщо ($p = 0$), зменшення значення впливу відомих точок на площину інтерполяції зі збільшенням відстані не відбувається, а оскільки всі сили впливу точок однакові, прогнозоване значення буде середнім для всіх значень шуканого фрагмента. У міру збільшення значення (p) сила впливу відомих параметрів віддалених точок на площину інтерполяції буде стрімко зменшуватися. Якщо значення (p) занадто високе, то на інтерполяцію вплинуть тільки ті точки, що розташовані в безпосередній близькості до площини інтерполяції [11].

Додаток «ArcMap» використовує значення ступенів, які більші, або рівні одиниці. Оптимальне значення ступеня може бути визначено мінімізацією середньоквадратичної похибки інтерполяції. Мінімізація середньо-квадратичної похибки інтерполяції – це статистична величина, яка розраховується автоматично, під час перехресної перевірки. Мінімізація середньоквадратичної похибки дозволяє визначити помилки інтерпольованої поверхні. Додаток «ArcMap» виконує оцінку кількох значень ступеня для визначення того значення, яке видає найменшу помилку при мінімізації середньоквадратичної похибки. Аналіз для виявлення помилки визначається для кількох різних значень ступеня, але з використанням одного набору даних. Крива інтерполяції підбирається у відповідності до точок (квадратична інтерполяція по методу локальних поліномів), і виходячи з даних кривої, ступінь, який забезпечує найменшу помилку при мінімізації середньо-квадратичної похибки, вважається оптимальним [13].

В ході виконання інтерполяції було отримано значення вмісту показників хімічного складу каоліну в межах Йосипівського родовища. Розрахунок показників вмісту виконувався в межах ділянки оконтуреної координатами центрів крайніх свердловин (рис 1). Потрібно також відмітити, що районування виконувалось лише за вмістом тих компонентів, концентрації яких перевищують максимально допустимі значення.

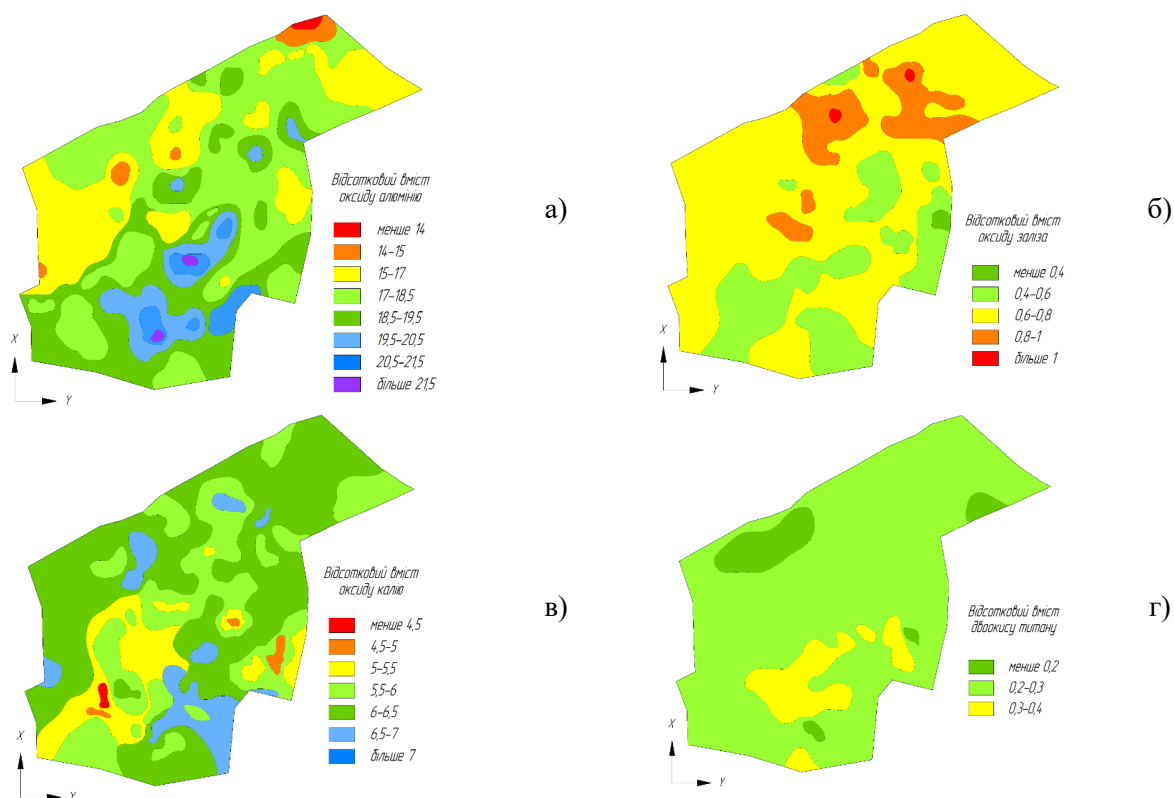


Рисунок 1 – Результати інтерполяції Йосипівського родовища каоліну за а – вмістом оксиду алюмінію; б – вмістом оксиду заліза; в – вмістом оксиду калію; г – вмістом двоокису титану

Оконтурення ділянок з метою їх подальшої кластеризації та підрахунку запасів у їх межах виконувалось на основі результатів інтерполяції, у відповідності до вимог регламентованих ТУ У В.2.7-14.2-05468498-006-2007 «Каолін первинний, не збагачений» (таблиця 3). В ході виконання оконтурення було виокремлено ділянки родовища, у яких вміст окремих хімічних сполук перевищує максимально допустимі значення, або відповідає маркам сировини другорядних гатунків (рис. 2).

Виконавши накладання ділянок в межах яких спостерігаються відхилення за вмістом окремих хімічних елементів (рис. 3), було отримано загальну картину по родовищу та виконано його кластеризацію шляхом поділу на блоки за критерієм приналежності до тієї чи іншої марки сировини.

В залежності від хімічного складу, кожний з виділених блоків прокласифікований, та віднесений до тієї чи іншої марки. Приналежність блоків торговим маркам наведена в таблиці 4. Окрім класифікації блоків, було підраховано їх площі, та об'єми. Площі блоків визначались автоматично, за допомогою графічного додатку. Визначення площі контуру виконувалось шляхом його поділу на прості геометричні фігури – трикутники, прямокутники і трапеції. Якщо контури криволінійні, то площа контуру ділиться на простіші фігури з таким розрахунком, щоб сторони фігур, які збігаються з цим контуром, практично можна було вважати прямолінійними. Площу всього контуру вираховують, як суму площ окремих фігур.

Для підрахунку об'ємів запасів корисних копалин в межах заданого контуру було використано метод геологічних блоків, оскільки даний метод дозволяє отримати кінцеві дані з достатньо великою точністю [14].



Рисунок 2 – Ділянки Йосипівського родовища каоліну з відхиленнями за: а – вмістом оксиду алюмінію; б – вмістом оксиду заліза; в – вмістом оксиду калію; г – вмістом двоокису титану

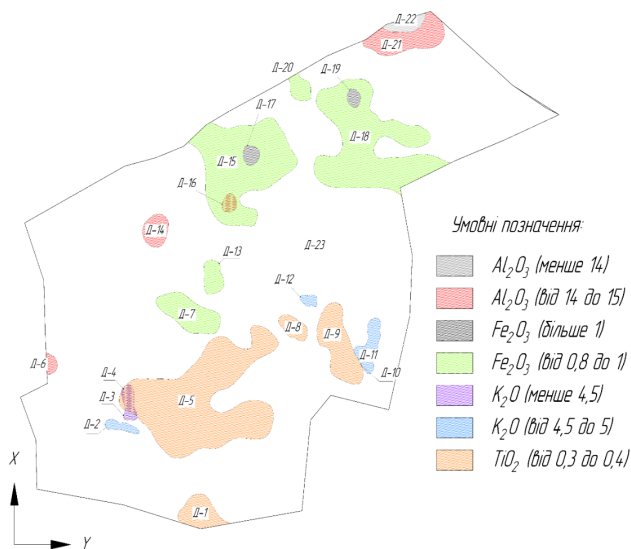


Рисунок 3 – Кластеризація Йосипівського родовища каоліну за критерієм приналежності до марок сировини визначених ТУ У В.2.7-14.2-05468498-006-2007 «Каолін первинний, не збагачений»

Спосіб геологічних блоків є різновидом способу середнього арифметичного і відрізняється від нього тим, що середні значення потужності і вмісту обчислюють не для всього родовища в цілому, а для окремих частин, які називають геологічними блоками. Загальний запас за категоріями, або класами. Тіло корисної копалини в даному випадку ніби перетворюється в сукупність замкнених рівновеликих фігур, висота яких дорівнює середній потужності кожного блока. Графічні побудови при цьому зводяться до загального оконтурювання тіла корисної копалини. Блоки виділяють в залежності від сорту корисної копалини (як у випадку з Йосипівським родовищем), ступеню розвіданості за категоріями, або структурними лініями, які впливають на систему розвідки і розробки. Відповідність виокремлених ділянок маркам каоліну, їх площа та значення підрахованих об'ємів наведені в таблиці 5.

Таблиця 5 – Підрахунок об'ємів оконтурених ділянок Йосипівського родовища каоліну

№ п/п	Ділянка	Не відповідність	Марка	Свердловини в контурах ділянки	Сер. пот. каоліну, м	Площа ділянки, м ²	Об'єм ділянки, м ³
1	Д-1	TiO ₂	КШС, КШБ	927	7,8	2929,0	22846,2
2	Д-2	K ₂ O	КШФ, КШС, КШБ	422	16,5	740,0	12210,0
3	Д-3	K ₂ O	КШС, КШБ	471	12,0	281,0	3372,0
4	Д-4	K ₂ O, TiO ₂	КШС, КШБ	474	7,7	815,0	6275,5
5	Д-5	TiO ₂	КШС, КШБ	469, 468, 457, 459, 454, 920, 456, 461, 919, 467	5,5	29976,0	163778,0
6	Д-6	Al ₂ O ₃	КШС, КШБ, ЖШ	24	10,3	504,0	5191,2
7	Д-7	Fe ₂ O ₃	КШБ, ЖШ	23	4,9	4441,0	21760,9
8	Д-8	TiO ₂	КШС, КШБ	492, 489	8,0	1341,0	10728,0
9	Д-9	TiO ₂	КШС, КШБ	493, 496, 498	6,0	5751,0	34314,3
10	Д-10	K ₂ O, TiO ₂	КШС, КШБ	914	6,0	22,0	132,0
11	Д-11	K ₂ O	КШФ, КШС, КШБ	444	3,3	2121,0	6999,3
12	Д-12	K ₂ O	КШФ, КШС, КШБ	440, 494	7,4	445,0	3293,0
13	Д-13	Fe ₂ O ₃	КШБ, ЖШ	19, 436, 407	4,9	1545,0	7570,5
14	Д-14	Al ₂ O ₃	КШС, КШБ, ЖШ	433, 8	2,8	1851,0	5090,3
15	Д-15	Fe ₂ O ₃	КШБ, ЖШ	479, 480, 453, 431	5,1	17958,0	91585,8
16	Д-16	Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃	КШБ, ЖШ	12	3,4	602,0	2046,8
17	Д-17	Fe ₂ O ₃	НК	942	4,5	792,0	3564,0
18	Д-18	Fe ₂ O ₃	КШБ, ЖШ	933, 932, 941, 62, 947, 948, 943	8,3	21209,0	175327,7
19	Д-19	Fe ₂ O ₃	НК	946	4,5	540,0	2430,0
20	Д-20	Fe ₂ O ₃	КШБ, ЖШ	944	11,2	1234,0	13820,8
21	Д-21	Al ₂ O ₃	КШС, КШБ, ЖШ	5	3,3	4975,0	16417,5
22	Д-22	Al ₂ O ₃	ЖШ	412	6,5	1270,0	8255,0
23	Д-23	-	КШФ, КШС, КШБ, ЖШ	16, 417, 21, 15, 945, 19, 931, 483, 484, 437, 930, 408, 20, 487, 440, 486, 924, 923, 922, 422, 473, 25, 53, 60	6,8	313128,0	2131362,2
Сумарно по родовищу						414470,0	2748371,0

Висновок. Запропонований метод обробки результатів геологічних досліджень дозволяє виконати прогнозування ділянок зі сталою концентрацією складових компонентів, виконати оконтурення таких ділянок та підрахувати об'єм різних видів марок сировини в межах виокремлених контурів та в цілому по родовищу.

Результати одержані в ході написання роботи дозволяють: відобразити вміст складових компонентів в контурах родовища; визначити перспективні для відпрацювання ділянки; визначити оптимальний напрямок нарощування фронту видобувних робіт; визначити оптимальне місце розташування розкривних гірничих виробок; спростити процес підрахунку об'ємів корисних копалин в контурах родовища; підрахувати об'єми корисних копалин в контурах родовища в залежності від їх

хімічного складу та приналежності до різних марок за якістю; провести усереднення гірничої маси з метою підвищення її якості.

Список літератури

1. І.С. Паранько, Л.В. Бурман, С.В. Ярков. Мінерально-сировинний потенціал України : навч. посібни. Кривий Ріг : Видавничий дім, 2011. 332 с.
2. Державна геологічна служба України при Міністерстві охорони навколишнього природного середовища України : станом на 01.07.2007 р. Звіт про розвідку родовища твердих корисних копалин «Детальна геолого-економічна оцінка Йосипівського родовища первинного каоліну у Баранівському районі Житомирської області». Київ : Північне державне регіональне геологічне підприємство «Північгеологія», 2007. 184 с.
3. О.М. Ващук, Р.В. Соболевський. Дослідження перспективності багатофакторної геометризації покладів каоліну за якісними показниками для умов України. Житомир : Житомирський державний технологічний університет, 2012. 29-31 с.
4. О.Л. Гелета. Мінеральні ресурси України. Характеристика глин, огляд їх запасів і галузей використання. Донецьк : Донецький гірничий університет, 2011. 217 с.
5. Державна комісія України по запасах корисних копалин при міністерстві охорони навколишнього природного середовища України (станом на 20.12.2006 р.). Наказ №354 «Про затвердження інструкції із застосування Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр до родовищ каоліну». Київ : Міністерство юстиції України, 2007. 41 с.
6. Е.А. Ремезова, Г.А. Кузьманенко. Моделі розподілу каоліну Глухівського родовища за якісними показниками. Георесурси: збірка статей. Київ : Інститут геологічних наук НАН України, 2013. 16-18 с.
7. Показники якості і методи оцінки рівня якості продукції. Терміни та визначення : ДСТУ Б А.1.1-11-94 – [Чинний від 1994.01.10]. – Київ : Держстандарт України, 1994. – (Національний стандарт України). 23 с.
8. A. Buda, A. Jarynowski. Life-time of correlations. Prague, 2015. 29-37 с.
9. ArcGIS [Електронний ресурс] : [Інтернет-портал]. – Електронні дані. – [Київ : ArcGIS Desktop, ArcMap «Побудова ізоліній вмісту за допомогою середовища ArcMap», 2012-2022]. – Режим доступу: www.arcgis.com
10. І.Г. Черваньов, О.С. Третяков, В.С. Писаревська. Побудова карт методом інтерполяції. Харків : Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, 2011. 212 с.
11. B. Denby. Geometrization of mineral deposits and bowels preservation. First National Mine Surveying Conference, 2011. 32-45 с.
12. Каолін первинний для використання в керамічних виробках та будівельній кераміці : ТУ У В.2.7 – 14.2 – 05468498-006:2007 – [Чинний від 2007.03.02]. – Київ : Держстандарт України, 2006. – (Національний стандарт України).
13. О.Є. Флюнт. Вплив похибки інтерполяції степеневих спектрів з нецілими показниками степеня на точність чисельного обчислення інтегрального перетворення. Львів : Львівський національний університет ім. Івана Франка, 2016. 29-37 с.
14. І.В. Філатова. Оконтурювання фігур підрахунку запасів. Донецьк : Донецький національний технічний університет, 2010. 392 с.

References

1. I.S. Paranko, L.V. Burman, S.V. Yarkov. (2011). [Mineralno-syrovynnyi potentsial Ukrainy : navch. Posibny]. Kryvyi Rih : Vydavnychiy dim. p. 332. (In Ukrainian).
2. Derzhavna heolohichna sluzhba Ukrainy pry Ministerstvi okhorony navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha Ukrainy. (2007). [Zvit pro rozvidku rodovyscha tverdykh korysnykh kopalyn «Detalna heoloho-ekonomichna otsinka Yosypivskoho rodovyscha pervynnoho kaolinu u Baranivskomu raioni Zhytomyrskoi oblasti»]. Kyiv : Pivnichne derzhavne rehionalne heolohichne pidpriemstvo «Pivnichheolohiia». p. 184. (In Ukrainian).
3. O.M. Vashchuk, R.V. Sobolevskyi. (2012). [Doslidzhennia perspektyvnosti bahatofaktornoï heometryzatsii pokladiv kaolinu za yakisnymy pokaznykamy dlia umov Ukrainy]. Zhytomyr : Zhytomyrskyi derzhavnyi tekhnolohichnyi universytet. p. 29-31. (In Ukrainian).
4. O.L. Heleta. (2011). [Mineralni resursy Ukrainy. Kharakterystyka hlyn, ohliad yikh zapasiv i haluzei vykorystannia]. Donetsk : Donetskyy hirnychiy universytet. p. 217. (In Ukrainian).

5. Derzhavna komisiia Ukrainy po zapasakh korysnykh kopalyn pry ministerstvi okhorony navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha Ukrainy. (2007). [Nakaz №354 «Pro zatverdzhennia instrukttsii iz zastosuvannia Klasyfikatsii zasiv i resursiv korysnykh kopalyn derzhavnoho fondu nadr do rodovysch kaolinu»]. Kyiv : Ministerstvo yustyttsii Ukrainy. p. 41. (In Ukrainian).
6. E.A. Remezova, H.A. Kuzmanenko. (2013). [Modeli rozpodilu kaolinu Hlukhivetskoho rodovyscha za yakysnymi pokaznykamy]. Heoresursy: zbirka statei. Kyiv : Instytut heolohichnykh nauk NAN Ukrainy. p. 16-18. (In Ukrainian).
7. Derzhstandart Ukrainy. (1994). [Pokaznyky yakosti i metody otsinky rivnia yakosti produktsii. Terminy ta vyznachennia : DSTU B A.1.1-11-94]. Kyiv. p. 23. (In Ukrainian).
8. A. Buda, A. Jarynowski. (2015). Life-time of correlations. Prague. p. 29-37. (In English).
9. ArcGIS [Elektronnyi resurs] : [Internet-portal]. – Elektronni dani. – [Kyiv : ArcGIS Desktop, ArcMap «Pobudova izolinii vmistu za dopomohoiu seredovyscha ArcMap», 2012-2022]. – Rezhym dostupu: www.arcgis.com. (In Ukrainian).
10. I.H. Chervanov, O.S. Tretiakov, V.S. Pysarevska. (2011). [Pobudova kart metodom interpolatsii]. Kharkiv : Kharkivskiy natsionalnyi universytet im. V.N. Karazina. p. 212. (In Ukrainian).
11. B. Denby. (2011). [Geometrization of mineral deposits and bowels preservation]. First National Mine Surveying Conference. p. 32-45. (In English).
12. Derzhstandart Ukrainy. (2007). [Kaolin pervynnyi dlia vykorystannia v keramichnykh vyrobakh ta budivelnii keramitsi : TU U V.2.7 – 14.2 – 05468498-006:2007]. Kyiv. (In Ukrainian).
13. O.I. Fliunt. (2016). [Vplyv pokhybky interpolatsii stepenovykh spektriv z netsilomy pokaznykamy stepenia na tochnist chyselnoho obchyslennia intehrlnoho peretvorennia]. Lviv : Lvivskiy natsionalnyi universytet im. Ivana Franka. p. 29-37. (In Ukrainian).
14. I.V. Filatova. (2010). [Okonturiuvannia fihur pidrakhunku zasiv]. Donetsk : Donetskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet. p. 392. (In Ukrainian).

Надійшла до редакції 10.11.22

V. Pidvysotskyi, V. Kotenko, S. Bashinsky, I. Piskun

JUSTIFICATION OF THE FEASIBILITY OF USING THE INVERSE WEIGHTING DISTANCE METHOD FOR CLUSTERING THE YOSYPIV KAOLIN DEPOSIT

Purpose. To describe the procedure for performing kaolin deposit clustering in order to determine the regularities of the distribution of quality indicators, to distinguish promising areas and to calculate the volumes of minerals of different conditions.

Methodology. Implementation of systematization, analysis and statistical processing of the results of geological research of the deposit. Identification of criteria for evaluating the qualitative properties of a mineral. Performing interpolation based on the results of geological studies in order to establish the qualitative indicators of the mineral and the regularities of their distribution within the deposit. Justification of the feasibility of using the method of inverse distances weighting to achieve the set goals. Performing deposit clustering and calculating the volume of reserves of different conditions.

Results. The main result of deposit clustering is the direct identification of areas within which the secondary conditions of the mineral are located. The results of clustering allow: to display the content of constituent components in the contours of the deposit; identify promising areas for development; to determine the optimal direction of expansion of the mining operations front; determine the optimal location of overburden mining; calculate the volumes of minerals within the deposit under different trademarks; average the mining mass in order to improve its quality.

Scientific novelty. The systematization and review of the existing methods of geometrization of mineral deposits has been carried out. The expediency of using the interpolation method to geometrize the complex structure of the Yosypiv deposit of primary kaolin has been investigated empirically. The expediency of using such a method has been substantiated, and the relevance of the obtained results has been assessed.

Practical significance. The results obtained during the research make it possible to optimize the design process of a kaolin mining enterprise by obtaining a detailed and visual distribution of the deposit into clusters in accordance with the desired qualitative indicators: mineral composition, chemical composition, physical and mechanical indicators, etc. At the same time, the obtained results make it possible to predict the patterns of distribution of various types of properties within the deposit and to estimate the overall economic effect of its development with a higher degree of accuracy.

Keywords: kaolin, clustering, interpolation, inverse distance weighting method, qualitative indicators of minerals.

Відомості про авторів

Підвисоцький Віктор Тодосійович, доктор геолого-мінеральних наук, професор, Державний університет «Житомирська політехніка». E-mail: krrkp_pvt@ztu.edu.ua

Котенко Володимир Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, Державний університет «Житомирська політехніка». E-mail: vladimir_kotenko@ukr.net

Башинський Сергій Іванович, кандидат технічних наук, доцент, Державний університет «Житомирська політехніка». E-mail: iptbass@gmail.com

Піскун Ігор Анатолійович - аспірант, Державний університет «Житомирська політехніка». E-mail: ihor@ztu.edu.ua

Viktor Pidvysotskyi, Doctor of geological and mineral sciences, Professor, Zhytomyr Polytechnic State University; e-mail: krrkp_pvt@ztu.edu.ua

Volodymyr Kotenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Zhytomyr Polytechnic State University; e-mail: vladimir_kotenko@ukr.net

Serhii Bashynskyi, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Zhytomyr Polytechnic State University; e-mail: iptbass@gmail.com

Ihor Piskun, post-graduate student, Zhytomyr Polytechnic State University; e-mail: ihor@ztu.edu.ua

УДК 553.981.4:533.587

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-106-118](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-106-118)

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

ОЦІНКА СОРБЦІЙНОЇ РІВНОВАГИ МЕТАНУ ПРИ ЙОГО ГЕНЕРАЦІЇ У ВУГІЛЬНОМУ ПЛАСТІ

Мета. Дослідження сорбційної рівноваги адсорбованого при генеруванні метану у вугільному масиві для визначення умов її реалізації на різних глибинах гірничих робіт.

Методика. Використано методологію термодинамічних досліджень, чисельні методи розрахунків, математична обробка результатів досліджень з застосуванням методів апроксимації.

Результати. Зміна ентропії системи «адсорбований метан – вугілля» показує, що вихідний стан адсорбованого метану при його генеруванні у вугільному пласті визначає глибина залягання пласта та ступінь заповнення його пір метаном. Результати розрахунку показали, що в гірському масиві сорбційна рівновага системи «метан – вугілля» найбільш верогідна енергетично при ступені заповнення пір метаном, яка складає $\theta = 40\%$. При $\theta < 40\%$ – буде відбуватися незворотний мимовільний процес адсорбції вугіллям метана, а при $\theta > 40\%$ – його десорбція, ступінь інтенсивності якої можна оцінити за отриманим в роботі співвідношенням. Встановлено, що на глибині залягання вугільного пласта $H \leq 500$ м и $\theta > 40\%$ має місце десорбційний процес низької інтенсивності, а при $H > 500$ м – більш інтенсивний процес. Тому при генерації метану на глибинах $H < 500$ м верогідно, що через слабку десорбцію і велику енергію сорбційного зв'язку, пори прагнуть бути заповненими метаном майже повністю. А при $H > 500$ м вони будуть прагнути до сорбційної рівноваги, тобто будуть заповнені метаном всього на 40%. Решта обсягу газу, який генерований у вугільному пласті на глибинах понад 500 м, в результаті інтенсивного процесу десорбції мігрує у вміщуючі пласт породи.

Наукова новизна. На відміну від апріорі прийнятої думки про те, що вихідний стан адсорбційного у вугіллі метану завжди характеризується повним заповненням пір газом, в роботі вперше виконані чисельні розрахунки, які присвячені цьому питанню. Розрахунки засновані на сучасних уявленнях про генерування у вугіллі метану за допомогою відщеплення від аліфатичної бахрами атомів метильної групи та водню, які об'єднуються, і утворюють молекули метану. При цьому, встановлена залежність зміни ентропії системи «адсорбований метан – вугілля» від глибини залягання пласта та ступеня заповнення його пір метаном.

Практична значимість. Результати досліджень дозволяють отримати принципово нові закономірності процесів масоперенесення та фільтрації метану в гірському масиві на великих глибинах. Використання нових закономірностей дозволить скорегувати існуючі технології вентиляції виробки та способи безпечного ведення гірських робіт на викидобебезпечних та високогазоносних вугільних пластах, розробити принципово нові технології в цьому напрямку, а також дозволить виконати точніші розрахунки запасів метану в різних породах гірського масиву.

Ключові слова: адсорбція, термодинаміка, ентропія, сорбційна рівновага, насиченість пір метаном.

Вступ. В даний час в геомеханіці при проведенні різних розрахунків, які пов'язані з розробкою вискоєфективних технологій видобутку вугілля та шахтного метану, базовою основою є чисельні значення параметрів вихідного стану метану, адсорбованого у вугільному пласті. Під вихідним станом тут розуміється стан, який сформувався у вуглепородному масиві в результаті генерування метану у вугіллі протягом мільйонів років. Цей процес є квазістатичним і характеризується термодинамічною рівновагою системи «метан – вугілля». Спеціальні дослідження в цьому напрямку до теперішнього часу не проводилися. Зазвичай на практиці при розрахунках вихідний стан адсорбованого метану описувався його тиском, що розрахований за аналогією з тиском вільного метану, який обумовлений гірським тиском. Однак дані останніх теоретичних досліджень показують, що фізичний стан метану в мікроструктурі вугілля більш складний. Так, в монографіях [1- 6] викладені дослідження про фазовий стан та фізику слобції–десорбції метану у порах вугілля, що визначається значним впливом поверхневих сил, зумовлених міжмолекулярною взаємодією в системі «метан - вугілля» і характерним розподілом в порах вугілля.

Відзначено тісний взаємозв'язок структурної трансформації природної системи «вугілля-метан» з властивостями вугілля, як пористого сорбенту, насиченого метаном. Крім того, підкреслюється вплив сорбованого у вугіллі метану на особливості його тепломасоперенесення в пористій структурі вугільної речовини. Обґрунтована важливість цих досліджень для вирішення практичних завдань у галузі рудничної аерології, боротьби з газодинамічними явищами у вугільних шахтах та видобутку шахтного метану.

В роботі [7] проводилася оцінка обсягів метану у вільному, адсорбованому та абсорбованому стані при різній величині рівноважного тиску. Виявлено, що з підвищенням рівноважного тиску частка адсорбованого метану стає на порядок більшою, ніж абсорбованого. А співвідношення між сорбованим метаном та вільним залежить від ступеня метаморфізму вугілля. Зі зниженням ступеня метаморфізму частка сорбованого метану збільшується.

В роботі [8] виявлена кореляція між обсягом та теплотою утворення десорбованого шару метану в метаморфічній низці вугілля, що досліджується.

В роботі [9] у лабораторних умовах поетапно досліджена кінетика сорбції-десорбції метану на зразках вугілля. Встановлено, що найменш активно ці процеси відбуваються у вугіллі високого ступеня метаморфізму. Подібні дослідження проведені і в роботах [10], де визначені параметри кінетики десорбції метану в накопичувальній ємності різного обсягу води. Встановлена кореляція між інтенсивністю десорбції та газоносністю вугілля.

Проведені також дослідження впливу різного стану вугілля на кінетику десорбції метану з пористої структури вугілля. Наприклад, дослідження впливу внутрішньої вологості вугілля на параметри десорбції метану [11]. В результаті встановлено, що підвищення вологості вугілля призводить до зменшення інтенсивності емісії метану, часу десорбції, а також до зменшення енергії активації десорбції.

Крім вищезазначених робіт, в теперішній час з'явився інтерес дослідників до обліку сорбованого метану в феноменологічних моделях, що описують напружено-деформований стан трифазного вугільного масиву з точки зору багатофазності середовища. При цьому, розглядається пов'язаний процес деформованого твердого скелета вугільної речовини, насиченого вільним метаном. Таке вирішення деяких граничних завдань отримано в роботі [12]. Однак такі моделі вимагають доопрацювань щодо обліку адсорбованого в пористому просторі вугілля метану з точки зору опису фізики та механіки цього газу. Наприклад, з урахуванням результатів роботи [13], де наведена модель розрахунку активації десорбції метану з урахуванням міжмолекулярних взаємодій в системі «метан-вугілля». Це відноситься як до нерівноважних процесів у гірському масиві, так і до рівноважних, які в свою чергу, базуються на знанні про вихідний стан метану при його генеруванні у вугіллі. Це відзначається і в роботі [14], де підкреслюється, що достовірність газодинамічних прогнозів вимагає встановлення закономірностей сорбційної кінетики, яка включає в себе максимальну інформацію про фазові стани метану та їх розподіл у вугіллі. При цьому встановлено, наприклад, що на формування в пласті викидонебезпечної зони, впливають термодинамічні умови метаморфізації цієї частини пласта, отже, і генерування в ній метану, що детально описано у роботі [15].

Це підтверджує також досвід ведення гірських робіт на великих глибинах з застосуванням розроблених на даний час заходів щодо боротьби з газодинамічними проявами гірського тиску, які не завжди показують свою ефективність [16- 18]. В деяких випадках, наприклад, зі збільшенням глибини розробки, противикидний захід, що застосовується, може бути навіть провокуючим газодинамічне явище фактором [17]. Все це свідчить про те, що в теперішній час назріла потреба фізично

більш коректно визначити параметри, які характеризують вихідний стан метану, адсорбованого у вугіллі, при його генеруванні в гірському масиві. Такі дослідження дозволяють провести термодинамічні методи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фізика сорбційних процесів у вугіллі вивчалася як багато років назад, так і продовжує вивчатися до теперішнього часу. Перша група робіт присвячена, в основному, вивченню процесів адсорбції, обумовлених насиченням вугілля метаном під дією зовнішнього тиску. Останніми роботами в цьому напрямку є полімолекулярна теорія Брунауера – Еммета – Теллера (БЕТ) з поправкою для ізотерми адсорбції рівнянням Арамовича [3, 13], яке отримане шляхом застосування до адсорбату статистичної термодинаміки рідин. В потенційній теорії Поляни [3, 13] адсорбат розглядається, як рідина і передбачається, що конденсація пари починається в більш дрібних порах, а після їх заповнення продовжується в великих порах. Отримано вираз для адсорбційного потенціалу, який є основним параметром моделі. В.А. Бобіним [1, 5] розвинутий підхід до дослідження адсорбції різних газів на вугіллях, заснований на теорії об'ємного заповнення пір метаном. Ним отримана, а також досліджена залежність структурного параметру вугілля від розміру мікропор та діаметру молекули сорбата. А.Д. Алексеев [4] систему «вугілля-газ» представляє, як полімерний газувугільний твердий розчин. Тиск розчиненого метану визначається, як осмотичний тиск концентрованого твердого розчину вугілля в метані. При цьому концентрація метану оцінювалася методом ядерно-магнітного резонансу. В роботах [14] розглянуто метан у закритих порах. Газ вважається ідеальним та підкоряється закону Генрі [15]. Відповідно з цим, тиск газу залежить від безрозмірного параметру, обумовленого обсягом вугілля та посудини, в якій він знаходиться, а також розчинністю метану у вугіллі та його пористістю. На основі цієї моделі досліджено поетапний процес газовиділення з вугілля. В роботах [2, 4] експериментальним шляхом встановлена енергія активації десорбції метану, який був адсорбований в міжшаровому просторі вугілля.

Далі з'явилися моделі, які описують адсорбцію з урахуванням міжмолекулярних взаємодій молекул метану між собою та молекул метану зі стінками вугільних пір. Це таке рівняння стану адсорбованого метану у вугіллі, як рівняння з віріальними коефіцієнтами, які є функціями температури [15]. Складність цієї моделі полягає в тому, що знаходження віріальних коефіцієнтів, які визначають взаємодію декількох молекул, є складним і не завжди виправданим завданням. Рівняння ізотерми Хілла [13] враховує міжмолекулярну взаємодію в системі «метан-вугілля» шляхом переходу у відомому рівнянні Ван-дер-Ваальса [13] від тиску і обсягу газу до двумірного тиску та площі поверхні пори. В спрощеній формі, коли не враховуються співвідношення цих параметрів, воно представлено рівнянням Хіла-де Бура [13]. У роботі [19] викладено алгоритм розрахунку десорбції метану у вугіллі з урахуванням міжмолекулярних взаємодій у системі «метан-вугілля».

Крім викладених вище моделей, нині представляють великий інтерес теорії, які описують насичення вугілля метаном в результаті його генерування в самій мікроструктурі вугілля. Важливим моментом є те, що даний процес безпосередньо визначає вихідний стан метану, адсорбованого у вугільному масиві. Цьому напрямку присвячені роботи [3, 20], в яких викладено різні теорії про генерування метану у вугіллі. Однак ці теорії знаходяться нині на рівні гіпотез. В роботах [1, 21] виконані розрахунки, які показали, що в процесі динамічного деформування вугілля може відбуватися відщеплення від аліфатичної бахромі атомів мітильної групи та водню, які об'днуючись, створюють молекули метану. Однак застосовувати ці розрахунки до вихідного стану метану в вуглепородному масиві можна лише у винятковому випадку, наприклад, коли генерування метану відбувається при динамічних тектонічних

процесах в гірському масиві. В свою чергу, дослідження, які виконані в роботі [22], що стосуються також вихідного стану метану, але при його генерації в статичних умовах, привели до таких результатів. При знаходженні породного масиву під дією гірського тиску достатньо великий період часу, в результаті релаксійного механізму деформування, молекулярна структура вугілля трансформується. В результаті цього, як показали виконані розрахунки, також відбувається відщеплення від аліфатичної бахромі атомів метильної групи та водню, які об'єднуються, створюють молекули метану в пористому просторі вугілля. Встановлено, що ці молекули відразу ж вступають в сорбційний зв'язок зі стінками вугільних пір. При цьому газу утворюється набагато більше, ніж його може утримати енергетичними зв'язками молекулярна структура вугілля. Тому частина метану залишається в порах вугілля, будучи адсорбованим, частина переходить в тріщини, де він вже знаходиться у вільному стані, а частина – переходить в породи, які вміщує пласт. Розподіл цього газу по порожнинах, у тому числі, об'єми адсорбованого метану в порах вугілля, визначається його термодинамічним станом, зумовленим теплообміном цього газу з зовнішнім середовищем в даних гірничогеологічних умовах залягання вугільного пласта [2].

Мета статті. Вивчення вихідного термодинамічного стану адсорбованого при генеруванні у вугільному пласті метану, який характеризується сорбційною рівновагою, та визначення умов її реалізації на різній глибині гірського масиву.

Методи досліджень. Вихідний стан адсорбованого в порах вугілля метану в процесі його генерування в гірському масиві формувалася в результаті теплообміну цього газу із зовнішнім середовищем. Оскільки систему «метан-вугілля» можна вважати термодинамічною системою, то основним показником, який характеризує її теплообмін, є, як відомо [2], ентропія. Вона визначає переведення системи з деякого початкового стану до кінцевого, будучи функцією стану системи. Її основними параметрами є температура – T та, віддана системі внаслідок теплообміну, кількість теплоти – Q .

Вираз для ентропії сорбованого газу, згідно з роботою [23], має вигляд:

$$S = S^0 - \frac{H}{T} - \ln(P), \quad (1)$$

де S^0 – ентропія ідеального газу;

H – ентальпія сорбованого газу;

P – тиск адсорбованого газу у порах вугілля, Па.

З урахуванням міжмолекулярних взаємодій в системі «метан-вугілля» тиск адсорбованого газу в порах газу P визначається рівнянням стану Хілла [2]:

$$P = \frac{a}{k_1(1 - b_2 a)} \exp\left(\frac{b_2 a}{1 - b_2 a} - b_2 a\right), \quad (2)$$

де P – тиск адсорбованого метану, Па;

a – адсорбція, яка визначається за виразом

$$a = \theta/b_2, \text{ м}^3/\text{кг},$$

де θ – ступінь заповнення пір метаном;

b_2 – зворотня площа поверхні адсорбенту, яка займана одним молекулою адсорбата ($\theta = 1$), $\text{кг}/\text{м}^3$;

k_1 – константа Генрі, що представляє собою коефіцієнт пропорційності, яка пов'язує адсорбцію і її тиск, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{Па})$.

На основі співвідношення (1) та (2) в роботі [2] получено вираз для ентропії сорбованого метану у вигляді:

$$S = C_V \ln(T) + R \ln(\theta) + RT \left(\frac{\partial \ln k_1'}{\partial T} \right)_\theta + R \ln(k_1') - R \ln \frac{\theta}{1-\theta} - R \frac{\theta}{1-\theta} \quad (3)$$

де S – ентропія адсорбованого метану, Дж/(моль·К);

C_V – молярна теплоємність метану, Дж/(моль·К);

k_1' – змінна, що визначається виразом $k_1' = k_1 b_2$, 1/Па;

T – температура пласта, К;

R – газова постійна, Дж/(моль·К).

Таким чином, ентропія, яка є функцією термодинамічного стану адсорбованого у вугіллі метану, аналітично визначена. Але для того, щоб встановити умови сорбційної рівноваги метану у вугіллі, необхідно не її значення, а зміна цього параметру, який описує ентропійний фактор $T\Delta S$. Параметр $\Delta S = S_2 - S_1$ визначається необхідною кількістю теплоти, яка припадає на одиницю абсолютної температури, що получена системою для переведення її з стану 1 в стан 2. Тоді за знаком $T\Delta S$ можна виконати оцінку сорбційної рівноваги адсорбованого у вугіллі метану [2]. Тому методика досліджень полягала в наступному.

Як видно із формули (3) основними параметрами, що визначають стан адсорбованого метану у вугіллі є температура в гірському масиві на глибині залягання вугільного пласта – T та ступінь заповнення пір метаном в пласті – θ . Тому термодинамічна оцінка сорбційної рівноваги проводилася при різних параметрах T і θ . В процесі розрахунків приймали, що в початковому стані $T = T_1$; $S = S_1$. В стані 2: $T_2 = T_1 + \Delta T$; $S_2 = S_1 + \Delta S$. Початкові розрахунки проводилися покроково для різних значень T і ступеня заповнення пір метаном $\theta = 0,1$. Потім для різних значень θ . При цьому, враховувалося, що θ не може дорівнювати 1, а тільки прагнути до неї. Параметр T змінювався в межах зміни температури в гірському масиві, яка визначається глибиною залягання пласта і розраховується за геотермічним градієнтом [13]:

$$T_{zp} = \frac{100(T_2 - T_1)}{h_2 - h_1}, \quad (4)$$

де T_{zp} – геотермічний градієнт зміни температури порід на кожні 100 м глибини залягання пласта;

T_2, T_1 – температури на глибинах h_2 і h_1 відповідно.

Так, наприклад, для Донецького басейну температура T_1 на глибині 400 м складає 293,5 К, а геотермічний градієнт дорівнює, в середньому 2,4 К на 100 м глибини [13].

За отриманими залежностями можна аналізувати інтенсивність протікання сорбційних процесів, а точка переходу через нуль $T\Delta S = 0$ буде відповідати стійкому стану сорбційної рівноваги θ_{cm} . Визначив θ_{cm} в порах вугілля, можна зробити висновок про те, який сорбційний процес буде мати місце – адсорбція вугіллям метану у випадку $T\Delta S > 0$ або його десорбція, коли $T\Delta S < 0$.

Виклад основного матеріалу. Розрахунки зміни ентропії метану, адсорбованого в мікропорах вугілля, проводилися для температури, яка відповідає глибинам підземної розробки вугільних родовищ. На підставі співвідношення (4) цю температуру можна визначити за формулою:

$$T_2 = T_1 + \frac{T}{100}(h_2 - h_1) \cdot \quad (5)$$

Отримане значення температур вуглепородного масиву на різних глибинах представлені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Зміна температур вуглепородного масиву із зростанням глибини залягання пласта

Глибина, м	400	600	800	1000	1200	1400
Температура, °K	293,5	298,3	303,1	307,9	312,7	317,5

В результаті з використанням співвідношення (2) отримані наступні залежності зміни ентропійного фактора $T\Delta S$ від температури та ступеню заповнення пір метаном, які представлені на рисунку 1.

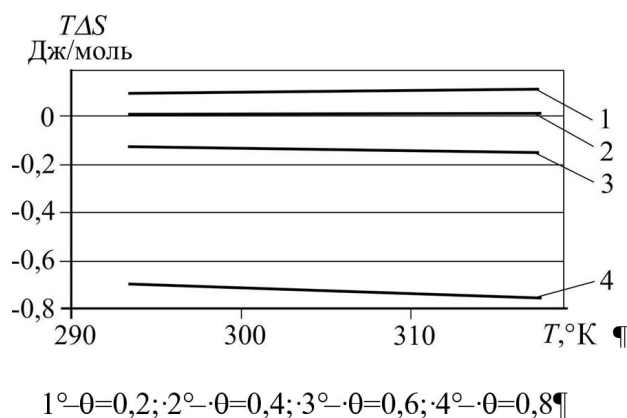


Рисунок 1 – Залежність ентропійного фактора $T\Delta S$ від температури при різних ступенях заповнення пір метаном θ : 1 – $\theta = 0,2$; 2 – $\theta = 0,4$; 3 – $\theta = 0,6$; 4 – $\theta = 0,8$

Як видно на рисунку 1, залежність ентропійного фактора $T\Delta S$ від температури має лінійний характер. Однак її нахил суттєво змінюється при різній температурі та різних ступенях заповнення пір метаном θ . Перехід цього параметру через нуль $T\Delta S = 0$, що відповідає рівноважному (найбільш стійкому) стану системи, реалізується при $\theta = 0,4$ для будь-якої температури вугільного пласта, що розробляється. Тобто ступінь заповнення пір метаном на 40% є більше верогідним станом системи порівняно з іншими її станами при будь-якій глибині залягання вугільного пласта. Коли $T\Delta S > 0$, та $\theta < 0,4$ буде відбуватися незворотний мимовільний процес, який характеризується тільки адсорбцією метану. При $T\Delta S < 0$ та $\theta > 0,4$ має місце сорбційний стан, який, у випадку підведення теплоти зовні, буде характеризуватися десорбцією метану. Основним параметром, який визначає інтенсивність десорбції, є температура пласта, тобто глибина його залягання. Тому інтенсивність цього процесу може бути різною. Причому від її величини залежить, який обсяг метану, додатково до рівноважного значення при $\theta = 40\%$, може залишатися в порах вугілля при його генерації. Слід зазначити, що цей приріст метану буде не стійким і, певних гірничо-геологічних умов, може десорбуватися повністю. В зв'язку з цим, для аналізу верогідного змінення інтенсивності десорбційного процесу метану з вугільних пір на різних глибинах, закономірності, що були отримані, на рисунку 1 були апроксимовані лінійними

функціями, за якими можна судити про інтенсивність десорбційного процесу, у вигляді:

$$T\Delta S = A \cdot T + B; \quad (6)$$

де A – параметр апроксимації, який визначає кут нахилу залежностей за відношенням до осі абсцис;

B – параметр апроксимації, який визначає точку перетину прямих з віссю ординат, тобто значення ентропійного фактору при $T=0$.

Значення наданих параметрів для різних ступенів заповнення пір метаном представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Значення параметрів A та B для різних ступенів заповнення пір метаном θ

θ	A	B
0,2	0,0003	$5 \cdot 10^{-14}$
0,4	$6 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-14}$
0,6	-0,0005	$2 \cdot 10^{-14}$
0,8	-0,0024	$4 \cdot 10^{-13}$

Аналіз рівнянь апроксимації з урахуванням даних, наведених у таблиці 2, дозволяє зробити наступний висновок. При ступенях заповнення пір метаном менше 0,4 значення ентропійного фактора $T\Delta S$ незначно зростає з підвищенням температури. А при ступенях заповнення пір метаном більших 0,4, коли має місце десорбція метану, ентропійний фактор суттєво зменшується зі зростанням температури. Тобто зі збільшенням глибини залягання вугільного пласта, верогідність заповнення пір метаном більше 40% суттєво знижується.

На рисунку 2 представлена залежність тангенса кута нахилу ентропійного фактору $T\Delta S$, який визначається параметром апроксимації A , в рівнянні (6) від ступеня заповнення пір метаном.

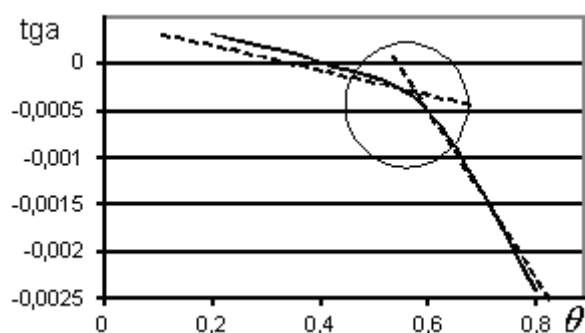


Рисунок 2 – Зміна тангенсу кута нахилу ентропійного фактора $T\Delta S$ при різному ступені заповнення пір метаном θ

З рисунка 2 видно, що графік функції $\text{tga}(\theta)$ має особливу область, що обведена еліпсом, яка характеризується різкою зміною ентропійного фактора сорбційної системи «метан-вугілля». Такий перелом у системі, що досліджують, настає при ступені заповнення пір метаном від 0,4 до 0,6. Причому, як слід з рисунка 1, цей перелом настає при $T = 295$ К, коли $H = 500$ м. Це означає, що при $H < 500$ м і $\theta > 0,4$ буде мати місце десорбційний процес низької інтенсивності, а при $H > 500$ м – більше інтенсивний

процес. Тобто верогідність заповнення пір метаном більше 40% на глибинах < 500 м більше, ніж на глибинах > 500 м.

Залежність, яка представлена на рисунку 2, апроксимується наступною функцією:

$$A = \operatorname{tg} \alpha = 0.05 \left(\frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\theta - 1.28}{0.17}\right)} - 1 \right) \text{ при } R^2 = 0.99. \quad (7)$$

Вираз (6) визначає величину зміни інтенсивності десорбційного процесу метану у вугільному пласті, а з урахуванням виразу (7) – ступінь заповнення пір метаном. Після підстановки (7) в (6) остаточно функція зміни інтенсивності десорбційного процесу має вигляд:

$$T\Delta S = 0.05 \left(\frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\theta - 1.28}{0.17}\right)} - 1 \right) T + 8.25 \cdot 10^{-14}, \quad (8)$$

де друга складова визначається середнім значенням величини B в таблиці 2.

Із співвідношення (8) випливає, що інтенсивність десорбційного процесу зі зниженням температури, тобто із зменшенням глибини ведення гірських робіт при $\theta > 0.4$ знижується. Це пояснюється тим, що в цих умовах знижується підведення енергії до системи «метан-вугілля» зовні. Враховуючи, що, як видно із рисунка 1, на глибинах $H \leq 500$ м ($T < 295$ К°) ентропійний фактор змінюється незначно, що відповідає низькій інтенсивності десорбційного процесу, яка визначається співвідношенням (8), а при $H > 500$ м більше верогідно те, що через слабку десорбцію та дуже велику енергію сорбційного зв'язку [2], пори будуть прагнути заповнитися метаном майже повністю. А на глибинах більше 500 м, через інтенсивний десорбційний процес, в порах вугілля буде мати місце сорбційна рівновага. При цьому стані, як встановлено вище, найбільш верогідне заповнення пір метаном тільки на 40%. Обумовлено це тим, що на більших глибинах знижується енергія активації десорбції метану як за рахунок підвищення температури, так і за рахунок інтенсифікації конформаційних перебудов молекулярної структури вугілля внаслідок релаксійного процесу її деформування, що призводить до значної активації десорбційного процесу [2].

Обговорення результатів. Термодинамічні дослідження стану адсорбованого у мікроструктурі вугілля метану при його генеруванні у гірському масиві з урахуванням міжмолекулярних взаємодій метану з вугіллям показали наступне.

Основними параметрами, що характеризують вихідний стан адсорбованого в порах вугілля метану є температура зовнішнього середовища при генерації метана – T , яка обумовлена глибиною залягання вугільного пласта – H та ступінь заповнення пір метаном – θ . Результати розрахунку зміни ентропії показали, що в гірському масиві сорбційна рівновага системи «метан-вугілля» найбільше верогідна енергетично при ступені заповнення пір метаном, яка дорівнює 40%. При $\theta < 40\%$ – буде відбуватися незворотний мимовільний процес адсорбції вугіллям метана, а при $\theta > 40\%$ – його десорбція, ступінь інтенсивності якої можна оцінити за співвідношенням (8). Розрахунки також показали, що на глибині залягання вугільного пласта $H \leq 500$ м та $\theta > 40\%$ має місце десорбційний процес низької інтенсивності, а у випадку при $H > 500$ м – більше інтенсивний процес. Тому при генерації метана на глибинах $H \leq 500$ м найімовірніше те, що пори будуть прагнути заповнитися метаном майже повністю. А

при $H > 500$ м вони будуть прагнути до сорбційної рівноваги, тобто будуть заповнені метаном всього на 40%. Решта обсягу газу, що генерована у вугільному пласті на глибинах більше 500 м, в результаті інтенсивного процесу десорбції, мігрує у вміщуючі пласт породи. Зокрема, цей газ заповнює та розширює порожнечі, які зумовлені гладким зчепленням сланців з породами.

Отримані результати важливі тим, що в багатьох випадках їх використання, яке пов'язане з дослідженнями процесів масоперенесення та фільтрації метану у гірському масиві на великих глибинах, можуть принципово змінити знання про ці процеси. Так, наприклад, при розрахунку фільтраційних процесів в області ведення гірських робіт раніше вважалося, що коли $H > 500$ м, пори повністю заповнені метаном і, внаслідок цього, в масиві буде відбуватися десорбція метану у вугіллі, тобто вугілля буде віддавати метан. Внаслідок цього, до фільтраційного потоку вільного метану додавали потік десорбційного метану. А в даній роботі встановлено, що в цьому випадку має місце не десорбція метану, а його адсорбція. Тобто, вугілля буде не віддавати метан, а вбирати його до повного насичення. При цьому, тиск вільного метану у вугіллі буде не збільшуватися, як у першому випадку, а знижуватися. Тільки після цього він буде його віддавати фільтраційному потоку вільного метану. Причому, важливим моментом є те, що координати місця газовіддачі метану будуть вже іншими. Крім того, в деяких випадках, може мати місце не плавний характер газовіддачі метану, як раніше вважалося, а газовіддача буде являти собою раптовий імпульсний процес. Така фізика масоперенесення адсорбованого у вугіллі метану призводить до розуміння того, чому, наприклад, деякі технології провітрювання виробок або способи безпечного ведення гірських робіт є недостатньо ефективними. Використання надалі отриманих результатів дозволить скорегувати існуючі технології вентиляції виробок та способи безпечного ведення гірських робіт на високогазоносних вугільних пластах, розробити принципово нові технології в цьому напрямку, а також виконувати точніші розрахунки запасів метану в різних породах гірського масиву.

Висновки

1. Отримано нові закономірності процесу у гірському масиві на великих глибинах, які полягають в тому, що при масоперенесенні метану у вугіллі першопочатково відбуваються процеси адсорбції вугіллям метану, а тільки після цього його десорбція.

2. При розрахунку фільтраційних процесів в області ведення гірських робіт раніше вважалося, що на глибинах більше 500 м пори повністю заповнені метаном і, внаслідок цього, в масиві буде відбуватися десорбція метану у вугіллі, тому до фільтраційного потоку вільного метану додається потік десорбційного метану. Проте встановлено, що у випадку, що досліджувався, має місце не десорбція метану, а його адсорбція. Тобто, вугілля буде не віддавати метан, а вбирати його до повного насичення. При цьому, тиск вільного метану у вугіллі буде не збільшуватися, як у першому випадку, а знижуватися.

3. Встановлено, що в деяких випадках, може мати місце не плавний характер газовіддачі метану, як раніше вважалося, а газовіддача буде являти собою раптовий імпульсний процес. Така фізика масоперенесення адсорбованого у вугіллі метану призводить до розуміння, чому, наприклад, деякі технології провітрювання виробок або способи безпечного ведення гірських робіт є недостатньо ефективними.

4. Отримані результати дозволять скорегувати існуючі технології вентиляції виробок та способи безпечного ведення гірських робіт на високогазоносних вугільних пластах, а також дозволять виконувати точніші розрахунки наявності метану в різних породах гірського масиву.

Список літератури

1. Бобин В.А. 18 лекций по теории трансформации природной наноструктурной системы «уголь-метан». М.: Библио-Глобус, 2019. 100 с.
2. Минеев С.П. Свойства газонасыщенного угля. Днепропетровск: НГУ, 2009. 220 с.
3. Минеев С.П., Прусова А.А., Корнилов М.Г. Активация десорбции метана в угольных пластах. Днепропетровск: Вебер, 2007. 252 с.
4. Алексеев А.Д. Физика угля и горных процессов. Киев: Наукова думка, 2010. 423 с.
5. Бобин В.А. Структурная трансформация газонасыщенного угольного вещества: Дальнейшее развитие физической химии газоносного угольного пласта. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 116 с.
6. Малышев Ю.Н., Трубецкой К.Н., Айруни А.Т. Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов. М.: Академия горных наук, 2000. 519 с.
7. Васильковский В.А., Чеснокова А.В. Влияние давления метана на его распределение в углях / Вісті Донецького гірничого інституту. 2016. №2 (43). С. 30 - 37.
8. Васильковский В.А., Довбнич М.М., Мендрий Я.В. Параметры адсорбции метана на поверхности ископаемых углей в диапазоне комнатных температур и давлений до 0,1 МПа / Физика и техника высоких давлений. 2016. том. 26, № 1-2. С. 97- 105.
9. Васильковский В.А., Минеев С.П. Распределение и механизмы движения метана в блоках угля / Физико-технические проблемы горного производства. 2017. вып. 19 (14). С. 19-33.
10. Васильковский В.А. Минеев С.П. Некоторые закономерности перемещения метана по фракталам угольного вещества / Геотехническая механика. Днепр: ИГТМ НАНУ, 2018. Вып. 138. С. 93-107. http://nbuv.gov.ua/UJRN/gtm_2018_138_7
11. Васильковский В.А., Стефанович Л.И., Чеснокова О.В. Влияние естественной влажности на характерное время десорбции метана из углей различной стадии метаморфизма / Вісті Донецького гірничого інституту. 2020. №2. С. 23- 32. <http://doi.org/10.31474/1999-98X-2020-2-23-32>
12. Круковская В.В., Молчанов А.Н., Калугина Н.А. Особенности математического моделирования фильтрации метана вблизи тектонических нарушений / Геотехнічна механіка. Днепр: ИГТМ НАНУ, 2015. № 124. С. 115- 127.
13. A. Prusova, O. Minieiev, S. Ryzhova. (2019). Simulation of the desorption process of methane adsorbed in a coal rock, taking into account intermolecular sorption interactions in the system “methane-coal” - Published online 09 July 2019, E3S Web Conf. Volume 109, 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900073>
14. Ульянова Е.В., Васильковский В.А., Малинникова О.Н. Влияние газодинамического явления на сорбционные свойства угля шахты «Краснолиманская» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11. С. 46- 55.
15. Bulat, A.F.; Mineev, S.P.; Prusova, A.A. Generating methane adsorption under relaxation of molecular structure of coal Journal of Mining Science, Jan. 2016, vol.52, no.1, pp. 70-79.
16. Минеев, С.П. Прогноз и способы борьбы с газодинамическими явлениями на шахтах Украины. Мариуполь: Восточный издательский дом, 2016. 258 с.
17. Горные работы в сложных условиях на выбросоопасных угольных пластах /Минеев С.П., Рубинский А.А., Витушко О.В., Радченко А.Г. Донецк: Східний видавничий дім, 2010. 604 с.
18. Мінеєв С.П. Оцінка параметрів зони розвантаження та її використання для безпечного відпрацювання викидонебезпечних вугільних пластів // ISSN 1999-981X Вісті Донецького гірничого інституту. №1 (50), 2022. С. 86- 99. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-1-86-99>
18. Zou, J.; Rezaee, R.; Liu, K. 2017 Effect of Temperature on methane Adsorption in Shale Gas Reservoirs. Energy Fuels, (31), 12081-12092. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02639>
19. Serhii Minieiev, Alla Prusova, Oleksii Yanzhula, Oleksandr Minieiev. The Effect of the Adsorbed Phase of Methane on its Mass Transfer in the Elastic Area of the Rebuff Pressure of the Coal Seam Journal of Mineral and Material Science (JMMS), Volume 2 Issue 1, 2021. Published date: March 29, 2021
20. Vsevolod Vasilkovskiy, Serhii Minieiev* and Nadiia Kaluhina Bonding energy and methane amount at the open surface of metamorphic coal International Conference Essays of Mining Science and Practice, E3S Web of Conferences 109, 00108 (2019), 09 July 2019 DOI <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900108>
21. Метаногенерация в угольных пластах / А.Ф. Булат, С.А. Скипочка, Т.А. Паламарчук и др. Днепропетровск: Лира ЛТД, 2010. 328 с.
22. Myers A. L., Siperstein F. Characterization of adsorbents by energy profile of adsorbed molecules// Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2001. – pp. 73-81.

References

1. Bobyn, V.A., (2019), 18 leksiy po teorii transformatsii prirodnoy nanostrukturnoy sistemy "ugol' – metan" [18 lectures on the theory of transformation of the natural nano structural system «coal-methane»], Biblio-Globus, Moscow, Russia.
2. Minieiev, S.P. (2009), Svoystva gazonasyschennogo uglja [Properties of gas-saturated coal], NMU, Dnepropetrovsk, Ukraine.
3. Minieiev, S.P., Prusova, S.S. and Kornilov, M.G. (2007), Aktivatsiya desorbtsii metana v ugodnykh plastakh [Activation of desorption methane in coal seams], Veber, Donetsk, Ukraine.
4. Aleksieiev, A.D., (2010), Fizika uglja i gornykh protsesov [Physics of coal and mining processes], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
5. Bobyn, V.A., (2014), Strukturnaya transformatsiya gazonasyschennogo ugod'nogo veshchestva: Dal'neysheye razvitiye fizicheskoykhimii gazonosnogo ugod'nogo plasta [Structural transformation of gas saturated coal matter: Further development of the physical chemistry of the gas-bearing coal seam], LAP LAMBERT Academic Publishing
6. Malyshev, Yu.N., Trubietskoy, K.N. and Ayruny, A.T., (2000), Fundamental'no prikladnyye metody resheniya problemy metana ugod'nykh plastov [Fundamentally applied methods for solving the problem of coal bed methane], Academy of Mining Sciences, Moscow, Russia.
7. Vasil'kovskiy, V.A. and Chesnokova, A.V. (2016), "Influence of methane pressure on its distribution in coals", Lead of the Donetsk Mining Institute, vol. 2 (43), pp. 30 – 37.
8. Vasil'kovskiy, V.A., Dovbnich. M.M. and Mendriy Ya.V. (2016), "Parameters of methane adsorption on the surface of fossil coals in the range of room temperatures and pressure, up to 0,1 MPa", Physics and technology of high pressures, vol. 26, no. 1-2, pp. 97-105.
9. Vasil'kovskiy, V.A. and Minieiev, S.P. (2017), "Distribution and mechanisms of methane movement in coal blocks", Physical and technical problems of mining, vol. 19 (14), pp. 19-33/
10. Vasil'kovskiy, V.A. and Minieiev, S.P. (2018), "Some patterns of methane movement along the fractals of coal matter", Geo-Technical Mechanics, no. 138, pp. 93-107.
http://nbuv.gov.ua/UJRN/gtm_2018_138_7
11. Vasil'kovskiy, V.A., Stefanovich, L.I. and Chesnokova, O.V. (2020), "Influence of natural humidity on the characteristic time of methane desorption from coals of different stages of metamorphism", Lead of the Donetsk Mining Institute, vol. 2, pp. 23-32.
<http://doi:10.31474/1999-98X-2020-2-23-32>
12. Krukovskaya, V.V., Molchanov, A.N. and Kalugina, N.A. (2015), "Features of mathematical modeling of methane filtration in the vicinity of tectonic faults", Geo-Technical Mechanics, no. 124, pp. 115-127.
13. A. Prusova, O. Minieiev, S. Ryzhova. (2019). Simulation of the desorption process of methane adsorbed in a coal rock, taking into account intermolecular sorption interactions in the system "methane-coal" - Published online 09 July 2019, E3S Web Conf. Volume 109, 2019.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900073>
14. Ul'yanova, Ye.V., Vasil'kovskiy, V.A. and Malinnikova, O.N. (2018), Influence of the gas-dynamic phenomenon on the sorption properties of coal from the "Krasnolimanskaya" mine", Mining information and analytical bulletin, no. 11, pp. 46-55.
15. Bulat, A.F.; Mineev, S.P.; Prusova, A.A. Generating methane adsorption under relaxation of molecular structure of coal Journal of Mining Science, Jan. 2016, vol.52, no.1, pp. 70-79.
16. Mineev, S.P. (2016), Prognoz i predotvrashcheniye vybrosov uglja i gaza na shakhtakh Ukrainy [Forecast and prevention of coal and gas emissions from Ukrainian mines], Skhidny vidavnychiy Dim, Donetsk, Ukraine.
17. Mineev, S.P., Rubinskiy, A.A., Vitushko, O.V. and Radchenko, A.V. (2010), Gornye raboty v slozhnykh usloviyakh na vybrosoopasnykh plastakh [Mining operations in difficult conditions in the outburst seams], Skhidny vidavnychiy Dim, Donetsk, Ukraine.
18. Zou, J.; Rezaee, R.; Liu, K. 2017 Effect of Temperature on methane Adsorption in Shale Gas Reservoirs. Energy Fuels, (31), 12081-12092.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02639>
19. Serhii Minieiev, Alla Prusova, Oleksii Yanzhula, Oleksandr Minieiev The Effect of the Adsorbed Phase of Methane on its Mass Transfer in the Elastic Area of the Rebuff Pressure of the Coal Seam Journal of Mineral and Material Science (JMMS), Volume 2 Issue 1, 2021. Published date: March 29, 2021
20. Vsevolod Vasilkovskiy, Serhii Minieiev and Nadiia Kaluhina (2019), Bonding energy and methane amount at the open surface of metamorphic coal International Conference Essays of Mining Science and Practice, E3S Web of Conferences 109, 00108 (2019), 09 July 2019 DOI
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900108>

21. Bulat, A.F., Skipochka, S.A. and Palamarchuk, T.A. (2010), Metanogeneratsiya v ugol'nykh plasakh [Methane generation in coal seams], Lira LTD, Dnepropetrovsk, Ukraine.

22. Myers A. L., Siperstein F. (2001), Characterization of adsorbents by energy profile of adsorbed molecules// Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. pp. 73-81.

Надійшла до редакції 10.11.2022

S. Minieiev, A. Prusova, O. Yanzhula, O. Minieiev

ASSESSMENT OF THE SORPTION EQUILIBRIUM OF METHANE DURING ITS GENERATION IN A COAL SEAM

Purpose. Study the adsorption equilibrium of adsorbed during the generation of methane in coal massif to determine the conditions for its implementation at different depths of mining operations.

Methods. The thermodynamic research methodology, numerical calculation methods, mathematical processing of research results using approximation methods.

Results. The entropy change of the «adsorbed methane – coal» system shows that the initial state of adsorbed methane during its generation in a coal seams determined by the depth of the seam and the degree of filling of its pores with methane. The results of the calculation showed, that the sorption equilibrium of the “methane – coal” system in the mountain massif is energetically most probable at the degree of filling of the pores with methane, which is $\theta = 40\%$. When $\theta < 40\%$ an irreversible spontaneous process of adsorption of methane by coal occurs, but when $\theta > 40\%$ – its desorption, the degree intensity of which can be estimated by the ratio obtained in the work. It has been established that at the depth of the coal seam there is only low-intensity process, and at $H > 500$ m – the process is more intensive. Therefore, when methane is generated at depths of $H < 500$ m, it is likely that due to weak desorption and high sorption bond energy, the pores tend to be filled with methane almost completely. When $H > 500$ m they tend to sorption equilibrium, so they are filled with methane by only 40%. The rest of the volume of gas generated in the coal seam at depths greater than 500 m, as a result of an intensive desorption process, migrates into the intervening rock seam.

Scientific novelty. As opposed to a priori accepting opinions about what the initial state of methane adsorbed in coal is always characterized by the complete filling of pores with gas, numerical calculations dedicated to this issue have been performed for the first time in the paper. Calculations are based on modern ideas about the generation of methane in coal with the help of the separation of methyl group and hydrogen atoms from aliphatic fringes, which combine to form methane molecules. At the same time, the dependence of the change in the entropy of the “adsorbed coal – methane” system on the depth of occurrence and the degree of filling of its pores with methane during the generation of methane in the coal seam has been established.

Practical significance. The research results make it possible to obtain fundamentally new regularities of the processes of mass transfer and filtration of methane in the mountain massif at great depths. The use of new laws makes it possible to adjust the existing technologies of mine ventilation and methods of safe mining operations in emission-hazardous and highly gas-bearing coal seams, to develop fundamentally new technologies in this direction, as well as to make more accurate calculations of methane reserves in various rocks of the mountain massif.

Keywords: coal seam, adsorbed methane, thermodynamics, entropy change, sorption equilibrium, saturation of pores with methane, the depth of the reservoir.

Відомості про авторів

Мінєєв Сергій Павлович, доктор технічних наук, професор, завідувач Відділом керування динамічними проявами гірничого тиску, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, sergmineeiev@gmail.com.

Прусова Алла Андріївна, кандидат технічних наук, с.н.с., у Лабораторії дослідження структурних змін гірських порід, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна.

Янжула Олексій Сергійович, кандидат технічних наук, директор з технічного розвитку, капітального будівництва та інвестиціям Вугільної Дирекції СП ВАТ «МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ», м. Покровськ, Донецької обл., Україна.

Мінєєв Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка», МОН України, Дніпро, Україна.

Minieiev Serhii Pavlovych, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Pressure Dynamics Control in Rocs, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine; sergmineeiev@gmail.com.

Prusova Alla Andriivna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Senior Researcher in Laboratory of Researches of the Structural Changes in the Rocks N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine.

Yanzhula Oleksii Serhiiovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Director for Technical Development, Capital Construction and Investments of the Coal Directorate of JV LLC “Metinvest Holding”, Pokrovsk, Ukraine.

Minieiev Oleksandr Serhiiovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, National Technical University Dnipro Polytechnic, Dnipro, Ukraine.

УДК 004.5::628.171.033

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-119-127](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-119-127)

Г.О. Теличко, Д.О. Романенков, Б.Є. Карєв, А.В. Рогожин

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ВОДОПОСТАЧАННЯМ ВІДДАЛЕНОГО СЕЛИЩА

Мета. Модернізація існуючих рішень автоматичного керування водопостачанням віддаленого селища.

Методика. В якості методу досліджень використовувався комплексний підхід щодо аналізу об'єкту проектування, вибору концепції побудови системи управління водопостачанням, використання математичних методів дослідження операцій та опис системи контролю та управління.

Результати. В статті проведено критичний аналіз існуючих сучасних рішень щодо водопостачання віддалених селищ. Визначення водоспоживання води та джерела водопостачання для населення, а саме водозабірні свердловини, розрахунок об'єму водонапірної вежі. Приведено частотні регулювання насосних агрегатів та принципи автоматизації насосних станцій. Встановлено пріоритетні напрямки подальших досліджень із підвищення ефективності водопостачання. Розроблено алгоритм роботи контролю та управління автономного постачання води, створено SCADA систему для контролю стану насосної станції.

Наукова новизна. Запропоновано унікальну систему водопостачання натомість централізованої, створення SCADA системи для контролю поточного стану роботи комплексу.

Практичне значення Оптимізаційна модель системи автоматичного керування водопостачання віддаленого селища із резервним джерелом живлення та контроль системи у режимі реального часу. Це рішення призначені для повного циклу водопостачання, для скорочення витрат. Яке забезпечує безперебійне подання води, оптимізують роботу насосних станцій та адаптують існуючу інфраструктуру до зміни вимог до якості води.

Ключові слова: автоматична система, вода, водопостачання, насос, насосна станція, SCADA система.

Вступ. Для багатьох сіл, селищ, смт України характерна проблема подачі води. За даними моніторингової програми ВООЗ/ЮНІСЕФ тільки 22% населення можуть скористатися централізованим водопостачанням. Буріння свердловин обійдеться приблизно в 10-15 тисяч гривень. Якщо взяти середній дохід селянина, то вартість буріння свердловини для нього зависока. Крім того, якщо врахувати, що на більшій території України якість води верхніх водоносних горизонтів нижча, все через промислові підприємства, ферми (сільське господарство), погану очистку стічних вод. Таким чином, рекомендується, щоб села переходили на централізовану систему водопостачання, яка підключається до гирла колодязів, розташованих на більш глибоких рівнях, що забезпечує доступ до нижчих рівнів ґрунтових вод. Оскільки така вода є повністю відповідна до вимог державних санітарних норм, додаткові етапи очищення води не потрібні. Також використовуються вежі, залежно від колодязя, місцевості та висоти, де розташоване село. Найпоширенішою в українських селах є система, за якою вода тече з колодязя до вежі, а з вежі – до мережі. У більшості випадків система складається з джерела та мережі. Це також буває, коли система складається з кількох елементів танкового угруповання – мережі загального користування, і ці системи незалежні одна від одної. Деякі системи взаємопов'язані. Кожна людина, де б вона не проживала, потребує надійного та якісного постачання чистої води. Але більшість жителів села не можуть забезпечити себе якісною водою. Тому сільські системи водопостачання потребують термінової модернізації, заміни

елементів водопостачання та заходів щодо зменшення втрат чистої питної води через прориви та витіки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Є велика кількість сучасних приладів для створення водопровідних систем. Одна із подібних систем вбудована в с. Суворовське Тульчинського району Вінницької області. Для цього невеликого села характерна система трьох груп, ці групи мають свої свердловини та цистерни, в котрих зберігається вода (вежа Рожновського). Ця мережа поділяється на три етапи:

1 і 2 - Були проведені роботи з технічного обслуговування, встановлення резервуарів для води, встановлення 13 619 метрів трубопроводу для системи;

3 - 8100 метрів труб було встановлено для системи.

Прокладено понад 1200 метрів водопроводу і відбудовано 7000 погонних метрів водопроводу, все це було зроблено мешканцями цього села. Крім того, дві свердловини були переведені для агропромислового комплексу в сільськогосподарські землі. Всього біля села прокладено 41 кілометр трубопроводів, 548 житлових будинків та об'єктів соціально-освітнього призначення стали постачатися питною водою.

Мета статті полягає у модернізації існуючих рішень автоматичного керування водопостачання віддаленого селища. Відповідно до поставленої мети завданнями нашої роботи стали наступні кроки:

- Підбір устаткування автоматизованої системи водопостачання розрахунковим шляхом;

- Розробка структурної схеми насосної станції;

- Розробка схеми обладнання автоматизованої системи водопостачання;

- Розробка SCADA системи.

Методи дослідження. Проведені дослідження ґрунтувались на математичних розрахунках, теорії ймовірностей, сучасних комплексних рішеннях, її недоліків та переваг.

Виклад основного матеріалу. Розрахунки для визначення потреб населення у воді при розробці ПКД згідно з ДБН В.2.5-74:2013. Цей розрахунок враховує всі види водоспоживання.[1]

Загальне водоспоживання населеного пункту пропорційне кількості мешканців. Отже, щоб визначити витрату води, необхідно знати кількість спожитої мешканцем води, яка необхідна йому для побуту та іншої роботи – норму витрати в цілому. Тут враховуються різні цілі, для яких вода може витрачатися, включаючи різний ступінь санітарії, технічне оснащення людей, міську інфраструктуру, погодні умови тощо. Чим вищий рівень санітарно-технічного оснащення, тим більша потреба у воді.^[1]

Відповідно до ДБН, середньодобове споживання чистої води на одну людину в селі становить від 100 до 285 літрів залежно від рівня озеленення та погодних умов. Друге джерело, де можна знайти середньоденну ставку, можна взяти з Національних соціальних стандартів, вони встановили державні норми користування пільгами, відповідно до яких вони субсидують. Водопостачання центральне, без гарячого водопостачання, плата за воду 4,0 м.куб./особа, 1 міс. У розрахунку на добу це становить 133,3 літра на людину. Для визначення витраченої води можна скористатися наступною спрощеною схемою розрахунку.

Для прикладу, було взято:

– кількість мешканців – 3500 населення;

– вода яку споживають – 130 л/добу на одного чоловіка (за стандартами державного соціального стандартами).

Середня витрата води на добу визначається за формулою:

$$Q_{\partial} = \frac{\sum q \times N}{1000}, \text{ м}^3 \text{ за добу} \quad (1)$$

де q – норма води яку споживають;

N – кількість осіб яку визначили.

Розрахуємо водоспоживання:

$$Q_{\partial} = \frac{\sum q \times N}{1000} = \frac{130 \times 3500}{1000} = 455 \text{ м}^3 \text{ за добу} \quad (2)$$

Кількість води, яка використовується для господарсько-питних потреб залежить від пори року. При проектуванні системи також необхідно визначити максимальні витрати на добу. Його можна визначити з урахуванням коефіцієнта нерівномірності. Для населених пунктів використовувати їх добові коефіцієнти нерівномірності [2]:

$$K_{\partial \max} = 1.2 \quad K_{\partial \min} = 0.8$$

Враховуючи коефіцієнти розрахуємо максимальні витрати за день:

$$Q_{\partial \max} = K_{\partial \max} \times Q_{\partial} = 455 \times 1.2 = 546 \text{ м}^3 \text{ за добу.} \quad (3)$$

Найважливішим завданням при проектуванні системи насосної станції є вибір джерела, тому що сам вибір вплине на всю саму систему, схему і склад конструкції, а отже, на вартість будівництва та обслуговування насосної станції. весь мережевий комплекс.

У цій системі як джерело води будуть використовуватися водозабірні свердловини, оскільки вони найбільш використовуються на практиці, що свідчить про ремонтпридатність системи. Крім того, джерело води має високу дебітність, тобто кількість води, яку може виробити колодязь, буде достатньою. Крім того, це джерело має високу якість води.[3]

Якщо розглядати сценарій водопостачання, то в селі насосну станцію можна використовувати і як перший підйом, і як другий підйом, а якщо цього вимагає система, то насосну станцію можна використовувати для підвищення тиску.

Насосні станції та перші елеватори необхідно встановлювати для забору води з колодязів, будівель, що накопичують воду, або коли воду неможливо забрати лише зі сховищ. Використання насосних станцій другої підйомної станції, яка необхідна для надходження води до споживачів, забирає її з водосховища. Насосні станції, що підвищують тиск в системі, повинні бути встановлені в окремих частинах системи (житлових будинках) для підвищення тиску, і вони зазвичай використовуються для внутрішнього протипожежного захисту в деяких громадських і промислових будівлях.[4]

Свердловинний насос встановлюється в свердловину на водопровід. Колодязі повинні бути чистими і справними. Бювет повинен добре провітрюватися, щоб у ньому було сухо.[5]

Тому нам знадобляться глибинні насоси та горизонтальні насоси для заповнення веж із двонаправленим входом води до споживачів.

Тиск в системі. Рекомендовано визначати тиск мережі згідно з вимогами ДБН В.2.5-74:2013, та нормувати наступні показники. При цьому тиск в системі на першому

поверхі має бути не нижче 1 атмосфери, а потім підвищуватися на 0,4 атмосфери для кожного поверху. Тиск подачі води не повинен перевищувати 4,5 атмосфер. Насосна станція всієї системи повинна забезпечувати достатній тиск.

Візьмемо розраховану максимальну витрачену воду за день:

$$Q_d = 546 \text{ м}^3 \text{ за день (за формулою 3)}$$

Вода, яка витрачається на пожежі (зовнішня пожежа та внутрішня пожежа) становлять:

$$Q_{\text{пож}} = (10 + 5) = 15 \text{ л / с} = 54 \text{ м}^3 / \text{год} \quad (4)$$

Розрахуємо обсяг води при тушінні пожежу протягом 10 хвилин:

$$\omega_{\text{пож}} = \frac{54 \times 10}{60} = 9 \text{ м}^3 \quad (5)$$

Об'єм має бути 10% від денної витрати:

$$W_{\text{бапти}} = (0,10 \times 546) + 9 = 63,6 \text{ м}^3 \quad (6)$$

В результаті розрахунку, потребується водяна вежа із пластику ємністю 65 м³.

На рисунку 1 показана структура насосних станцій. За допомогою датчика рівня води регулюються правильні пороги включення насоса. Датчики тиску підтримують тиск в заданому діапазоні, за рахунок чого знижується навантаження на гідромережу. Зменшується сила гідроударів при пуску та зупинці насоса. Зменшується навантаження на електромережу. Насос споживає лише ту частину енергії, яка йому потрібна, що призводить до підвищення ККД всієї системи. Крім того, завдяки датчикам тиску отримують інформацію про пориви на певних ділянках.

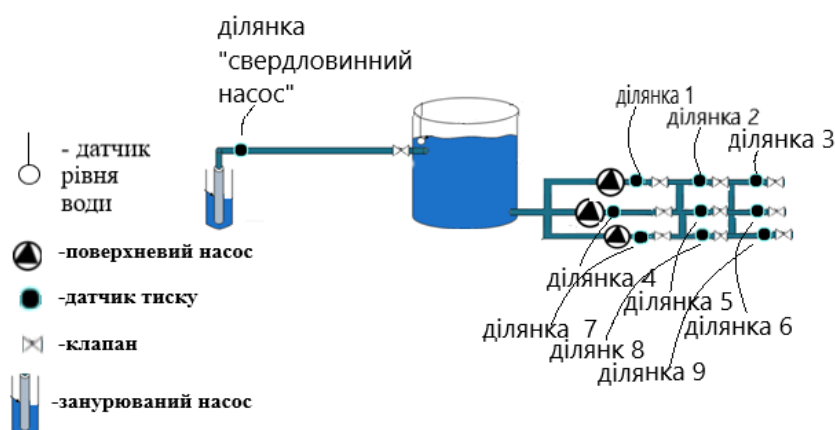


Рисунок 1 – Структура насосної станції

Опис автоматизованого процесу виглядає наступним чином. Контролер ПЛК100-220 управляє насосною станцією за сигналом від датчика тиску ПД100И, розташованого на виході насосної станції. Контролер забезпечує можливість вибору режиму роботи: ручний/автоматичний/дистанційний.

контролера PLC-100. Застосування радіомодемів дозволяє досягти стабільного високошвидкісного зв'язку між обладнанням розподільного пункту системи водопостачання та обладнанням резервуарів і колодязів.

За основу створення SCADA-системи обрано програму Vijeo Citect. Програма підтримує широкий спектр пристроїв Schneider Electric, а також контролери інших виробників ПЛК. Він має велику колекцію символів промислового обладнання, створюючи графічні екрани. Дозволяє створювати і налагоджувати повноцінні проекти без покупки ліцензії.^{[6][7]}

На рисунку 3 приведена SCADA система насосної станції.

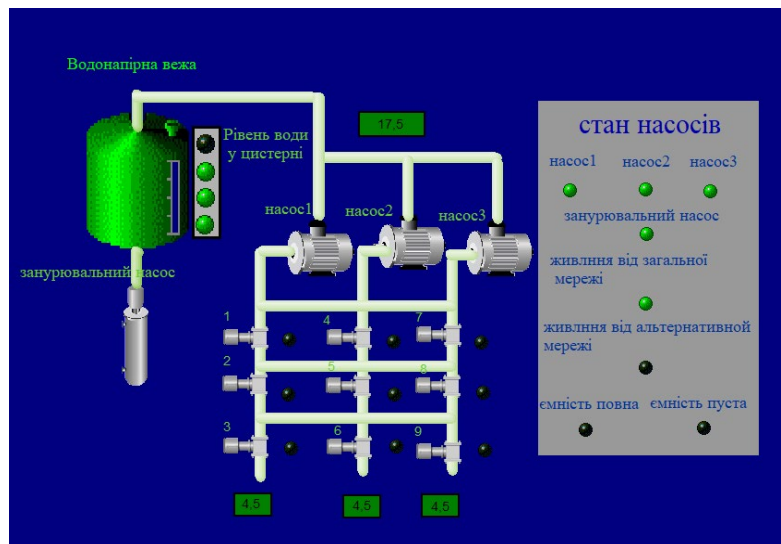


Рисунок 3 – SCADA система насосної станції

На рисунку 3 ми бачимо рівень води в резервуарі, стан поплавкових датчиків рівня (верхній, нижній і два середніх - зліва від резервуара), стан усіх трьох насосів, коли горить червоне світло увімк., несправність насоса, послідовність запуску, тиск води на вході та виході насосної станції, налаштування рівня води (сигнал тривоги повна/порожня ємність), живлення системи (від нормального чи додаткового).

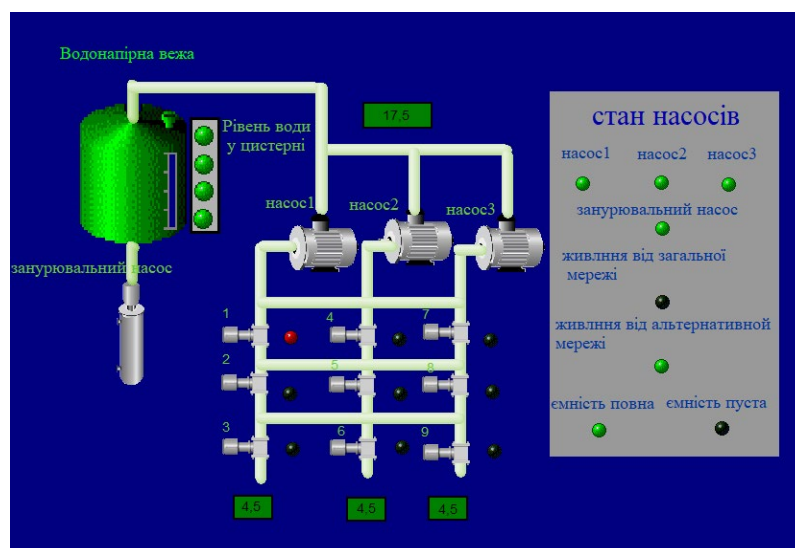


Рисунок 4 – Стан системи при додатковому живленні

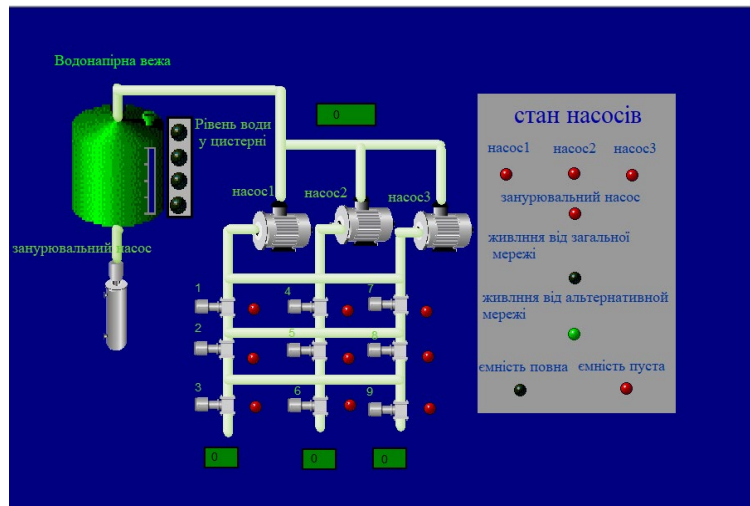


Рисунок 5 – Аварійний стан системи

На рисунках 4 і 5 показано стан системи. На малюнку 4 показано частковий аварійний стан системи, коли живлення береться з інших джерел. На рисунку 5 показано повністю аварійну систему, коли в системі немає диска, живлення або води.

Висновок. В роботі авторами проведено аналіз найбільш поширених на сьогоднішній день проблем з водопостачання у віддалених селищах. Проведено критичний аналіз існуючих сучасних рішень щодо водопостачання віддалених селищ. Визначено водоспоживання води та джерела водопостачання для населення, а саме водозабірні свердловини, розрахунок об'єму водонапірної вежі. Також в статті наведено частотні регулювання насосних агрегатів та принципи автоматизації насосних станцій. Встановлено пріоритетні напрямки подальших досліджень із підвищення ефективності водопостачання. Розроблено алгоритм роботи контролю та управління автономного постачання води, створено SCADA систему для контролю стану насосної станції, її відпрацювань при різних вхідних показниках.

Список літератури

1. О. Оглобля, Г. Пархомович, О. Буланій, Г. Чепурна, В. Чванова, О. Гороховська, С. Краток, О. Куколь. Державні будівельні норми України. Водопостачання зовнішні мережі та споруди основні положення проектування дбн в.2.5-74:2013
2. Бондар О.А., Кавун А.В., Кірсанова Ю.В., Козак В.І., Копитін А.М., Сороковський В.Є. Сільське питне водопостачання: від ідеї – до реалізації. Як створити централізовану систему водопостачання децентралізованим способом [методичний посібник]
URL: https://despro.org.ua/upload/medialibrary/Despro_voda_print.pdf
3. Бондар О.А., Кавун А.В., Кірсанова Ю.В., Козак В.І., Копитін А.М., Сороковський В.Є. Сільське питне водопостачання: від ідеї – до реалізації. Як створити централізовану систему водопостачання децентралізованим способом [методичний посібник] С.18-22 URL: https://despro.org.ua/upload/medialibrary/Despro_voda_print.pdf
4. Бондар О.А., Кавун А.В., Кірсанова Ю.В., Козак В.І., Копитін А.М., Сороковський В.Є. Сільське питне водопостачання: від ідеї – до реалізації. Як створити централізовану систему водопостачання децентралізованим способом [методичний посібник] С.23-28 URL: https://despro.org.ua/upload/medialibrary/Despro_voda_print.pdf
5. Бондар О.А., Кавун А.В., Кірсанова Ю.В., Козак В.І., Копитін А.М., Сороковський В.Є. Сільське питне водопостачання: від ідеї – до реалізації. Як створити централізовану систему водопостачання децентралізованим способом [методичний посібник] С.36-37 URL: https://despro.org.ua/upload/medialibrary/Despro_voda_print.pdf
6. Пьявченко Т.А. Проектирование АСУТП в SCADA-СИСТЕМЕ : навч. посіб. Таганрог, 2007.

84 с.

7. Давыдов В.Г. Система супервизорного управления Vijeo Citect. Базовый курс : навч. посіб. Санкт-Петербург, 2011. 315 с.

References

1. O. Ohloblia, H. Parkhomovych, O. Bulanyi, H. Chepurna, V. Chvanova, O. Horokhovska, S. Kratok, O. Kukol. Derzhavni budivelni normy ukrainy. Vodopostachannya zovnishni merezhi ta sporudy osnovni polozhennya proektuvannya dbn v.2.5-74:2013
2. Bondar O.A., Kavun A.V., Kirsanova Y.V., Kozak V.I., Kopytin A.M., Sorokovsky V.Ie. Silske pytne vodopostachannya: vid idei – do realizacii. Yak stvoryty tsentralizovanu systemu vodopostachannya detsentralizovanyim sposobom [metodychni posibnyk] URL: https://despro.org.ua/upload/medialibrary/Despro_voda_print.pdf
3. Bondar O.A., Kavun A.V., Kirsanova Y.V., Kozak V.I., Kopytin A.M., Sorokovsky V.Ie. Silske pytne vodopostachannya: vid idei – do realizacii. Yak stvoryty tsentralizovanu systemu vodopostachannya detsentralizovanyim sposobom [metodychni posibnyk] S.18-22 URL: https://despro.org.ua/upload/medialibrary/Despro_voda_print.pdf
4. Bondar O.A., Kavun A.V., Kirsanova Y.V., Kozak V.I., Kopytin A.M., Sorokovsky V.Ie. Silske pytne vodopostachannya: vid idei – do realizacii. Yak stvoryty tsentralizovanu systemu vodopostachannya detsentralizovanyim sposobom [metodychni posibnyk] S.23-28 URL: https://despro.org.ua/upload/medialibrary/Despro_voda_print.pdf
5. Bondar O.A., Kavun A.V., Kirsanova Y.V., Kozak V.I., Kopytin A.M., Sorokovsky V.Ie. Silske pytne vodopostachannya: vid idei – do realizacii. Yak stvoryty tsentralizovanu systemu vodopostachannya detsentralizovanyim sposobom [metodychni posibnyk] S.36-37 URL: https://despro.org.ua/upload/medialibrary/Despro_voda_print.pdf
6. Piavchenko T.A. Proektirovanie ASUTP v SCADA-SYSTEME : navch. posib. Tahanroh, 2007. 84 s.
7. Davydov V.H. Systema supervyzornoho upravleniya Vijeo Citect. Bazovyj kurs : navch. posib. Sankt-Peterburg, 2011. 315 s.

Надійшла до редакції 25.10.2022

H. Telychko, D. Romanenkov, B. Kariev, A. Rogozhyn

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC WATER SUPPLY CONTROL SYSTEM FOR A REMOTE VILLAGE

Purpose. Modernization of existing solutions for automatic control of water supply in a remote village.

Methodology. The integrated approach to analyze the design object, to choose of the concept of building a water supply management system, to use mathematical methods for the study of operations, and the description of the control and management system have been used for the research.

Results. The article provides a critical analysis of existing modern solutions for water supply in remote villages. Water consumption and water supply sources for the population, namely water intake wells, and calculation of the volume of the water tower, have been determined. Frequency regulation of pumping units and principles of automation of pumping stations have also been given. Priority directions for further research to improve the efficiency of water supply has been established. An algorithm for monitoring and controlling of autonomous water supply has been developed, and a SCADA system has been created to monitor the status of the pumping station.

Scientific novelty. A unique water supply system has been proposed instead of the centralized one. A SCADA system to control the current state of the complex has been created.

Practical significance. Optimization model of the automatic control system of the water supply of a remote village with a backup power supply and real-time control of the system. This solution has been designed for the full cycle of water supply, to reduce costs. It ensures uninterrupted water supply, optimize the operation of pumping stations and adapt the existing infrastructure to changing water quality requirements.

Keywords: automatic system, water, water supply, pump, pumping station, SCADA system.

Відомості про авторів

Теличко Ганна Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та телекомунікацій ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; hanna.telychko@donntu.edu.ua

Романенков Дмитро Олегович, студент ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., Україна; dmytro.romanenkov.kita@donntu.edu.ua

Карєв Богдан Євгенович, студент ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., Україна; bohdan.kariev.kita@donntu.edu.ua

Рогожин Андрій Володимирович, студент ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., Україна; andrii.rohozhyhyn.kita@donntu.edu.ua

Telychko Hanna, PhD, Docent of Automation and Telecommunications Department, Donetsk National Technical University; hanna.telychko@donntu.edu.ua

Romanenkov Dmytro, student of SHEI 'Donetsk National Technical University', Shybankova sq., 2, Pokrovsk, Ukraine; dmytro.romanenkov.kita@donntu.edu.ua

Kariev Bohdan, student of SHEI 'Donetsk National Technical University', Shybankova sq., 2, Pokrovsk, Ukraine; bohdan.kariev.kita@donntu.edu.ua

Rogozhyhyn Andrii, student of SHEI 'Donetsk National Technical University', Shybankova sq., 2, Pokrovsk, Ukraine; andrii.rohozhyhyn.kita@donntu.edu.ua

УДК 622.228 + [662.97:621.571.22]

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-128-139](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-128-139)

Д.В. Рудаков, Ядзюнь Сунь, І.О. Садовенко, О.В. Інкін

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЗАКРИТИХ ШАХТ ДОНЕЦЬКОГО ТА РУРСЬКОГО ВУГІЛЬНИХ БАСЕЙНІВ

Мета. Виконання порівняльного аналізу геотермального потенціалу закритих шахт регіонів Донбасу і Руру з точки зору ефективності експлуатації геотермальних систем різних типів.

Методика. Запропонований підхід включає ранжування закритих шахт Рурського (Німеччина) та Донецького (Україна) вугільних басейнів за основними параметрами ефективності геотермальних систем: максимальна та корисна теплова потужність, коефіцієнт перетворення теплових насосів СОР; енергетична ефективність вилучення тепла. Останній параметр, уведений авторами раніше, визначається як відношення виробленої теплової енергії до теплового еквівалента електроенергії, необхідної для роботи теплового насоса і циркуляції теплоносія.

Результати. Середня очікувана теплова потужність геотермальних систем відкритого типу на водовідливах шахт Німеччини вище аналогічного показника для обраних водовідливів в Україні при децю нижчих показниках ефективності вилучення тепла шахтних вод порівняно з водовідливами у Донбасі. Середня очікувана теплова потужність геотермальних систем закритого типу на основі коаксіальних зондів за сучасного рівня води у шахтах двох басейнів оцінена у діапазоні 30-34 кВт, причому середні показники ефективності вилучення геотермального тепла на шахтах двох басейнів відрізняються не більше ніж 5%, при цьому для шахт Донбасу характерний більший розкид показників по окремим шахтам. Подібність умов експлуатації та показників енергоефективності геотермальних систем, оцінених для двох басейнів дозволяє показує можливість та потенціал експлуатації таких систем в Україні.

Наукова новизна. Обґрунтовано та реалізовано підхід до ранжування закритих шахт відповідно до їх геотермального потенціалу на основі параметрів ефективності вилучення тепла з шахтних вод. Розроблений підхід дозволяє визначати перспективні ділянки встановлення геотермальних систем різних типів на непрацюючих шахтах.

Практична значимість. Запропонований підхід дозволяє попередньо оцінювати діапазони показників ефективної експлуатації геотермальних систем різних типів з визначенням найбільш перспективних ділянок для подальших детальних техніко-економічних обґрунтувань.

Ключові слова: закрити шахти; теплова енергія; шахтні води; геотермальні системи; енергоефективність.

Вступ. Сучасна світова економічна та енергетична криза, залежність багатьох країн від імпорту викопних паливно-енергетичних ресурсів гостро ставить питання про їх раціональне використання. Світові тенденції розвитку енергетики свідчать про зменшення видобутку і споживання вугілля на тлі зростання частки альтернативних джерел енергозабезпечення. Одним з пріоритетних напрямів розвитку сучасних «зелених» технологій є геотермальна енергетика, яка відповідає глобальним цілям сталого розвитку ООН, у тому числі таким, як боротьба зі зміною клімату, інновація і інфраструктура, чиста енергія, чиста вода.

Державна політика України з енергоресурсозбереження передбачає суттєве розширення обсягів використання нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії з урахуванням екологічної складової. Відповідно до положень «Енергетичної стратегії України на період до 2030 р.», проблемам енергозбереження, використанню геотермальної енергії і, відповідно, зменшенню техногенного навантаження на навколишнє середовище приділяється велика увага. В найближчі роки має бути забезпечена економія традиційних паливно-енергетичних ресурсів на рівні 8-10% від їх загального споживання за рахунок закриття теплових електростанцій, що буде супроводжуватися скороченням вугільної індустрії. Крім того, через різке скорочення імпорту традиційних енергоносіїв з початку військових дій, пошук альтернативних джерел теплової енергії в післявоєнний період відновлення України набуде особливої

важливості. У цих умовах дуже актуальним стає питання ефективного використання геотермального потенціалу закритих шахт, завдяки чому можуть бути зекономлені значні кошти державного бюджету на теплопостачання шахтарських міст та відновлення екологічного стану вугледобувних регіонів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання тепла шахтних вод, які накопичуються в залишених після видобутку підземних виробках, все більше поширюється у колишніх вугледобувних басейнах Європи, що дозволяє зменшити споживання викопного палива в рамках розвитку «зеленої енергетики». За даними на 2020 р., у світі експлуатувалися близько 30 геотермальних систем на непрацюючих шахтах тепловою потужністю 0,35 – 4,6 МВт, значна кількість яких встановлена у Рурському вугільному басейні Німеччини [1 – 8]. Освоєння теплової енергії цих шахт відбувається геотермальними системами як відкритого, так і закритого типу. Системи відкритого типу безпосередньо відкачують шахтні води на денну поверхню, попереджуючи підтоплення прилеглих територій, і за допомогою теплових насосів відбирають тепло та скидаються у поверхневі водотоки (безповоротні системи) або назад у шахту подальше від місця відбору (циркуляційні системи). Системи закритого типу використовують енергетичний потенціал непрацюючих шахт тепловими насосами, з'єднаними з геотермальними зондами різних конструкцій (одинарними чи здвоєними U-подібними або коаксіальними), які встановлені у зону обводнення або закладення шахти.

Теплова енергія, яка видобувається різними геотермальними системами із закритих шахт Рурського басейну (Рура), успішно використовується для опалення офісних, житлових та адміністративних приміщень, музеїв, шкіл, університетів та басейнів. При цьому теплова потужність цих систем змінюється у досить широких межах. Так, потужність системи, розташованої біля шахти Hambach, яка використовує шахтні води з температурою 22 – 29 °С, сягає 1,5 МВт, що дозволяє опалювати значну кількість офісних приміщень та школи [1]. Потужність системи на шахті Wettelrode з температурою води 12 – 13 °С не перевищує 50 кВт, чого достатньо для опалення гірничого музею загальною площею всього 400 м². Обидві системи характеризуються привабливими техніко-економічними показниками експлуатації протягом тривалого періоду часу. Отже, німецький науково-практичний досвід використання геотермального потенціалу закритих шахт для опалення будівель показує можливість реалізації і рентабельність цієї геотехнології залежно від місцевих умов та теплових потреб.

На теплову потужність геотермальних систем впливає комплекс технологічних (глибина відбору, витрата теплоносія, конструкція системи), гірничотехнічних (розмір зони обводнення та засипки шахти) та термічних чинників (тепловий потік, коефіцієнт теплопровідності порід) факторів. Ґрунтовний огляд цих чинників для Рурського басейну наведено у [1], що включає дані про потужність зон обводнення та закладення виробок закритих шахт цього регіону. Розподіл температури гірських порід на глибині 5 км на території цього басейну представлено у [9] (рис. 1). Дослідження українських експертів [10, 11] дозволили авторам визначити аналогічні параметри для шахт Донбасу, а геотермічні умови оцінювались на досліджень геотермічного потоку [12].

У табл. 1 узагальнено діапазони значень найважливіших параметрів для оцінки геотермального потенціалу закритих шахт Донецького та Рурського вугільних басейнів. На даний час значна частина шахт в Україні знаходиться ще на початковій стадії закриття, тому їх гірничі виробки ще не повністю закладені, отже, дані про потужність зони закладення на шахтах Донбасу обмежені та неповні, тому не використовуються нами в подальших оцінках.

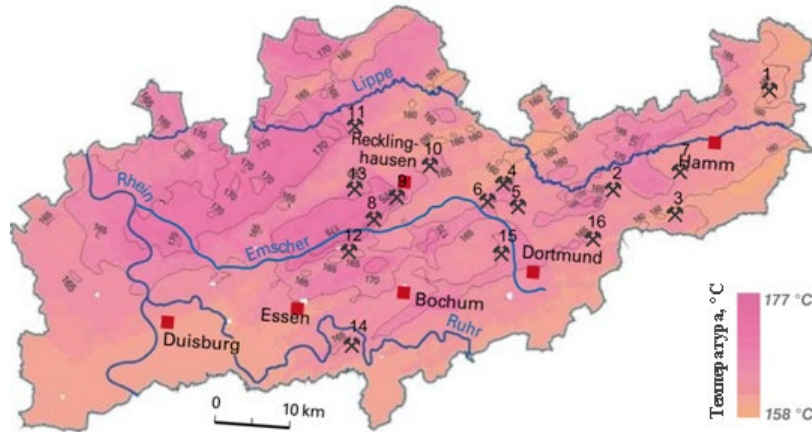


Рисунок 1 – Розподіл температури гірських порід на глибини 5 км в Рурській області, та розташування закритих шахт: 1) Westfalen 1, 2, 6 und 7; 2) Grimberg 3; 3) Königsborn 4; 4) Waltrop 1, 2 und 3; 5) Minister Achenbach 1 und 7; 6) Ickern 3; 7) Haus Aden 6; 8) Ewald 3 und 5; 9) General Blumenthal 6, 8 und 11; 10) Ewald Fortsetzung 1 und 3; 11) Auguste Victoria 8 und 9; 12) Consol 9; 13) Schlägel Eisen 5; 14) Wetterschacht Altendorf; 15) Hansa 2 und 3; 16) Kurl 1

Згідно [12], на більшій частині Донбасу (приблизно на 2/3 території) геотермальний потік не перевищує 50 мВт/м^2 , що переважно стосується Кальміус-Торецької та Бахмутської западин. Уздовж північних і південних крайових розломів простягаються зони з високими показниками потоку $60\text{-}70 \text{ мВт/м}^2$. Максимальні значення $70\text{-}80 \text{ мВт/м}^2$ припадають на головну антикліналь в південно-західній частині. Розглянуті нами 27 закритих шахт знаходяться в районах з різним геотермічним потоком. Так, шахти на північному сході (Первомайська, Бежанівська) розташовані в районах з найменшим геотермальним потоком $45\text{-}50 \text{ мВт/м}^2$; шахти в південно-східній частині поблизу м. Покровськ (Селидівська, Новогродівська-2 та інші) знаходяться в зоні з більш високим потоком до 55 мВт/м^2 ; шахти з найвищим геотермальним потоком знаходяться в центральній частині північного Донбасу (ім. Гагаріна, Гаєвого та інші) зі значеннями понад 65 мВт/м^2 .

Температура гірських порід та, як наслідок, геотермічний потік в Рурській області (рис. 1, табл. 1) зазвичай зростає з півдня на північ, при цьому локальні зони підвищеної температури визначені в регіонах долин річок Lippe та Emscher на захід від м. Recklinghausen. Окремі зони підвищеної глибинної температури порід зустрічаються в районах міст Dortmund і Bochum. Тому шахтами з максимально високою температурою порід є Waltrop, Ewald, General Blumenthal, Ewald Fortsetzung та Auguste Victoria. В цілому, різниця між мінімальною та максимальною температурою порід на глибині 5 км в Рурському басейні незначна і не перевищує 7 %, тому геотермальні умови цього регіону можна вважати відносно однорідними.

Виконаний аналіз гірничотехнічних та геотермальних умов закритих шахт Донецького та Рурського вугільного басейну дозволяє зробити висновок про їх загальну схожість, разом з більш високою неоднорідністю геотермальних умов Донбасу та переважно більшою глибиною гірничих виробок шах у Рурі. Крім того, відзначається більша потужність зон затоплення шахт в Рурській області. Рівень води на непрацюючих шахтах Донбасу часто мав неконтрольовану динаміку підйому, а його значення були відомі лише для певних періодів часу.

Таблиця 1 – Основні вхідні параметри для оцінки геотермального потенціалу закритих шахт Рурського регіону та Донбасу

Параметр	Розмірність	Донбас	Рур
Геотермічний градієнт	°C/м	0,027 – 0,039	0,03 – 0,035
Максимальна глибина шахти	м	307 – 1200	410 – 1630
Потужність зони затоплення	м	57 – 930	210 – 980
Потужність зони засипки	м	Невідома	200 – 1070

Постановка завдання. Враховуючи актуальність розробки наявного геотермального ресурсу закритих шахт, позитивний науково-практичний досвід його освоєння протягом тривалого періоду часу у Рурському вугільному басейні та загальну схожість гірничотехнічних та геотермальних умов шахт Донбасу та Рура, **метою даної роботи** є виконання порівняльного аналізу використання геотермального потенціалу закритих шахт цих регіонів на основі параметрів, які характеризують ефективність роботи геотермальних систем різних типів.

Методи дослідження. Порівняння геотермальних потенціалів затоплених шахт двох вугільних басейнів було виконано за допомогою кількох параметрів, що кількісно характеризують енергетичну ефективність теплових систем.

Поширеним параметром, за яким часто роблять попередні висновки щодо потенційної ефективності геотермальних систем, є їх максимальна теплова потужність $P_{hp,max}$. Цей параметр змінюється в діапазоні від 5 до 3600 кВт у встановлених системах відкритого типу та до 65 кВт у системах закритого типу [1 – 8]. Він істотно залежить від температури, витрати та об'ємної теплоємності теплоносія при виході на денну поверхню, і є універсальним, оскільки застосовний для систем відкритого та закритого типу. Максимальна теплова потужність визначається за формулою

$$P_{hp,max} = Q C_f \rho_f (T_{mw,in} - T_0), \quad (1)$$

де Q , C_f , ρ_f – відповідно витрата, питома масова теплоємність і щільність шахтної води або теплоносія у геотермальному зонді, який подається в тепловий насос; $T_{mw,in}$ – температура води (теплоносія), яка надходить до насоса; T_0 – температура води (теплоносія) на виході з теплового насоса.

Більш універсальним показником, який може бути використаний для оцінки ефективності геотермальних систем, є запропонований авторами енергетичний параметр ξ_E , що визначається як відношення отриманої від системи теплової енергії до теплового еквіваленту електричної енергії, що витрачається на роботу теплових насосів і транспортування теплоносіїв:

$$\xi_E = \frac{P_{hp,max} \Delta t_{op} - U_{tr}}{\omega (P_{hp,el} + P_{tr,el}) \Delta t_{op}}, \quad (2)$$

де Δt_{op} – час експлуатації геотермальної системи (опалювального сезону); U_{tr} – втрати теплової енергії при транспортуванні; $P_{hp,el}$, $P_{tr,el}$ – електрична потужність необхідна для роботи теплових насосів та транспортування тепла до споживачів; ω – тепловий еквівалент електричної енергії:

$$\omega = \frac{\eta_h}{\eta_{TRP}},$$

де η_{TRP} – коефіцієнт корисної дії (ККД) ТЕС, η_h – ККД опалювальної системи.

Вважається, що потрібна для роботи електроенергія виробляється при спалюванні

викопного палива (вугілля чи газу), а теплова потужність, створена на основі шахтної води або теплоносія, порівнюється з тепловою потужністю відповідного виду палива. Цей параметр детально обґрунтований у [13] і згідно з виконаними розрахунками для реальних умов варіює в інтервалі 0,8-4,2. Параметр ξ_E пропонується застосовувати для ранжування закритих шахт щодо ефективності використання їх теплового ресурсу. Виходячи з фізичної суті параметра ξ_E , можна сформулювати критерій енергетичної ефективності геотермальної системи: вона буде енергетично ефективним у разі $\xi_E > 1$.

Поряд із широко розповсюдженою максимальною тепловою потужністю P_{th} геотермальних систем існує параметр їх корисної теплової потужності $P_{hp,us}$, що характеризує кількість теплової енергії яка виробляється геотермальною системою за вирахуванням втрат теплового еквіваленту електричної енергії, що витрачається на роботу теплових насосів і транспортування теплоносіїв. Цей параметр визначається з наступного виразу

$$P_{hp,us} = P_{hp,max} - \frac{P_{hp,el} + P_{tr,el}}{\omega}, \quad (3)$$

Теплова енергія, що надходить з відкритих і закритих геотермальних систем, використовується в теплових насосах в якості низькопотенційного джерела тепла. Ефективність їхньої роботи оцінюється за допомогою коефіцієнта перетворення (англ. Coefficient of Performance, далі – COP), який залежить від температури теплоносія і температури в системі опалення будівель, і змінюється на практиці переважно від 2,5 до 6 [14]. Даний параметр характеризує роботу тільки самих теплових насосів, але оскільки він враховує температуру теплоносія, цей коефіцієнт може бути використаний для порівняння геотермальних систем різних типів за умови однакової температури в системах опалення. Теоретично досяжний COP визначається з виразу

$$COP = \eta_{hp} \frac{T_h}{T_h - T_{mw,in}}, \quad (4)$$

де η_{hp} – коефіцієнт ефективності (термогідродинамічної досконалості або ККД) теплового насоса; T_h – температура в системі опалення будівель, до якої треба підігріти теплоносії в тепловому насосі.

Методики розрахунку параметрів ефективності відкритих та закритих геотермальних систем були представлені у [15, 16].

Виклад основного матеріалу. Параметри, які характеризують ефективність роботи геотермальних систем на базі непрацюючих шахт (максимальна та корисна теплова потужність, енергетичний критерій та коефіцієнт перетворення теплового насосу) були розраховані за формулами (1) – (4) для шахт Рурського та Донецького вугільного басейну.

Параметри ефективності безповоротних геотермальних систем відкритого типу розраховувались для 8 шахтних водовідливів у Рурі та районі Ibbenbüren (Heinrich – позначено далі 1Рв; Robert Müser – 2Рв; Friedlicher Nachbar – 3Рв; Naus Aden – 4Рв; Walsum – 5Рв; Lohberg – 6Рв; Ibbenbüren Ostfeld – 7Рв; Ibbenbüren Westfeld – 8Рв) та Донбасу на шахтах: Новогродівська 1-3 (позначений далі як 1Дв); Артема – 2Дв; Голубовська – 3Дв; Кірова – 4Дв; Леніна – 5Дв; Вуглегірська – 6Дв; Полтавська – 7Дв; Червоний Профінтерн – 8Дв.

Параметри систем закритого типу розраховувались для 28 шахт у Рурі (1Рз – Westfalen 2; 2Рз – Grimberg 3; 3Рз – Westfalen 6; 4Рз – Königsborn 4; 5Рз – Westfalen 1;

6Pз – Waltrop 3; 7Pз – Minister Achenbach 1; 8Pз – Minister Achenbach 7; 9Pз – Ickern; 10Pз – Haus Aden 6; 11Pз – Ewald 5; 12Pз – General Blumenthal 8; 13Pз – Ewald Fortsetzung 3; 14Pз – Auguste Victoria 8; 15Pз – Auguste Victoria 9; 16Pз – Ewald 3; 17Pз – Consol 9; 18Pз – Schlägel & Eisen 5; 19Pз – Westfalen 7; 20Pз – Wetterschacht Altendorf; 21Pз – Waltrop 1; 22Pз – Hansa 3; 23Pз – Waltrop 2; 24Pз – General Blumenthal 11; 25Pз – General Blumenthal 6; 26Pз – Hansa 2; 27Pз – Ewald Fortsetzung 1; 28Pз – Kurl 1) та 27 шахт Донбасу (1Дз – Селидівська; 2Дз – Новогродівська 2; 3Дз – Коротченко Д.С.; 4Дз – Ізотов; 5Дз – Олександр Захід; 6Дз – Кондратьєвка; 7Дз – Вуглегірська; 8Дз – Булавінська; 9Дз – Ольховацька; 10Дз – Румянцева; 11Дз – Артем; 12Дз – Гагарін; 13Дз – Комсомолець Донбасу; 14Дз – Леніна; 15Дз – Кочегарка; 16Дз – Карл Маркс; 17Дз – Червоний Профінтерн; 18Дз – Полтавська; 19Дз – Єнакіївська; 20Дз – Родіна; 21Дз – Первомайська; 22Дз – Кірова; 23Дз – Сокологорівка; 24Дз – Голубовська; 25Дз – Бежанівська; 26Дз – Гасвої; 27Дз – 60 років Радянської України).

При розрахунку параметрів ефективності роботи безповоротних геотермальних систем відкритого типу на шахтах Рурського та Донецького басейна використовувалися дані, наведені в табл. 2, а також такі значення теплофізичних та інших параметрів: $C_f = 4,2 \cdot 10^6$ Дж/м³·°C; $T_0 = 6$ °C; $\Delta t_{top} = 150$ діб; $\eta_{TRP} = 0,6$; $\eta_h = 0,95$; $\eta_{hp} = 0,5$; $T_h = 55$ °C.

При розрахунку параметрів ефективності роботи геотермальних систем закритого типу передбачалося, що коаксіальні зонди будуть встановлені в зону затоплення шахти, а одинарні U-подібні – в зону закладення. Через відсутність даних про потужність зони закладення виробленого простору на шахтах Донбасу розрахунки для цього випадку не проводилися. Діапазон значень величин, які використовувалися при розрахунках параметрів роботи систем закритого типу по формулам (1) – (4), наведено у табл. 1, індивідуальні значення цих величин для кожної шахти наведено у роботах [1, 17] для Рура та [11 – 13] – для Донбасу.

Обговорення результатів. Середнє значення корисної теплової потужності геотермальних систем на шахтах Рура у 21,1 МВт в кілька разів більше значення цього параметра на шахтах Донбасу у 5,6 МВт (рис. 2), що пояснюється набагато більшим значенням середньої витрати на німецьких водовідливах (12,5 млн. м³/рік) у порівнянні з вибраними для аналізу водовідливами в Україні (3,3 млн. м³/рік). Зазначимо, що більша середня теплова потужність геотермальних систем у Німеччині обумовлена переважно водовідливом Lohberg, який планується до експлуатації з 2035 р. і для якого корисна теплова потужність оцінюється у 83,3 МВт завдяки великій витраті (34,8 млн. м³/рік) та відносно високій температурі шахтних вод (понад 30 °C). Без урахування цього оцінюваний тепловий потенціал водовідливів у Німеччині приблизно удвічі вище, ніж для проаналізованих водовідливів в Україні.

Середні значення коефіцієнта перетворення теплового насоса та енергетичного критерію на шахтах Донбасу (відповідно 5,1 і 3,2) перевищують значення цих параметрів на шахтах Рура – 4,8 і 3,0 (рис. 3). Це можна пояснити більшою температурою шахтних вод на Донбасі порівняно з Рурським басейном (табл. 2), хоча до цього висновку слід відноситися обережно, оскільки, на відміну від Рурського басейну з вимірами температури на більшості водовідливів значення температури шахтних вод на Донбасі системно не вимірювалися, через що оцінювалися нами за значеннями геотермічного градієнта.

На рис. 4, 5 представлено розраховані параметри ефективності роботи циркуляційних систем закритого типу, які можуть бути встановлені в зоні затоплення шахт двох басейнів.

Очікувана теплова потужність систем закритого типу набагато менша порівняно із системами відкритого типу, оскільки відкриті системи можуть відбирати тепло шахтних вод з усього водовідливу, а закриті – тільки через зонд у зоні обводнення

шахти. Але суттєвою перевагою систем закритого типу є відсутність засолення поверхневих вод, яке неминуче при експлуатації систем відкритого типу. Середнє значення корисної теплової потужності геотермальних систем закритого типу на шахтах Рура (33,9 кВт) близьке до значення цього параметра для шахт Донбасу (29,5 кВт). Середні значення коефіцієнта перетворення теплового насосу COP та енергетичного критерію ξ_E на шахтах Донбасу (3,8 і 2,3) добре корелюють зі значеннями цих параметрів на шахтах Рура у 3,9 і 2,4 відповідно (рис. 5).

Таблиця 2 – Дані про водовідлив на шахтах шахт Рурського регіону та Донбасу [11, 17]

Номер шахти	Рівень насоса [абс. відм., м]	Водовідлив [млн. м ³ /рік]	Температура води [°C]
Рурський басейн			
1Рв	–280	20,0	18
2Рв	–445	10,6	20
3Рв	–165	8,5	20
4Рв	–165	12,8	24
5Рв	–746	8,0	29
6Рв	–640	34,8	30
7Рв	Д.в.	1,1	13
8Рв	Д.в.	4,0	13
Донецький басейн			
1Дв	–616	3,74	32,0*
2Дв	–70	4,20	17,0*
3Дв	–187	2,93	20,2*
4Дв	–165	0,96	19,6*
5Дв	–274	1,65	22,5*
6Дв	–272	6,35	22,5*
7Дв	–52	0,82	16,5*
8Дв	–576	5,70	30,7*

Д.в. – дані відсутні; 32,0* – значення розраховане через геотермічний градієнт на рівні відбору

Зауважимо, що ці значення відповідають рівням шахтних вод та їх температурі згідно з останніми відомими даними і мають бути скореговані у разі їх оновлення.

Отже, параметри ефективності експлуатації геотермальних систем закритого типу на шахтах Рурського та Донецького басейна досить близькі за середніми значеннями, при цьому для шахт Донбасу характерний більший розкид оцінених параметрів, насамперед через більшу неоднорідність геотермального потоку. Разом з тим, можна зробити висновок про перспективність створення циркуляційних систем на десяти затоплених українських шахтах з найвищим оціненим геотермальним потенціалом, враховуючи позитивний досвід експлуатації цих систем у Німеччині.

Висновки. Виходячи з наявних даних, авторами встановлено позитивний науково-практичний досвід експлуатації геотермальних систем відкритого та закритого типів на непрацюючих шахтах у колишніх вугледобувних басейнах, зокрема у Рурському в Німеччині, протягом останніх років. Враховуючи існуючу загальну схожість гірничотехнічних та геотермальних умов шахт Донбасу та Рура, з метою обґрунтування можливості розміщення геотермальних систем на закритих шахтах Донецького басейну, було виконано порівняльний аналіз геотермального потенціалу

шахт цих регіонів на основі параметрів, які характеризують ефективність роботи геотермальних систем, включаючи теплову потужність, раніше обґрунтований авторами енергетичний критерій та коефіцієнт перетворення теплового насосу.

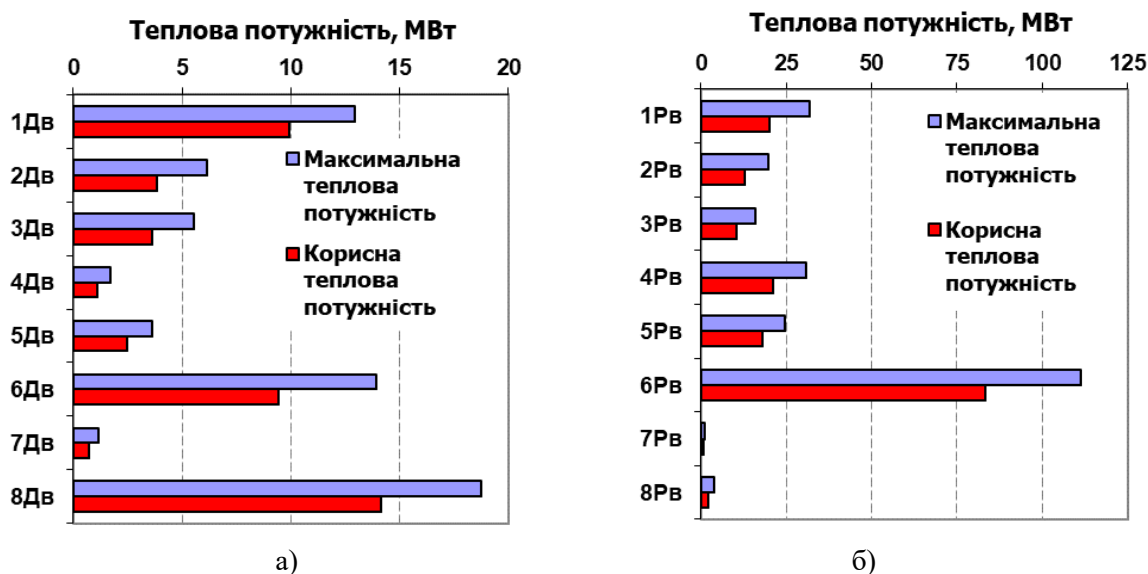


Рисунок 2 – Оцінювана теплова потужність безповоротних геотермальних систем відкритого типу на водовідливах у Донбасі (а) та в Німеччині (б)

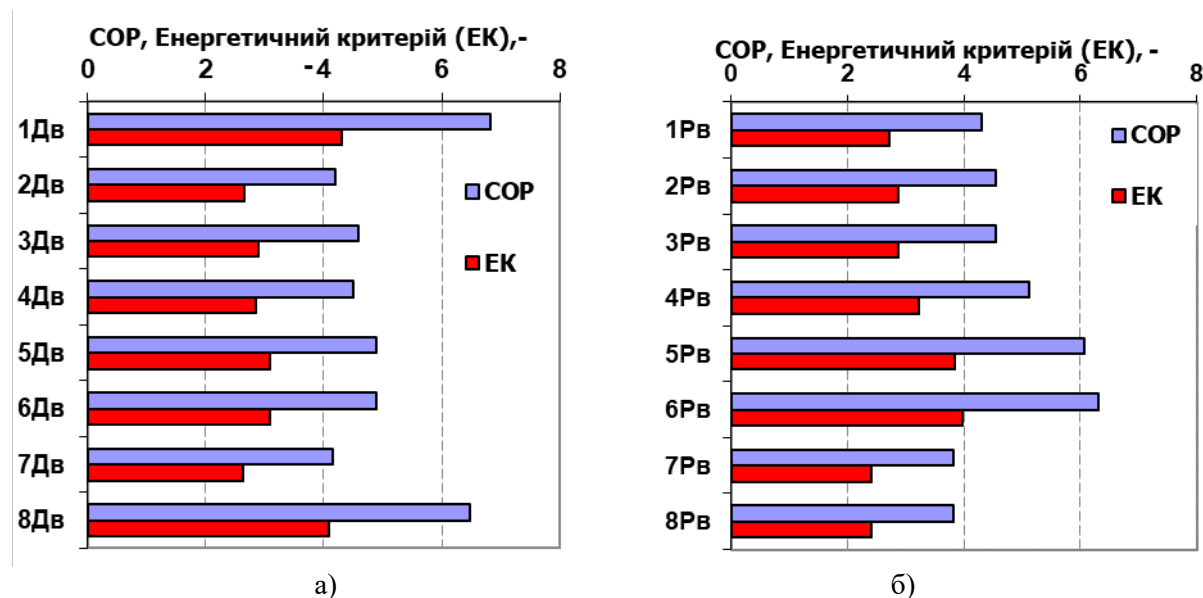


Рисунок 3 – Очікувана енергетична ефективність та коефіцієнт перетворення COP безповоротних геотермальних систем відкритого типу на водовідливах у Донбасі (а) та в Німеччині (б)

Очікувана середня корисна теплова потужність геотермальних систем відкритого типу на шахтах Рура більша, ніж на Донбасі, але головним чином за рахунок водовідливу Lohberg у Німеччині, який планується запустити з 2035 р. Разом з тим, середнє значення коефіцієнта перетворення теплового насоса та енергетичного критерію для систем відкритого типу на водовідливах у Донбасі (5,1 і 3,2), більше значень цих параметрів на шахтах Рура (4,8 і 3,0), що пов'язано з більш високою, у

середньому, оціненою температурою шахтних вод на Донбасі.

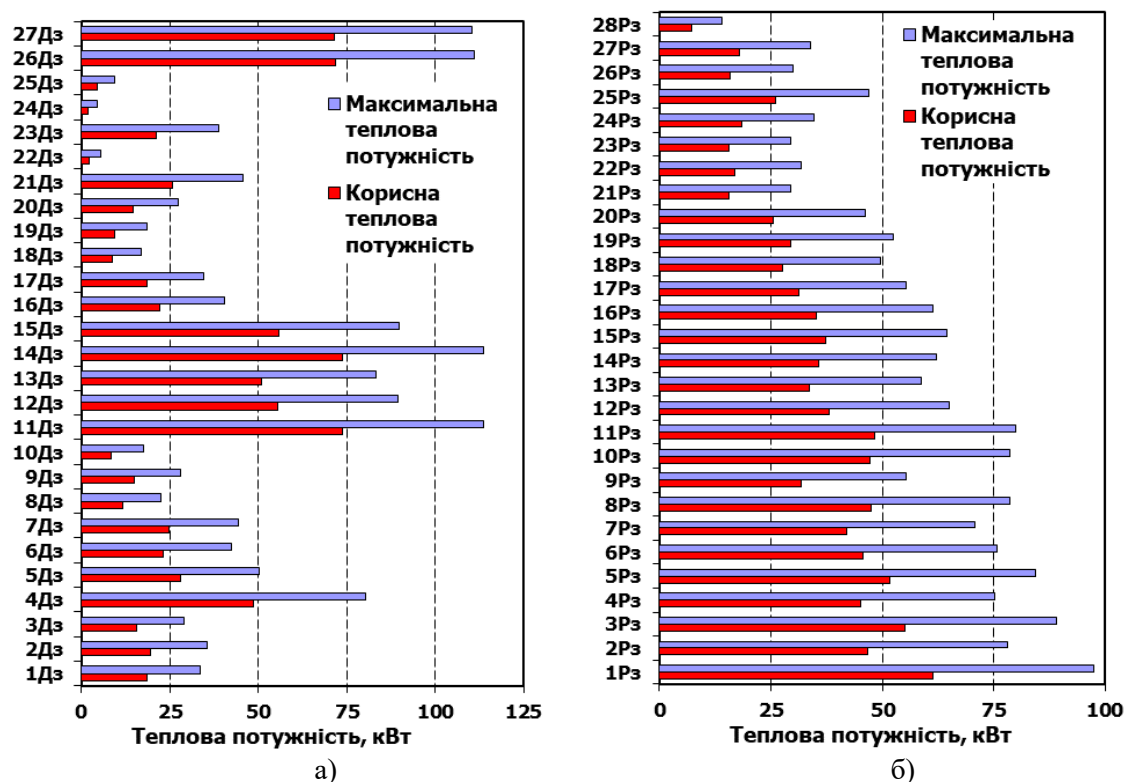


Рисунок 4 – Очікувана теплова потужність циркуляційних систем закритого типу на основі коаксіального зонду в зоні затоплення шахт Донбасу (а) та Руру (б)

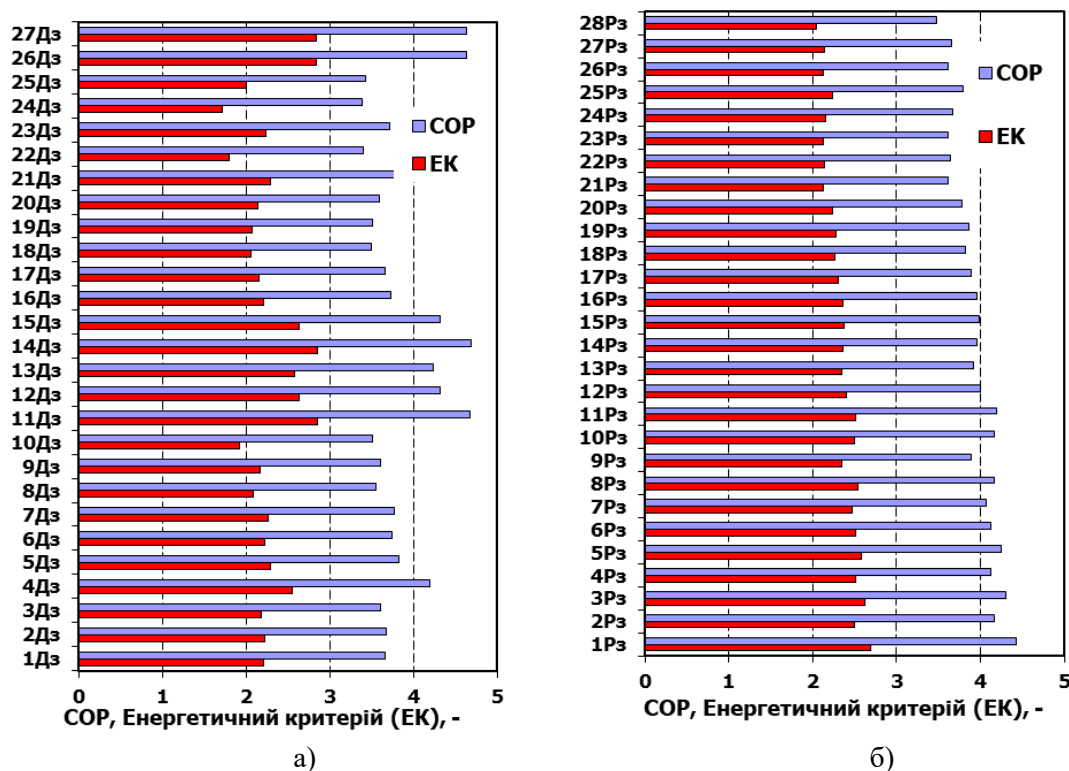


Рисунок 5 – Очікувана енергетична ефективність та коефіцієнт перетворення циркуляційних систем закритого типу на основі коаксіального зонду в зоні затоплення шахт у Донбасі (а) та у Рури (б)

Очікувана середня корисна теплова потужність геотермальних систем закритого типу на основі коаксіальних зондів на шахтах Рура і Донбасу оцінюються для сучасного положення рівня шахтних вод в діапазоні 30-34 кВт. Середні значення коефіцієнта перетворення теплового насосу та енергетичного критерію на шахтах цих двох басейнів також близькі (відповідно 3,8-3,9 і 2,3,-2,4), при цьому для шахт Донбасу характерний більший розкид показників.

Загалом параметри ефективності експлуатації геотермальних систем на шахтах Рурського та Донецького басейна значною мірою подібні, що дозволяє зробити висновок про можливість та ефективність створення таких систем в Україні з огляду на позитивний досвід експлуатації таких систем у Німеччині та відповідні дослідження у Китаї [18].

Вдячність. Представлене дослідження підтримується МОН України в рамках НДР «Технологія очищення, управління та запобігання забруднення шахтних вод» за програмою фінансування спільних українсько-китайських науково-дослідних проєктів у 2022 р.

Список літератури

1. LANUV NRW (2018): Landesamt für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Potenzialstudie warmes Grubenwasser – Fachbericht 90. Recklinghausen. 154 p.
2. Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A., Burnside N. (2019). Water from abandoned mines as a heat source: practical experiences of open- and closed-loop strategies, United Kingdom. *Sustainable Water Resources Management*, 5. 29-50.
3. Loredó, C., Roqueñí, N., Ordóñez A. (2016). Modelling flow and heat transfer in flooded mines for geothermal energy use: A review. *Int J of Coal Geology*, 164, 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.04.013>
4. Burnside N.M., Banks D., Boyce A.J. (2016). Sustainability of thermal energy production at the flooded mine workings of the former Caphouse Colliery, Yorkshire, United Kingdom. *Int J Coal Geology*, 164, 85-91.
5. Ni, L., Dong, J., Yao, Y., Shen, C., Qv, D., Zhang, X. (2015). A review of heat pump systems for heating and cooling of buildings in China in the last decade. *Renewable Energy*, 30-45.
6. Gillespie, M.R., Cran, E.J., Barron, H.F. (2013). Deep geothermal energy potential in Scotland British Geological Survey Geology and Landscape, Scotland Programme. *Commissioned Report Cr/12/131*, 125 p.
7. Bongole, K., Sun, Z., Yao, J. (2021). Potential for geothermal heat mining by analysis of the numerical simulation parameters in proposing enhanced geothermal system at bongor basin, chad. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 107,102218.
8. Bao, T., Cao, H., Qin, Y., Jiang, G., Liu, Z.L. (2020). Critical insights into thermohaline stratification for geothermal energy recovery from flooded mines with mine water. *Journal of Cleaner Production*, 273,122989. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122989>
9. Geologischer Dienst NRW Report (2018): Krefeld. 35 S.
10. Щербак В.В. Аналіз загроз і екологічних ризиків, що виникають внаслідок ураження гірничодобувних підприємств в зоні локального військового конфлікту на сході України / В.В. Щербак, С.Ю. Арсенюк // Збірник наукових праць ДонДТУ. – 2018. – С. 40-46.
11. Улицький О.А. До питання оцінки прогнозу змін гідрогеологічних умов техноекосистеми Селидівської групи шахт / О.А. Улицький, В.М. Єрмаков, О.В. Луньова, К.Є. Бойко // Екологічна безпека та природокористування. – 2019. – С. 32–42.
12. Гордиенко В.В. Тепловое поле Донбасса / В.В. Гордиенко, И.В. Гордиенко, О.В. Завгородняя // Институт геофизики НАН Украины. – 2015. – С. 3-23.
13. Rudakov, D., Inkin, O., Dereviahina, N., Sotskov, V. (2020). Effectiveness evaluation for geothermal heat recovery in closed mines of Donbas. E3S Web of Conferences 201, 01008 Ukrainian School of Mining Engineering, 1-10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101008>
14. Пивняк Г.Г. Теория и практика теплонасосной утилизации теплоты шахтной воды / Г.Г. Пивняк, В.И. Самуся, Ю.И. Оксень // Уголь Украины. – 2017. – С. 6-10.
15. Rudakov, D., Inkin O. (2022). Evaluation of heat supply with maintaining a safe mine water level during operation of open geothermal systems in post-coalmining areas. *Mining of Mineral Deposits*, 16(1), 24-31. <https://doi.org/10.33271/mining16.01.024>

16. Rudakov, D., Inkin O. (2022). Comparative analysis and evaluation of the geothermal system potential to recover thermal resources of closed mines in Ukraine. Book Chapter: Utilization of Thermal Potential of Abandoned Wells. – Academic Press is an imprint of Elsevier, 427-445. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90616-6.00021-X>

17. LANUV NRW (2015): Landesamt für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW. Teil 4

18. Liu, Q., Sun, Y., Xu, Z., Yang B. (2019): Assessment of Abandoned Coal Mines as Urban Reservoirs. *Mine Water Environ* 38, 215–225. <https://doi.org/10.1007/s10230-019-00588-3>

References

1. LANUV NRW (2018): Landesamt für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Potenzialstudie warmes Grubenwasser – Fachbericht 90. Recklinghausen. 154 p.

2. Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A., Burnside N. (2019). Water from abandoned mines as a heat source: practical experiences of open- and closed-loop strategies, United Kingdom. *Sustainable Water Resources Management*, 5, 29-50.

3. Loredó, C., Roqueñí, N., Ordóñez A. (2016). Modelling flow and heat transfer in flooded mines for geothermal energy use: A review. *Int J of Coal Geology*, 164, 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.04.013>

4. Burnside N.M., Banks D., Boyce A.J. (2016). Sustainability of thermal energy production at the flooded mine workings of the former Caphouse Colliery, Yorkshire, United Kingdom. *Int J Coal Geology*, 164, 85-91.

5. Ni, L., Dong, J., Yao, Y., Shen, C., Qv, D., Zhang, X. (2015). A review of heat pump systems for heating and cooling of buildings in China in the last decade. *Renewable Energy*, 30-45.

6. Gillespie, M.R., Cran, E.J., Barron, H.F. (2013). Deep geothermal energy potential in Scotland British Geological Survey Geology and Landscape, Scotland Programme. *Commissioned Report Cr/12/131*, 125 p.

7. Bongole, K., Sun, Z., Yao, J. (2021). Potential for geothermal heat mining by analysis of the numerical simulation parameters in proposing enhanced geothermal system at bongor basin, chad. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 107, 102218.

8. Bao, T., Cao, H., Qin, Y., Jiang, G., Liu, Z.L. (2020). Critical insights into thermohaline stratification for geothermal energy recovery from flooded mines with mine water. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122989. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122989>

9. Geologischer Dienst NRW Report (2018): Krefeld. 35 S.

10. Shcherbak, V.V., Arseniuk, S.Iu. (2018). Analysis of threats and environmental risks arising as a result of damage to mining enterprises in the zone of local military conflict in the east of Ukraine [Analiz zahroz i ekolohichnykh ryzykiv, shcho vynykaiut vnaslidok urazhennia hirmychodobuvnykh pidpriemstv v zoni lokalnoho viiskovoho konfliktu na skhodi Ukrainy]. *Zbirnyk naukovykh prats DonDTU*. No 2, pp. 40-46. (in Ukraine).

11. Ulytskyi, O.A., Yermakov, V.M., Lunova, O.V., Boiko, K.Ie. (2019). To the question of assessing the forecast of changes in the hydrogeological conditions of the techno-ecosystem of the Selydiv group of mines. [Do pytannia otsinky prohnozu zmin hidroheolohichnykh umov tekhnosystemy Selydivskoi hrupy shakht]. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia*. No 3, pp. 32-42. (in Ukraine).

12. Hordyenko, V.V., Hordyenko, Y.V., Zavorodniaia, O.V. (2015). Thermal field of Donbass [Teplovoe pole Donbassa]. *Ynstytut heofyzyky NAN Ukrainyi*. pp. 3-23. (in Russian).

13. Rudakov, D., Inkin, O., Dereviahina, N., Sotskov, V. (2020). Effectiveness evaluation for geothermal heat recovery in closed mines of Donbas. *E3S Web of Conferences* 201, 01008 *Ukrainian School of Mining Engineering*, 1-10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101008>

14. Pivnyak, G.G., Samusya, V.I., Oksen, Yu.I. (2017). The theory and practice of heat pump recovery of heat from mine water [Teoriya i praktika teplonasosnoy utilizatsii teploty shakhtnoy vodyi]. *Ugol Ukrainyi*. pp. 6-10. (in Russian).

15. Rudakov, D., Inkin O. (2022). Evaluation of heat supply with maintaining a safe mine water level during operation of open geothermal systems in post-coalmining areas. *Mining of Mineral Deposits*, 16(1), 24-31. <https://doi.org/10.33271/mining16.01.024>

16. Rudakov, D., Inkin O. (2022). Comparative analysis and evaluation of the geothermal system potential to recover thermal resources of closed mines in Ukraine. Book Chapter: Utilization of Thermal Potential of Abandoned Wells. – Academic Press is an imprint of Elsevier, 427-445. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90616-6.00021-X>

17. LANUV NRW (2015): Landesamt für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW. Teil 4

18. Liu, Q., Sun, Y., Xu, Z., Yang B. (2019): Assessment of Abandoned Coal Mines as Urban Reservoirs. Mine Water Environ 38, 215–225. <https://doi.org/10.1007/s10230-019-00588-3>

Надійшла до редакції 30.09.2022

D.V. Rudakov, Sun Yajun, I.O. Sadovenko, O.V. Inkin

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE GEOTHERMAL POTENTIAL OF CLOSED MINES IN THE DONETSK AND RUHR COALMINING AREAS

Purpose. This study aims to perform a comparative analysis of the geothermal potential for closed mines in the Donbas and Ruhr regions in terms of the operation efficiency of geothermal systems of various types.

Methods. The proposed approach includes ranking closed mines in the Ruhr (Germany) and Donetsk (Ukraine) coalmining areas according to the major parameters of geothermal system efficiency that includes the maximum and net thermal capacity, heat pump coefficient of performance COP, energy efficiency of heat recovery. The last parameter, introduced by the authors earlier, is defined as the ratio of the produced thermal energy to the thermal equivalent of the electricity required for running the heat pumps and the heat transfer fluid circulation.

Results. The average expected thermal capacity of open loop geothermal systems at mine drainages in Germany was found higher than the similar indicator for the selected mine drainages in Ukraine, with slightly lower indicators of mine water heat recovery compared to the drainages in the Donbas. The average expected thermal capacity of closed loop geothermal systems based on coaxial probes at the current water level in the mines of two areas is estimated to be within the range of 30-34 kW, and the average indicators of geothermal heat recovery in the mines of two areas differ by no more than 5%, while the mines in the Donbas demonstrate a higher dispersion of calculated indicators. Similarity of operating conditions and energy efficiency indicators of geothermal systems evaluated for two areas indicates the feasibility and the potential of operating such systems in Ukraine.

Scientific novelty. The approach to ranking of closed mines according to their geothermal potential based on parameters of mine water heat recovery efficiency has been substantiated and implemented. The developed approach enables identifying the promising sites to install geothermal systems of various types at inactive mines.

Practical significance. The proposed approach allows to preliminarily evaluate the ranges of indicators for the effective operation of geothermal systems of various types with identification of the most promising areas for further detailed technical and economic justifications.

Keywords: closed mines; thermal energy; mine water; geothermal systems; energy efficiency.

Відомості про авторів

Рудаків Д.В., д.т.н., проф., професор кафедри гідрогеології та інженерної геології НТУ «Дніпровська політехніка», rudakov.d.v@nmu.one

Сунь Яджунь, професор Школи ресурсів та геонаук Китайського університету гірничого видобутку та технологій, syj@cumt.edu.cn

Садовенко І.О., д.т.н., проф., г.н.с. кафедри гідрогеології та інженерної геології НТУ «Дніпровська політехніка», sadovenko.i.o@nmu.one

Інкін О.В., д.т.н., проф., професор кафедри гідрогеології та інженерної геології НТУ «Дніпровська політехніка», inkin.o.v@nmu.one

Rudakov D., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Hydrogeology and Engineering Geology, Dnipro University of Technology; rudakov.d.v@nmu.one

Sun Yajun, Professor at School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology; syj@cumt.edu.cn

Sadovenko I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Department of Hydrogeology and Engineering Geology, Dnipro University of Technology; sadovenko.i.o@nmu.one

Inkin O., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Hydrogeology and Engineering Geology, Dnipro University of Technology; inkin.o.v@nmu.one

УДК 622.831

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-140-151](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-140-151)

О.І. Сергієнко, Л.В. Сергієнко

ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ПРОГНОЗУ ВИВАЛОУТВОРЕННЯ ПОРІД ПОКРІВЛІ НАД ОЧИСНИМ ВИБОЄМ

Мета. Обґрунтування параметрів і розробка способу прогнозу вивалоутворення порід покрівлі над очисним вибоєм.

Методика досліджень. Чисельне моделювання об'ємного напружено-деформованого стану (метод кінцевих елементів), метод суцільних середовищ, методика контактної взаємодії поверхонь, аналітичні дослідження процесу вивалоутворення порід безпосередньої покрівлі.

Результати досліджень. В статті представлені методика та результати чисельного моделювання об'ємного напружено-деформованого стану шаруватого гірського масиву, з граничними умовами контактної взаємодії між породними шарами та з навантаженням гравітаційних сил.

Встановлено, що процес утворення вивалу в зоні опорного тиску починається з формування пересічних систем тріщин, напрям яких залежить від кута нахилу площини руйнування.

Для прогнозу вивалоутворення обґрунтований критерій тріщиностійкості порід при змішаному навантаженні наскрізної тріщини.

Розроблений спосіб для визначення локальних зон утворення вивалів, якій дозволяє визначити місце розташування вивалу у виїмковому полі лави та його параметри.

Наукова новизна. Вперше представлений спосіб прогнозування параметрів вивалоутворення з урахуванням критерію тріщиностійкості порід при змішаному навантаженні наскрізної тріщини.

Практичне значення. Практична значимість полягає в способі прогнозуванні процесів вивалоутворення в безпосередній покрівлі при відпрацюванні вугільних пластів та визначенні їх параметрів.

Ключові слова: безпосередня покрівля, критерій тріщиностійкості, вивалоутворення, параметри вивалу.

Актуальність. На сьогодні, зі збільшенням глибини розробки значно погіршилися гірничо-геологічні та гірничотехнічні умови ведення очисних робіт. При проведенні гірничих виробок і ведення очисних робіт одними із головних факторів, які ускладнюють видобуток вугілля є велика вірогідність обвалів і обвалень. В основі природних причин обвалів і обвалень лежать різноманіття гірничо-геологічних умов та чисельні прояви гірського тиску і раптового його збільшення. Недостатня вивченість поведінки гірничого масиву над виробленим простором, при веденні очисних робіт в складних гірничо-геологічних умовах, приводить до непередбаченого обвалення покрівлі та вивалоутворення порід на виїмкових дільницях. Обвалення покрівлі, представленої потужними міцними пісковиками або слабкими глинистими сланцями, у привибійній частині лави веде до її зупинки і втрати видобутку вугілля. При цьому завжди існує потенційна небезпека травмування гірників при обвалах і обваленнях покрівлі. Відомо, що в шахтах щорічно відбувається в середньому до 40 обвалів і обвалень із загибеллю або травмуванням людей [1]. Це свідчить про відсутність надійних методів прогнозу вивалоутворення порід покрівлі над очисним вибоєм.

Таким чином, обґрунтування параметрів та розробка способу прогнозу вивалоутворення порід покрівлі над очисним вибоєм, з урахуванням геомеханічних процесів, які протікають у підроблюваному вуглепородному масиві є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що на зміщення порід покрівлі та її стійкість мають велике значення фізико-механічні властивості гірських порід, такі як міцнісні і деформаційні. До міцнісних властивостей гірських порід належать: тимчасовий опір стискуванню, розтягуванню, зсув і вигін, коефіцієнт зчеплення і кут внутрішнього тертя. Найбільш часто в класифікаціях використовують показник опору

на стискування, а в розрахунках опір на вигин і кут внутрішнього тертя. Деформаційні характеристики такі як модуль пропорційності напруження і деформацій Юнга, коефіцієнт Пуассона використовують значно рідше.

Оскільки гірські породи вугільних родовищ є осадовими і їм властиві наявність шаруватості, а також тріщинуватості, яка розділяє вуглепородний масив на окремі структурні блоки, то при проведенні виробки відбувається його розшарування. При цьому від потужності окремого шару залежить стійкість покрівлі.

Вплив шаруватості порід покрівлі на їх стійкість встановлено експериментально. Так в роботі [1] запропоновані емпіричні залежності між коефіцієнтом структурного ослаблення і потужністю шарів породи. Під коефіцієнтом структурного ослаблення розуміється співвідношення міцності порід в масиві і їх міцності в зразку.

Також, тріщинуватість є одним із головних показників структури гірських порід, яка по генезису розділяється на три типи: ендегенна, екзогенна, техногенна. Кожен з типів тріщинуватості утворює одну або кілька систем тріщин, які розбивають гірський масив на окремі структурні блоки, що в значній мірі впливає на стійкість покрівлі. Тектонічні тріщини тісно пов'язані зі значними розривними порушеннями при перетині порід безпосередньої покрівлі сприяють обваленню порід покрівлі на висоту нижнього шару. Крім того, при відсутності зчеплення породи, розбитої системою тріщин на висоту всієї потужності безпосередньої покрівлі, з площиною тріщинуватості призводить до обвалення у привибійному просторі.

Відомо, що взаємне положення системи тріщин і лінії очисного вибою має великий вплив на стійкість покрівлі. Так, при значеннях кута зустрічі до 30-35° може відбутися непередбачене обвалення у лаві та ускладнення управління гірським тиском. У роботі [3] авторами експериментально на моделях з еквівалентних матеріалах встановлені не тільки якісні, але кількісні залежності стійкості покрівлі від її тріщинуватості. Так, граничний проліт тріщинуватої покрівлі становить 0,50-0,75 від аналогічного показника непорушеної покрівлі.

Питанню стійкості порід покрівлі при веденні очисних робіт, а також створенню безпечних умов праці присвячено багато робіт.

В.Т. Давідянцем запропонована залежність для обчислення величини опускання покрівлі при будь-якій ширині привибійного простору [2]. В.І. Барановський запропонував визначати початковий зсув покрівлі у очисному вибої [3]. Залежність стійкості покрівлі виробки від кута падіння вивчена в роботах В.Д. Слесарева, О.О. Борисова, Н.А. Шаповала, В.І. Барановського, В.Т. Давідянца, Ф.Н. Воскобоева, К.Ф. Сапицького та інших.

В даний час в галузі діють класифікації стійкості порід покрівлі розроблені ДонВУГІ для пологих, похилих і крутих пластів [4]. В роботі [5] О.О. Борисов пропонує оцінювати стійкість порід покрівлі за коефіцієнтом стійкості, який визначається як відношення довжини граничного прольоту шару покрівлі (або декілька шарів) до фактичного прольоту.

Критерій стійкості покрівлі запропонований Ю.Б. Грядущим, В.В. Вишневецьким, В.В. Назимко, М.І. Бугару [6] дозволяє оцінювати міцність порід покрівлі з урахуванням як потужності і геометричних характеристик кожного шару покрівлі, так і вугільного пласта та безпосередньої підшви.

У роботі [7] авторами на основі аналізу фізичного та математичного моделювання, а також шахтних інструментальних спостережень за проявом гірського тиску в очисних вибоях, пропонується оцінювати стан покрівлі за допомогою критерія, в якому враховується не тільки фізико-механічні властивості порід покрівлі і її літологічний склад, а також параметри вугільного пласта і безпосередньої покрівлі.

У роботах В.П. Зубова [8] запропоновано комплексний підхід до оцінки стану

покрівлі за критерієм стійкості. В основу підходу оцінки стану покрівлі положено, що всі геомеханічні процеси, що протікають в гірському масиві при розробці вугільних пластів, залежать від його напруженого стану. Тому автором запропоновано наступний критерій :

$$\eta = \frac{\gamma H}{\sigma_c^{kp}}, \quad (1)$$

де γ – середньозважена щільність порід;

H – глибина ведення гірничих робіт, м;

σ_c^{kp} – межа міцності порід безпосередньої покрівлі при одноосьовому стисненні, МПа.

Аналіз критеріїв стійкості [8] показав, що незважаючи на великий досвід вивчення процесу вивалоутворення порід покрівлі над лавою, вплив напружено-деформованого стану на утворення місць локального обвалення, при веденні очисних робіт в складних гірничо-геологічних умовах вивчено недостатньо. Також запропоновані критерії стійкості не дають можливості прогнозувати місця утворення вивалів по лінії очисного вибою, на кожному етапі відробки вугільних пластів.

Мета статті (постановка завдання). Обґрунтування параметрів і розробка способу прогнозу вивалоутворення порід покрівлі над очисним вибоєм.

Для досягнення поставленої мети у роботі сформульовані наступні задачі:

1) Виконати чисельний аналіз напружено-деформованого стану об'ємної моделі шаруватого масиву з граничними умовами контактної взаємодії між шарами порід.

2) Обґрунтувати критерій граничного стану для визначення зон руйнування порід і утворення вивалу в безпосередній покрівлі.

3) Визначити параметри зони руйнування порід і місць утворення вивалу в безпосередній покрівлі.

Методи дослідження: чисельне моделювання об'ємного напружено-деформованого стану гірського масиву при веденні очисних робіт; аналітичні дослідження критеріїв граничного стану.

Виклад основного матеріалу. Згідно з даними геологічного розрізу гірський масив уявляється у вигляді шаруватої структури різноманітних типів порід різної потужності.

Відомо, що при веденні очисних робіт відбувається зрушення гірського масиву над виробленим простором. В результаті змінюється напружено-деформований стан породних шарів. Крім того, на перерозподіл напружено-деформованого стану впливають як обвалені, так і породні шари, які зависли над виробленим простором. Взаємодія породних шарів супроводжується розшаруванням, групуванням і обваленням порід покрівлі.

Для вивчення процесу перерозподілу напружень в породах покрівлі над очисним вибоєм при їх обваленні, була розроблена фізико-математична модель шаруватого гірського масиву. Визначення напружено-деформованого стану порід над виробленим простором здійснювалося за допомогою чисельного моделювання об'ємної моделі гірського масиву. Приймається кожний породний шар, як окрема дискретна частина моделі зі своїми фізико-механічними властивостями. Також, між породними шарами враховуються умови контактної взаємодії. Таким чином, породний масив в цілому є дискретною складовою, але в межах шару є суцільним середовищем.

Умови рівноваги об'ємного напружено-деформованого стану моделі описуються виразами [10]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho X &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho Y &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \rho Z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де ρ – щільність речовини;

X, Y, Z – проекції об'ємних сил на осі координат, віднесені до одиниці маси.

Рівняння нерозривності деформацій, які відображають те, що в процесі деформацій суцільність середовища не порушується:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}, \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z}, \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial z \partial x}, \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y}, \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right) = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z}, \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z \partial x}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Основна і обов'язкова умова справедливості цих рівнянь – це суцільність або нерозривність середовища, як до початку, так і у процесі деформації.

Додаткові рівняння для ізотропного середовища (узагальнений закон Гука), які зв'язують деформації з напруженням, що відображають фізичні особливості розвитку деформацій [11]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)], \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)], \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Математичне моделювання контакту різних середовищ вимагає опису граничних умов контакту між елементами моделі.

Для точок, що лежать на лінії розділу підобластей, які контактують між собою, граничні умови представлені у вигляді нерівностей [12]:

$$u_n^{i-1} + u_n^{i+1} - \delta_n^i \leq 0; \quad \sigma_n^i \leq 0; \quad (u_n^{i-1} + u_n^{i+1} - \delta_n^i) \cdot \sigma_n^i = 0, \quad (5)$$

де u_n^{i-1} , u_n^{i+1} і δ_n^i – переміщення точок підобластей S_{i-1} , S_{i+1} і початковий зазор (натяг) в напрямку позитивних нормалей контактуючих ділянок, нахил яких збігається з напрямком загальної нормалі n ; σ_n^i – напруження взаємодії тіл у напрямку нормалі n .

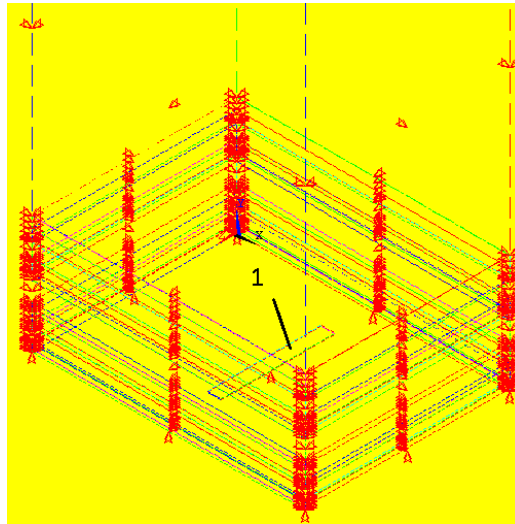
Умови фрикційної взаємодії на точках контакту приймаються у формі закону Кулона. При цьому нормальні σ_n^i і дотичні τ_n^i напруження підпорядковані співвідношенню:

$$|\tau_n^i| \leq f_{mp} \sigma_n^i, \quad (6)$$

де $f_{\text{тр}}$ – коефіцієнт сухого тертя.

Співвідношення (5) виконується за рахунок проковзування контактуючих поверхонь одна щодо одної, стримуваних фрикційними дотичними напруженнями.

Модель складається з породних шарів покрівлі та підосви, вугільного пласта, який відпрацьовується та пластів-супутників. При моделюванні виробленого простору розмір моделі змінюється (рис. 1).



1 – вироблений простір

Рисунок 1 – Об’ємна модель для чисельного моделювання напружено-деформованого стану шаруватого гірського масиву

Щоб не задавати граничні умови навантаження, гірський масив моделюється до самої поверхні. Для моделювання використовуються породні шари, які зміщуватимуться над виробленим простором, а останні шари задаються до поверхні суцільним середовищем. Навантаження моделі здійснюється гравітаційними силами, які моделюються додавання до моделі прискорення вільного падіння. Таким чином, навантаження шарів відбувається за допомогою ваги самих порід. Породні шари, які залягають над іншими, через контактні пари передають навантаження один одному. Сили тертя між шарами теж моделюються контактними парами.

На бокових гранях граничні умови деформування моделі дорівнюють нулю. Сама нижня грань моделі теж не має зміщення. Таким чином, бокове напруження буде створюватися за рахунок поперечних деформацій.

Якщо лава одиночна, а гірський масив моделюється до самої поверхні, то моделювання виробок при такому масштабі не має сенсу. Отже, розмір кінцевого елементу може бути більшим за розміри виробки. Це потрібно для оптимізації моделі у плані витрат розрахункового часу.

Прогнозування вивалів в очисних вибоях можливо виконати при визначенні об’ємного напружено-деформованого стану, за допомогою критерію тріщиностійкості, якщо задатися певною довжиною тріщини. Породи, що складають гірський масив, мають різні системи тріщин, тому визначати руйнування в будь якій точці масиву можливо, якщо прийняти наявність в ньому випадкової тріщини.

Кут нахилу площини руйнування грає важливу роль при утворенні тріщин розколювання. Завдяки цьому утворюються перетинаючі системи тріщин і породи покрівлі руйнуються на дрібні фракції, що веде до обвалення покрівлі у привибійний простір із залишком куполів обвалення над секціями механізованого кріплення (рис. 2).



Рисунок 2 – Купол обвалення над секціями механізованого кріплення

Для визначення зони руйнування були проаналізовані існуючі критерії граничного стану [13]. Для встановлення місць вивалоутворення в масиві найбільш доцільним виявився критерій тріщиностійкості [14].

Критерій тріщиностійкості для наскрізної тріщини постійного перетину в масиві при змішаному навантаженні (рис. 3) [15]:

$$K_I = \frac{P_2}{\sqrt{\pi \cdot l}} \cdot \sqrt{\frac{l+x_0}{l-x_0}}; K_{II} = \frac{P_1}{\sqrt{\pi \cdot l}} \cdot \sqrt{\frac{l+x_0}{l-x_0}}; K_{III} = \frac{P_3}{\sqrt{\pi \cdot l}} \cdot \sqrt{\frac{l+x_0}{l-x_0}}; \quad (7)$$

$$\sqrt{K_I^2 + K_{II}^2 + K_{III}^2} \cdot \frac{4}{k+1} \leq K_{ef} \quad (8)$$

де K_I , K_{II} , K_{III} – коефіцієнти інтенсивності напружень при відриву та поперечному і повздовжньому зсуві відповідно;

P_1 , P_2 , P_3 – об'ємне навантаження в масиві з тріщиною;

l – довжина тріщини.

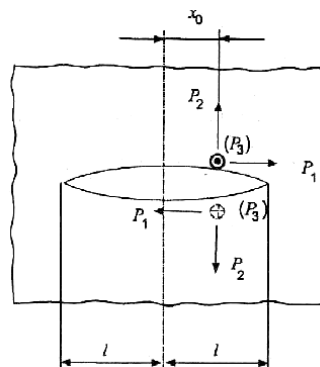


Рисунок 3 – Наскрізна тріщина постійного перерізу в масиві при змішаному навантаженні

Чисельне моделювання об'ємного напружено-деформованого стану вуглепородного масиву виконувалось згідно гірничо-геологічних умов 9-ої північної лави блоку № 10 пласта d_4 ПАТ "ШУ "Покровське", з використанням методу кінцевих елементів.

В результаті виконаних розрахунків отримані чисельні значення нормальних і дотичних напружень, головних нормальних напружень, а також лінійних та зсувних деформацій в кожній точці об'ємної моделі шаруватого вуглепородного масиву.

Розрахункові показники напруження з об'ємної моделі гірського масиву знімалися за допомогою "скануючих" ліній, проведених в безпосередній покрівлі по довжині виїмкового стовпа, з відстанню одна від одної 5 м. Тобто, якщо довжина лави 250 м, то кількість ліній складе 50 одиниць.

Контури зони утворення вивалів безпосередньої покрівлі встановлювалися за допомогою критерію (8).

Для визначення локальних зон утворення вивалів був розроблений спосіб, який полягає у наступному:

1. У породному шарі безпосередньої покрівлі по всім "скануючим" лініям, які об'єднуються у "скануючу" площину, визначають параметри компонент головних напружень.
2. За допомогою критерію тріщиностійкості визначається стан порід покрівлі: приймаємо «0» – якщо руйнування відсутнє, або «1» – якщо є руйнування.
3. Для визначення висоти зони руйнування необхідно розглянути напружений стан інших перетинів по висоті породного шару.

Обговорення результатів. У таблиці 1 представлені результати розподілу головних напружень безпосередньої покрівлі по одній "скануючій" площині до первинного обвалення безпосередньої покрівлі (табл. 1). Згідно запропонованого способу були встановлені локальні зони руйнування попереду очисного вибою, в зоні опорного тиску.

Користуючись такими "скануючими" перетинами, через кожний метр висоти породного шару безпосередньої покрівлі, отримуємо об'ємну графічну інтерпретацію зони руйнування породного шару (табл. 2). Об'єм вивалу визначається за допомогою кількості визначених зон руйнування. Також є можливість визначити геометричні параметри вивалу (висоту, ширину та глибину).

Таким чином, визначити параметри вивалу безпосередньої покрівлі за допомогою критерію тріщинуватості при змішаному навантаженні є можливим, якщо використовувати об'ємний напружено-деформований стан шаруватого масиву з навантаженням гравітаційних складових.

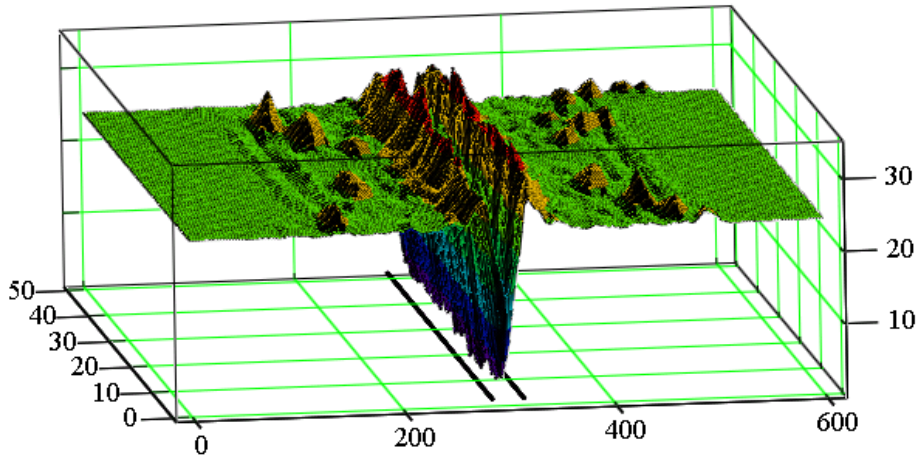
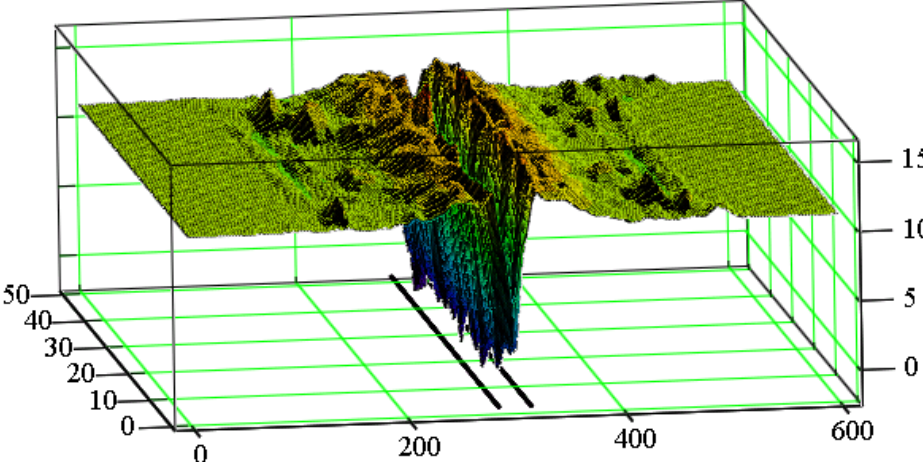
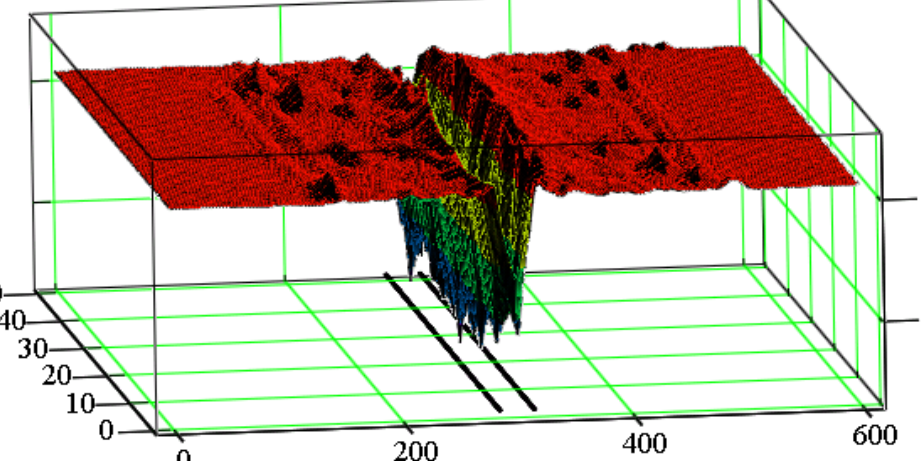
Висновки.

1. Аналіз джерел вказує на те, що критерій прогнозування вивалу перетворюється на критерій стійкості покрівлі, але це не дає певної картини процесу вивалоутворення.

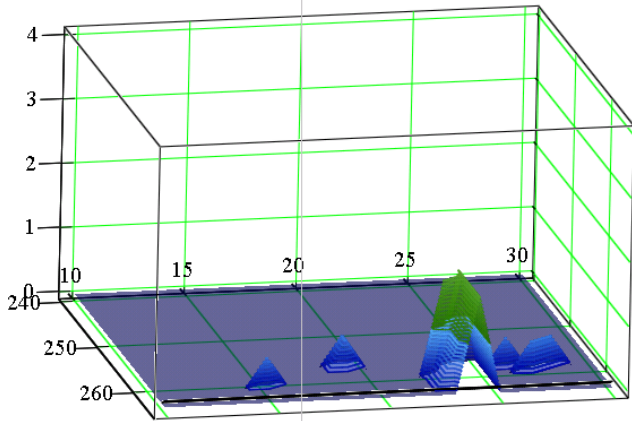
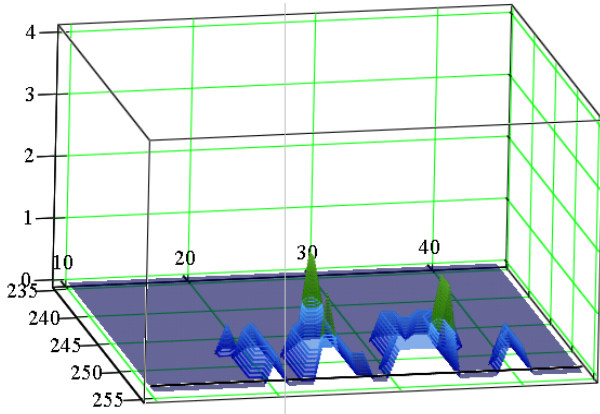
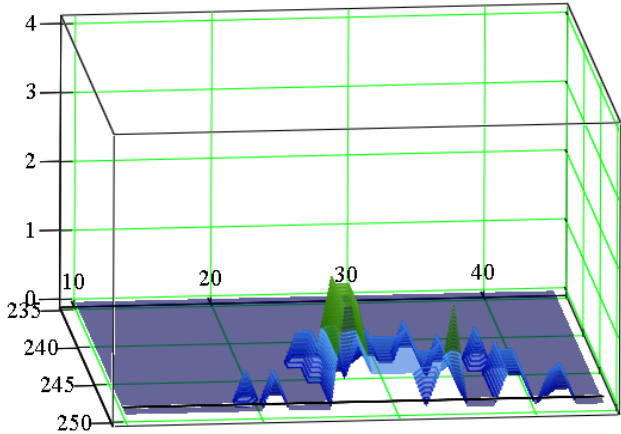
2. Для вивчення процесу перерозподілу напружень в породах покрівлі над очисним вибоєм при їх обваленні, була розроблена фізико-математична модель шаруватого гірського масиву. Визначення напружено-деформованого стану порід над виробленим простором здійснювалося за допомогою чисельного моделювання об'ємної моделі гірського масиву.

3. Кут нахилу площини руйнування грає важливу роль при утворенні тріщин розколювання, завдяки цьому утворюються перетинаючі системи тріщин і породи покрівлі руйнуються на дрібні фракції, що веде до обвалення покрівлі у привибійний простір з залишком куполів обвалення над секціями механізованого кріплення.

Таблиця 1 – Напружений стан безпосередньої покрівлі до її первинного обвалення (відхід лави від монтажного хідника на 30 м)

Компонент напруження	Графічне уявлення розподілу головних напружень в безпосередній покрівлі
σ_1 , МПа	
σ_2 , МПа	
σ_3 , МПа	

Таблиця 2 – Графічна інтерпретація проявів вивалоутворення попереду очисного вибою

№	Відхід лави від монтажного хідника, м	Зони вивалоутворення попереду очисного вибою в безпосередній покрівлі	Орієнтовний об'єм вивалу, м ³
1	70		85
2	90		242,5
3	100		230

4. Прогнозування вивалів в очисних вибоях здійснюється за допомогою розрахунку об'ємного напружено-деформованого стану масиву з використанням критерію тріщиностійкості, який передбачає початкову довжину тріщини. Породи, що

складають гірський масив, мають різні системи тріщин, тому визначати руйнування в будь-якої точці масиву можливо, якщо прийняти наявність в ньому випадкової тріщини.

5. Розроблений спосіб для визначення локальних зон утворення вивалів, який дозволяє встановити місце розташування та його параметри (об'єм, висота, довжина, глибина).

Список літератури

1. Брюханов А.М., Бережинский В.И., Бусыгин К.К., Колосюк В.П., Коптиков В.П., Мнухин А.Г., Хорунжий Ю.Т. Расследование и предотвращение аварий на угольных шахтах / Под общей редакцией А.М. Брюханова. - Часть II. - Донецк - Донбасс: 2004. - 632 с. с ил.
2. Давидянц В.Т. Совершенствование способов и средств управления кровлей на шахтах Донбасса. - М.: Недра, 1969. - 278 с.
3. Барановский В.И. Влияние природных факторов на выбор способов разработки пологопадающих пластов на глубоких горизонтах. - М.: Горгостехиздат, 1963. - 60 с.
4. Е.Н. Мухин, Е.Н.Захаров, Е.Д. Дубов и др. Управление очистных забоев с индивидуальной крепью. - К.Техника, 1994. - 190 с.
5. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 1980.-320 с.
6. Назимко В.В., Вишневецкий В.В., Грядущий Ю.Б., Бугара М.И. Критерий устойчивости пород кровли в очистном забое.// Уголь Украины. - 1996. - №8. - С.20-22.
7. Грядущий Ю.Б., Трунов Л.Ф., Зборщик М.П., Назимко В.В. Повышение устойчивости подготавливающих выработок, поддерживаемых в обрушенных и уплотненных породах зон разгрузки. // Уголь Украины. - 1991. - №1. - С.13-15.
8. Зубов В.П. Борьба с вывалами на концевых участках лав при отработке пластов на больших глубинах. // Уголь. - 1985. - №12. - С.22- 26.
9. Разработка критерия вывалообразования пород кровли очистных забоев / О.Ю. Белогуб, Г.И. Соловьев, Л.Л. Бачурин, А.И. Сергиенко, М.В. Федоренко, С.В. Козырь // Геотехнічна механіка: Межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2013. – Вип. 110. – с. 39-49. – Бібліогр.: 6 назв. – рос.
10. Седов Л.И. Механика сплошной среды, т. I, – М., Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1970 г., стр. 492 с.
11. Баклашов И.В. Механика горных пород. / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия, «Недра», 1975. 271 с.
12. Подгорный А.Н. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций. / А.Н. Подгорный, П.П. Гонтаровский, Б.Н. Киркач и др. Ин-т проблем машиностроения. – Киев : Наук, думка, 1989.– 232 с.
13. Литвинский Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов. Монография / ДонНТУ. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 207 с.
14. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука. Гл. ред. физ.мат. лит. – М. 1974. – 640 с.
15. Пестриков В.М., Механика разрушения на базе компьютерных технологий. Практикум / В.М. Пестриков, Е.М. Морозов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 464 с.: ил.

References

1. A. M. Briukhanov, V. I. Berezhinskii, K. K. Busygin, V. P. Kolosiuk, V. P. Koptikov, A. G. Mnukhin, and Yu. Investigation and prevention of accidents in coal mines / Under the general editorship of A.M. Briukhanov. - Part II. - Donetsk - Donbass: 2004. - 632 p.
2. Davidiants V.T. Improving the methods and means of roof management in the mines of Donbass. - M.: Nedra, 1969. - 278 p.
3. Baranovskii V.I. The influence of natural factors on the choice of methods for the development of gently dipping reservoirs at deep horizons. - M.: Gorgostekhizdat, 1963. - 60 p.
4. E.N. Mukhin, E.N. Zakharov, E.D. Dubov and others. Management of stopes with individual support. - K. Tekhnika, 1994. - 190 p.
5. Borisov A.A. Mechanics of rocks and massifs. M.: Nedra, 1980.-320 p.
6. Nazimko V.V., Vishnevetskii V.V., Griaduschii Yu.B., Bugara M.I. The criterion for the stability of roof rocks in the production face.// Coal of Ukraine. - 1996. - No. 8. - S.20-22.
7. Griaduschii Yu.B., Trunov L.F., Zborshchik M.P., Nazimko V.V. Increasing the stability of preparation workings supported in collapsed and compacted rocks of the discharge zones. // Coal of Ukraine. -

1991. - No. 1. - P.13-15.

8. Zubov V.P. Fight against breakouts at the end sections of coal face when mining seams at great depths. // Coal. - 1985. - No. 12. - P.22-26.

9. Development of a criterion for rock formation of the roof of stopes / O.Yu. Belogub, G.I. Solovyov, L.L. Bachurin, A.I. Serhiienko, M.V. Fedorenko, S.V. Kozyr // Geotechnical mechanics: Interv. Sat. scientific tr. - Dnepropetrovsk: IGTM NASU, 2013. - VIP. 110. - p. 39-49

10. Sedov L.I. Continuum mechanics, vol. I, - M., Main edition of the physical and mathematical literature of the Nauka publishing house, 1970, p. 492 p.

11. Baklashov I.V. Mechanics of rocks. / I.V. Baklashov, B.A. Kartoziia, "Nedra", 1975. 271 p.

12. Podgornyi A.N. Problems of contact interaction of structural elements. / A.N. Podgorny, P.P. Gontarovskii, B.N. Kirkach et al. Inst. problems of mechanical engineering. - Kyiv: Nauk, Dumka, 1989. - 232 p.

13. Litvinskii G.G. Analytical theory of strength of rocks and massifs. Monograph / DonSTU. - Donetsk: Nord-Press, 2008. - 207 p.

14. Cherepanov G.P. Brittle Fracture Mechanics. M.: Science. Ch. ed. phys.math. lit. - M. 1974. - 640 p.

15. Pestrikov V.M. Fracture mechanics based on computer technologies. Workshop / V.M. Pestrikov, E.M. Morozov. - St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2007. - 464 p.

Надійшла до редакції 25.10.2022

Serhiienko O., Serhiienko L.

JUSTIFICATION OF THE METHOD OF FORECASTING THE PROCESS OF FORMATION OF CAVE-IN OF ROOF ROCKS OVER COAL FACE

Purpose. Justification of parameters and development of the method of forecasting the formation of roof rocks over the coal face.

Methodology. Numerical modeling of the volumetric stress-strain state (finite element method), the method of continuous media, the method of contact interaction of surfaces, analytical studies of the process of rock cave-in formation of the roof rocks.

Results. The article presents the methodology and results of numerical modelling of the volumetric stress-strain state of a layered rock massif, with boundary conditions of contact interaction between rock layers and with the load of gravitational forces.

It has been established that the process of formation of a bulge in the zone of support pressure begins with the formation of intersecting systems of cracks, the direction of which depends on the angle of inclination of the plane of destruction.

For the prediction of rock cave-in formation, the criterion of crack resistance of rocks under mixed loading of a through crack has been substantiated.

The method has been developed for determining the local zones of formation of cave-in, which allows determining the location of the fallout in the excavated longwall field and its parameters.

Scientific novelty. The method of predicting the parameters of the formation of rock cave-in has been presented for the first time, taking into account the criterion of crack resistance of rocks under mixed loading of a through crack.

Practical significance. Practical significance lies in the method of predicting the processes of cave-in rock formation in the roof rocks during the working of coal seams and determining their parameters.

Keywords: roof rocks, criterion of crack resistance, cave-in, fallout parameters.

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. Софії Ковалевської, 29, м. Луцьк, Волинська обл., 43012, 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. Софії Ковалевської, 29, м. Луцьк, Волинська обл., 43012, 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 region, 85300. Actual address: 29, Sofia Kovalevska Street, Lutsk, Volyn region, 43012, 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 region, 85300. Actual address: 29, Sofia Kovalevska St., Lutsk, Volyn region, 43012, Ukraine). E-mail: liana.serhiienko@donntu.edu.ua

УДК 004.031.43:62-501/-502:620.91

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-152-161](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-152-161)

М.В. Ступак, Г.В. Ступак

КОНЦЕПЦІЯ INTERNET OF ENERGY ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТАМИ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ

Мета. Визначення перспективного способу управління електричними мережами в умовах зростання кількості впроваджених об'єктів розподіленої генерації з використанням відновлювальних джерел. Об'єктом виступають системи диспетчеризації, предметом – способи побудови диспетчерських систем.

Методи. Дослідження проведені на основі системного та елементно-структурного підходів.

Результати. В роботі проведено аналіз предметної області та еволюції систем управління об'єктами електроенергетики. Актуальність роботи полягає в нагальній потребі необхідності вивчення сучасних підходів до управління в об'єктах електроенергетики, покликаних змінити не тільки способи управління, а і взагалі переглянути концепцію модернізації існуючих систем та побудови нових мереж. Визначено, що інформаційні мережі стають не тільки засобом спілкування між людьми, а і відкривають абсолютно нові шляхи обміну телеметричною інформацією щодо управління технологічними процесами між пристроями. Не виключенням є і енергетична галузь, де з кожним роком відбувається все більш глибоке проникнення саме телекомунікаційних технологій, створення нових підходів до управління енергетичними системами генерації та розподілу електроенергії. В роботі були розглянуті способи організації управління мережами та підвищення стійкості зі зниженням рівня інерційності, що базуються на використанні диференціальних лічильників, концепції гарячого резервування, застосування інтелектуальних технологій прогнозування та інформаційного обміну, впровадженням сучасних комунікаційних технологій та проведенням паралелей між рівнями дистрибуції електроенергії та передачею даних в інформаційних мережах.

Наукова новизна. Запропоновано застосування енергетичних маршрутизаторів для підвищення оперативності управління в електричних мережах з розподіленою генерацією.

Практичне значення. В роботі доведено, що саме концепція ІоЕ є найбільш перспективною для використання в електромережах в умовах зростання кількості розподілених об'єктів малої генерації.

Ключові слова: телеметрична інформація, концепція, електроенергетика, ІоЕ, телекомунікаційні технології, управління.

Вступ. Процес інтелектуалізації принципів керування в електричних мережах є одним з рушійних механізмів розвитку цієї галузі. Переосмислення підходів до управління об'єктами електроенергетики набув сталості у 70-ті роки. Передумовами інтеграції інтелектуальних систем управління та керування є необхідність оцінки реального рівня споживання електроенергії та всебічне ускладнення інфраструктури енергосистем з часом. Отримання адекватних та реальних цифр, а не умовно прогнозних значень щодо споживання електроенергії як об'єктами промисловості так і побутовими споживачами, унеможливило перенавантаження в мережі та виникнення аварійних ситуацій, таких як відключення, або ж вихід з ладу генеруючих або розподільчих потужностей. Ускладнення інфраструктури передбачає не тільки збільшення потужності та структури розподільчої мережі але й додатково вимагає більш якісного управління та своєчасного прийняття оперативних рішень. Наслідком умовно безконтрольного розвитку сфери генерації та розподілу без врахування реальних потреб ринку електроенергії стала поява так званих «блекаутів» – тимчасового відключення складових частин енергосистеми внаслідок перевантаження. Вірне нарощування інфраструктури і відхід від традиційних підходів дозволяють мінімізувати проблему «блекауту» та уникнути масових відключень, а також оптимізувати роботу мережі в цілому.

Основна частина. Як зазначалось вище, аспектами управління в електромережах почали перейматись в другій половині минулого сторіччя, таке прагнення здебільшого

було зумовлено саме технологічними та технічними чинниками, щодо стабільності та надійності функціонування енергосистем в цілому, і в меншій мірі було викликано економічним фактором, пов'язаним з прибутками генеруючих та розподільчих компаній. На першому етапі були розроблені та впроваджені диференціальні моделі лічильників, що проводили не тільки добовий обрахунок спожитої електроенергії, а давали змогу зрозуміти розподіл реального споживання протягом доби не спираючись на графіки роботи споживачів, а реально відображаючи тенденції щодо споживання. В якості регулюючого елементу в такій системі став економічний чинник, а саме диференціація тарифів в залежності від часу доби. Такий підхід, за рахунок економічного стимулювання дозволив дещо знизити пікове навантаження і збільшити горизонт планування рівня генерації в залежності від реальних потреб ринку. В цілому це дало змогу зробити електричні мережі більш надійними в умовах буму промислового виробництва. Також з промисловим бумом напряду пов'язаний процес ускладнення інфраструктури енергосистем. Безперечно це є незворотнім процесом, який тільки збільшує оберти, і це є невід'ємною частиною науково-технічного прогресу, тому як з кожним днем людство вимагає все більше і більше електроенергії для задоволення як власних так і промислових потреб. Виходячи саме з вимог забезпечення безперервним живленням кінцевих споживачів починає впроваджуватись концепція гарячого резервування, зокрема такий підхід отримав назву «Strong grids» («міцні мережі»), що спрямований на підвищення надійності роботи енергосистеми за умов аварій на її окремих ділянках. Тобто, вихід з ладу окремої підстанції, або, тим більше, трансформатора, не призведе до тотального відключення всіх споживачів електроенергії. Таким чином забезпечується стабільність роботи, але при цьому досягати належного економічного ефекту в таких системах доволі складно, саме через неоптимальне резервування. Але незважаючи на централізовану ієрархію «Strong grids», і те, що використовується односторонній принцип розподілу, управління та передачі електроенергії без зворотного зв'язку, в такі системи активно впроваджувались пристрої інтелектуального обліку. Дані системи характеризуються наявністю суворої ієрархії, обмеженою кількістю потужних виробників електроенергії, та однонаправленістю потоків. Окрім цього з'являється можливість імплементації в систему невеликої за зазначенням потужності генерації, що базується на використанні відновлювальних джерел (СЕС, ВЕС, ГЕС). Вже на початку 2000-х підхід до інтелектуалізації електроенергетичних мереж дозволив використати зворотний зв'язок із споживачами для управління генерацією електроенергії в режимі реального часу. При цьому ставилося завдання з великою точністю прогнозувати споживання електроенергії, а не лише оперативно вмикати резервні потужності електростанцій для компенсації підвищеного споживання. Тобто з'явилася можливість збалансувати споживання та генерацію електроенергії в автоматичному режимі.

У 2007 р. у законодавчому акті про енергетичну незалежність та безпеку США вперше з'явився термін «Smart grid». Цю назву отримала технологія модернізації національної електроенергетичної системи з метою захисту, контролю та оптимізації енергоспоживання всіх елементів та учасників мережі. Поява та розвиток концепції «Smart grid» є природним етапом еволюції електроенергетичної системи, і поступового переходу від централізованих систем генерації та розподілу з використанням підходу «Strong grid» до децентралізованої ієрархії з використанням зворотного зв'язку і оперативного управління. Це зумовлено, з одного боку, нагальними потребами енергоринку, на якому взаємодіють виробники та споживачі електроенергії, а з іншого боку, наявністю технічних можливостей вирішувати ці проблеми насамперед із використанням нових комп'ютерних та телекомунікаційних технологій. Загальні ідеї, закладені в «Smart grid», показані на рис.1 [1], а саме взаємодію елементів традиційної

енергосистеми (електроенергетична інфраструктура), з одного боку, системи управління, систем телекомунікацій, приладів обліку, вітрогенераторів, сонячних панелей – з іншого боку.



Рисунок 1 – Концепція побудови взаємодії в Smart grid

«Smart Grid» – інтегрована безпечна і надійна електроенергетична система, що охоплює генерацію, транспорт, розподіл і кінцеве споживання електричної енергії, ефективність якої забезпечується оперативним обліком енергоданих та заснована на застосуванні передових засобів моніторингу, комунікації, аналізу та динамічного управління. Дана схема взаємодії дозволяє в години пікових навантажень на мережу, замість введення в дію резервних потужностей, за сигналами з центру управління виконати тимчасове відключення потужних споживачів не критичної інфраструктури, наприклад спеціально оснащених кондиціонерів і промислових холодильників. Оскільки це відключення відбувається короткочасно (10...15 хв) і за окремо визначеними групами, то базові показники для кінцевого споживача електричних послуг майже не змінювались і за часту споживач навіть і не знає про зовнішнє втручання в роботу його електрообладнання. Такий підхід дозволяє зменшити потужність резервних блоків, які більшу частину часу простоюють, а значить, здешевити енергосистему в цілому. Концепція Smart grid характеризується рядом властивостей [2]:

1. Взаємодія з елементами виробництва, розподілу та споживання: ТЕЦ, ГЕС, АЕС, ВЕС, СЕС, накопичувачі енергії, електророзподільні мережі та кінцевий споживач.
2. Реалізовано активну двонаправлену взаємодію шляхом обміну інформацією між усіма елементами мережі, від генерації до споживача.
3. Забезпечується обмін даними у реальному масштабі часу, що практично безперервно забезпечує керований баланс між виробництвом та споживанням електроенергії.
4. Сприяє оптимальній експлуатації електромережі та здатністю до самовідновлення.
5. Усі елементи та пристрої, що входять до складу «Smart grid», повинні бути оснащені засобами, що здійснюють інформаційну взаємодію.

Але з розвитком малої генерації і трансформації підходів до формування енергоринку «Smart Grid» почали втрачати актуальність. Можливість здійснювати оперативний облік як рівня генерації так і рівня споживання істотно зменшується. Одним з найвагоміших чинників, що призводить до розбалансування існуючих

систем – активне впровадження зелених технологій. Здешевлення фотоелектричних модулів, акумуляторних батарей, впровадження зеленого тарифу створює умови для широкого впровадження індивідуальних станцій генерації електроенергії в домогосподарствах. При цьому на меті ставиться не тільки можливість знизити власні витрати на електроенергію, а й отримати прибуток від продажу надлишкової потужності до енергосистеми. З одного боку «Smart Grid» дозволяє виконувати оперативне керування енергосистемою, і з даною задачею повністю може впоратись, але за умови, що доля малих СЕС та ВЕС не буде перевищувати 10% від загального бюджету потужностей генерації в енергосистемі. Даний рівень проникнення зелених технологій може легко бути компенсований маневруючими потужностями у випадку зниження зеленої генерації. Але сьогодні ми спостерігаємо прагнення фізичних та юридичних осіб активніше впроваджувати альтернативні джерела як для задоволення власних потреб так і для отримання прибутків. Доля індивідуальних виробників електроенергії вже збільшилась на 15%, а до виробників зеленої електрики активно додаються і комерційні структури з сумарною встановленою потужністю вже понад 7000 МВт станом на кінець 2021 за даними НЕК «Укренерго». Якщо кількість «промислових» виробників зеленої енергії вимірюється 10, і інтегрувати їх у об'єднану енергосистему «Smart Grid» відносно просто, то в випадку приватних об'єктів генерації (переважно домогосподарства) інтегрувати їх значно складніше через їх кількість, яка на сьогоднішній день в Україні перевищила 25 000. «Smart Grid» не розрахована роботу з системою, де одночасно працюватиме багато тисяч дрібних нестабільних виробників електроенергії, які, до того ж, час від часу перетворюються на споживачів електроенергії. Крім того, у такій мережі постійно виникатимуть добові та регіональні великі перетікання електроенергії. Для регулювання цього необхідно повсюдне впровадження інформаційно-комунікаційних технологій, щоб забезпечити баланс виробництва та споживання електроенергії шляхом регулювання, як виробників, і споживачів електроенергії. Процес еволюції систем управління в електроенергетичній галузі приведений на рисунку 2 [3].

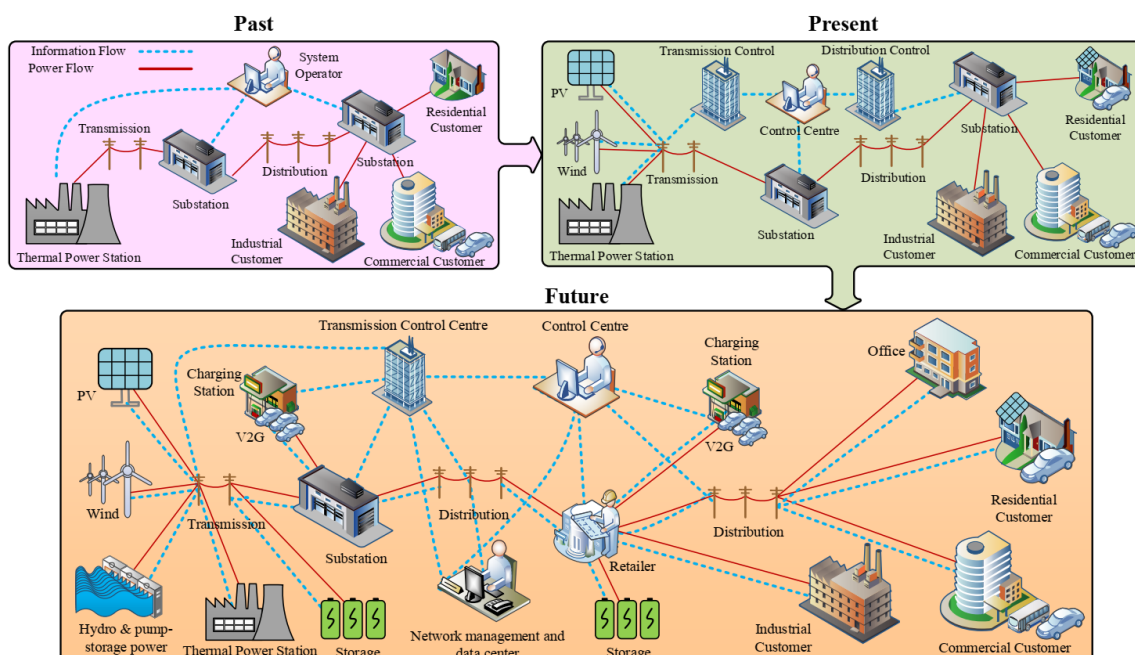


Рисунок 2 – Еволюція систем диспетчеризації в електроенергетиці

В застарілих системах використовувався підхід диспетчеризації, що заснований довгостроковому плануванні з можливістю замовляти необхідний рівень потужності. Такий підхід унеможливорює гнучкість системи та робить систему незбалансованою у випадку зміни поведінки споживачів. Також слід зауважити, що можливість інтеграції зелених та відновлювальних технологій, що не мають стабільних показників генерації практично неможлива. На сьогоднішній день використовуються моделі керування, що передбачають зворотній зв'язок, але не на рівні кінцевого користувача, а на рівні дистрибуції та генерації. При цьому існує можливість керувати генерацією в залежності від глобального попиту, а також враховувати графіки пікових годинних, добових і сезонних навантажень.

Керування генерацією, окрім пікових графіків здійснюється також за рахунок формування відкритого ринку і балансування вартості в залежності від добових показників генерації або ж споживання. Таким чином системи управління та диспетчеризації доповнюються короткостроковим прогнозуванням, що дозволяє диспетчерському центру виконувати оперативне керування рівнем генерації в залежності від вхідних і поточних умов. Підхід IoE (internet of energy), приходить на заміну Smart Grid і значно розширює доступні можливості.

Він вже частково впроваджується сьогодні, дозволяє отримувати зворотній зв'язок не тільки на рівні дистрибуції, а й вже від кінцевого споживача або систем що представляють сектор малої генерації. Концепція IoE поділяється на три категорії:

1. Генеруючі ресурси.
2. Споживачі енергії.
3. Накопичувачі електричної енергії.

Одним з найбільших чинників до впровадження концепції IoE є стрімке зростання некерованих малих електростанцій з відновлювальною генерацією, що загрожує безпеці та стабільності мережі через зменшення інерції енергосистеми. Моніторинг і контроль відновлюваної генерації повинен здійснюватися в режимі реального часу у глобальному масштабі, а не на локальному рівні, і це дасть змогу планування генерації та управління енергетичною системою в цілому.

Базою для впровадження IoE є застосування Інтернет-платформ та комунікаційного обладнання в управління величезною кількістю елементів мережі. У випадку реалізованої інфраструктури IoE, різні частини енергомережі можуть краще координувати одна одну, а позитивні чи негативні дисбаланси ВДЕ будуть визначатися майже в режимі реального часу. Для коректного функціонування необхідно забезпечити надійний і високошвидкісний зв'язок між всіма складовими електромережі та диспетчерським центром. В такому випадку оператор має більше контролю над електромережею і в автоматичному режимі забезпечувати швидкі включення або ж відключення як потужностей генерації так і окремих користувачів, для яких такі рішення не є критичними. Наприклад, якщо оператор вирішить зменшити споживання в певній лінії на рівні розподілу, відповідний сигнал буде надіслано до цільового регіонального розподільного центру. Цей центр також може надсилати подібний сигнал усім кінцевим споживачам, що підключені до цієї лінії. Кожен окремий споживач також може мати різні попередньо визначені та регульовані схеми керування, і вони можуть бути оснащені певними інтерфейсами на основі IoE та автоматичними контролерами, які інформують споживача та оператора щодо зменшення споживання. Крім того, користувач може застосувати попередньо визначені стратегії зменшення споживання енергії для автоматичного відключення деяких навантажень. Усі ці контрольні завдання керуються автоматично за допомогою інфраструктури IoE. Даний підхід о організації взаємозв'язків в мережі і принципів керування в деякому сенсі

повторює ієрархію мережі Інтернет. В таблиці 1 проведені паралелі між концепцією ІоЕ та мережею Інтернет [4].

Таблиця 1 – Подібність мережі Інтернет та ІоЕ

Параметр	ІоЕ	Інтернет
Сховище	Акумулятори, мережеві накопичувачі енергії	Кеш- і проксі-сервери, датацентри
Передача	Лінії передачі	Сукупність кабелів і систем передачі
Генерація	Невідновлювальні та відновлювальні джерела енергії	Сервери мережних служб і додатків
Розподільча компанія	Оператор енергоринку	Інтернет провайдер
Розподільча мережа	Сукупність інформаційних каналів та каналів передачі даних	Мережа доступу
Комутація	Маршрутизатор енергії	Комутатори та маршрутизатори
Хости	Споживачі	Клієнти
Зони обслуговування	Окремі ділянки енергомережі	Сегменти глобальної мережі, що обслуговуються окремими Інтернет провайдерами
Інтерфейси	Порти підключення споживачів	Мережні інтерфейси для підключення пристроїв

Виходячи з рівня подібності ІоЕ та мережі Інтернет, та результатів досліджень, що представлені в [4, 5, 6], можна зробити висновок про те, що підходи до комутації і маршрутизації трафіка які використовуються в мережі Інтернет можна застосовувати для управління в мережах ІоЕ. Але слід зауважити, що справедливність даного твердження можлива за умови використання надійної і захищеної мережі передачі даних між всіма об'єктами енергосистеми та операторським центром. Моніторинг стану енергомережі, швидкість і коректність прийняття диспетчерських рішень оператором енергосистеми залежить саме від надійності і швидкодії телекомунікаційної складової ІоЕ. Структура ІоЕ достатньо складна і містить елементи ІоТ, сервери додатків, хмарні сервіси для зберігання та обробки даних, та SCADA-системи з відповідними НМІ інтерфейсами.

ІоЕ має подібну структуру та функціональність порівняно з сучасними розподіленими обчисленнями та інфраструктурами Інтернету. Вона складається з розподіленої генерації та накопичення енергії з можливістю plug-and-play (рис. 3).

В енергетичній системі розподілені відновлювані/невідновлювані джерела подібні до різних інтернет-серверів, лінія електричної передачі порівнянна з кабелем передачі на великі відстані для Інтернету, а місцева розподільча компанія аналогічна постачальникам послуг Інтернету (ISP). Подібно до того, як провайдери Інтернету контролюють використання Інтернету своїм клієнтом за допомогою власних засобів контролю, розподільча компанія відповідає за управління енергією та контроль своїх пов'язаних клієнтів. Користувачі як інтернет-, так і енергетичної мережі виконують подвійні ролі. Користувач Інтернету може надсилати або отримувати інформацію через Інтернет, а користувач мережі може продавати або купувати енергію в мережу.

Також важливим аспектом є і те, що концепція ІоЕ повністю лежить в контексті парадигми Industry 4.0, що також свідчить про те, що в ІоЕ окрім підходів мережного управління можна застосовувати підходи з Industry 4.0. ІоЕ в комплексі забезпечує обмін інформацією та електроенергією між різними джерелами та навантаженнями,

включаючи відновлювані джерела енергії, розподілені сховища, електричні транспортні засоби, що підключаються до електромережі, побутові та промислові споживачі, тощо.

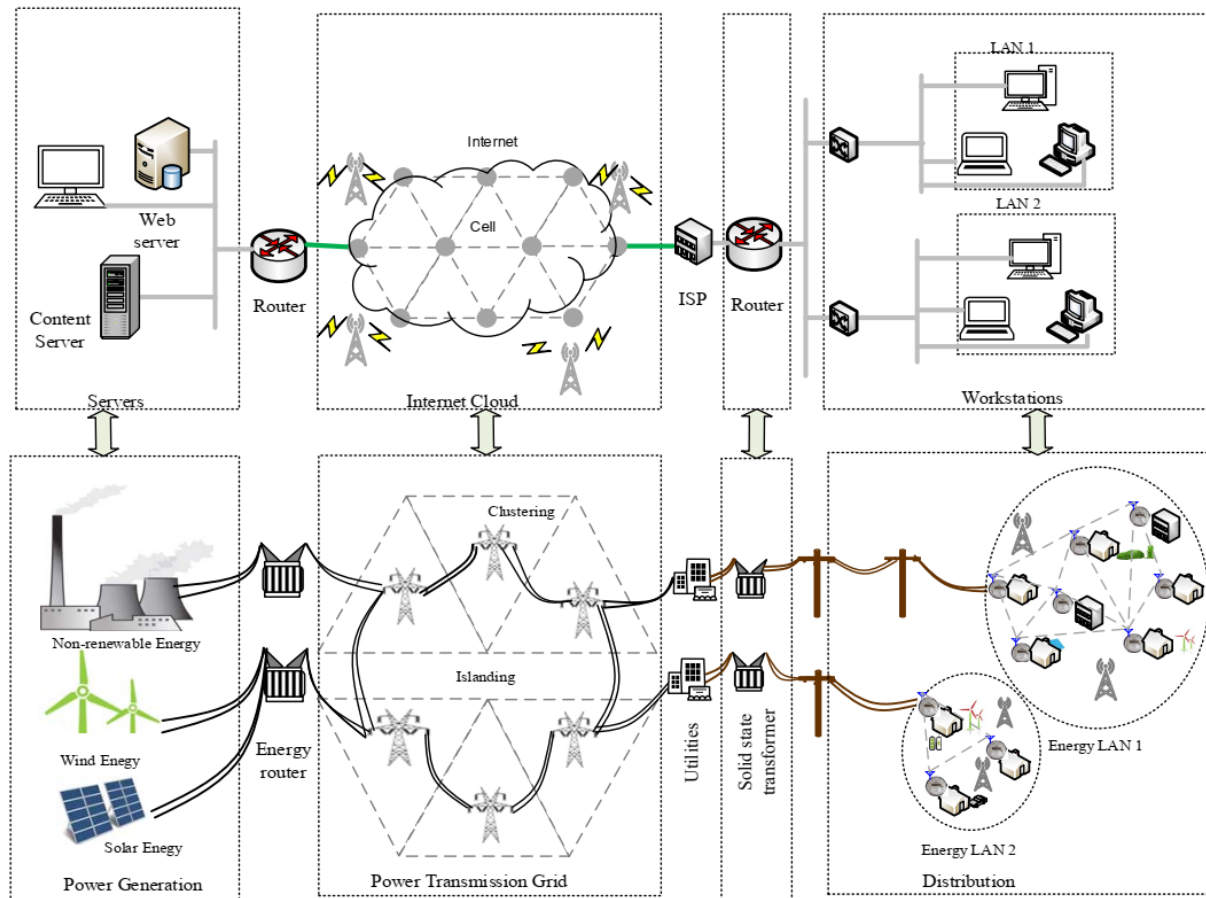


Рисунок 3 – Функціональне порівняння IoE та мережі Інтернет

Архітектура мережі – однорангова, але за потреби може бути введено додатковий рівень ієрархічного контролю. Для IoE запропоновано різні детальні архітектури, у [5, 6] визначені ключові компоненти для створення автоматизованої та гнучкої системи розподілу електроенергії або енергетичного Інтернету (рис. 4).

Основним елементом в цій системі є «маршрутизатор енергії – energy router» або блок інтелектуального управління енергією (IEM), який містить уніфікований інтерфейс для підключення та компонент DGI – розподілена інтелектуальна мережа. Блок інтелектуального управління несправностями (IFM) ізолює енергетичну локальну мережу у випадку виникнення електричного збою або ж у випадку коли відбувається регламентне відключення. IEM і IFM повинні обмінюватись даними через надійну та безпечну мережу зв'язку. З точки зору можливості підключення до електромережі, то energy router може працювати як зі змінним так і з постійним струмом, і його основою є блок розподіленої електромережі (DGI).

Основними функціями energy router є обробка інформації, диспетчеризація електроенергії та перетворення напруги. Його роль полягає в підвищенні надійності, ефективності та безпеки енергосистеми, а також в оптимізації використання енергії шляхом збалансування попиту та пропозиції. Він має можливість отримувати, обробляти та передавати інформацію про стан мережі щодо поточної генеруючої потужності та поточного попиту. У відповідності до концепції IoE, енергетичні

маршрутизатори будуть розміщені в різних точках енергетичної мережі, подібно до трансформатора в сьогодиншній мережі, або ж до пристроїв обліку у споживачів з можливістю підключення до і них інтелектуальних пристроїв споживання/генерації. Пристрій відповідає за зв'язок із великою кількістю розподілених джерел і навантажень, а також за локальне балансування попиту та пропозиції. Коли місцеве постачання перевищує місцеве споживання, енергетичний маршрутизатор передає надлишок енергії в мережу. Енергетичний маршрутизатор також спілкується з іншими маршрутизаторами для більш широкого балансування попиту та пропозиції в більш широкому масштабі [7].

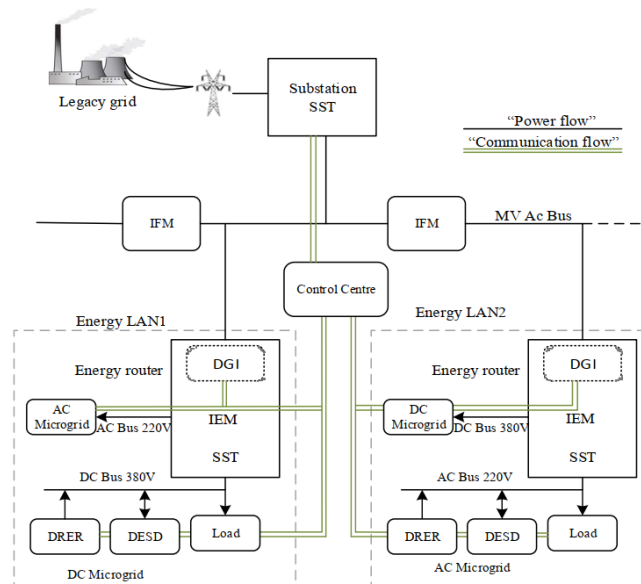


Рисунок 4 – Ключові компоненти IoE

Енергетичний маршрутизатор складається з трьох модулів:

- твердотільного трансформатора;
- інтелектуального управління розподіленою мережею;
- комунікаційного блоку.

Твердотільний трансформатор, по суті, є перетворювачем напруги на основі силової електроніки. Інтелектуальний блок управління розподіленою мережею — це операційна система на основі відкритого стандарту, яка оптимізує виробництво та розподіл енергії в мікромережі, до якої вона підключена. Комунікаційний модуль відповідає за обмін даними всередині та між енергетичними маршрутизаторами

Енергетичний маршрутизатор функціонально подібний до інформаційного маршрутизатора, оскільки він здатний виконувати маршрутизацію, контролювати та координувати потоки електроенергії. Він повинен автоматично розпізнавати будь-який пристрій, підключений до енергетичної локальної мережі, через інтерфейс plug-and-play. Ці інтерфейси plug-and-play повинні мати однакові функції в обох системах, як показано на рис. 3. Якщо провести аналогії, то Інтернет складається з інтерфейсу plug-and-play, наприклад RJ45, Ethernet і USB, а і IoE, в свою чергу, де завантажуються/розподіляються ресурси (AC або DC) можна підключати або відключати через шину постійного або змінного струму. В Інтернеті всі пристрої можуть взаємодіяти один з одним, і те саме стосується IoE. Інформаційно-залежні інтелектуальні пристрої спілкуються один з одним через комунікаційний інтерфейс за відкритим протоколом.

Обидва типи маршрутизаторів мають різні ступені контролю. ІоЕ має багато контрольних вузлів від центрального ядра до розподілених інтелектуальних периферійних вузлів, подібних до Інтернету. Основна мережа має строгий контроль, а в системах розподілу є розподілений контроль, де сектори виконуються для простоти та ефективного контролю різних розподілених споживачів. Крім того, існує слабко контрольоване середовище в будинку або будівлях [15].

Висновки. Виходячи з проведеного аналізу, доведено що на даний час модель функціонування електричних мереж знаходиться у процесі трансформації, і відбувається перехід до більш інтелектуальних систем які в собі поєднують технології ІоТ та Smart Grid задля більш оперативного управління. Дане поєднання створює абсолютно нову концепцію – ІоЕ. Необхідно зазначити, що системний оператор, при впровадженні сучасних підходів телеметрії і переходу до ІоЕ стикається з величезною кількістю невизначеності в моделі і збільшенням обсягів вхідних даних, що вимагає створення нових алгоритмів роботи як на рівні генерації так і на рівні споживання для устаткування кінцевих користувачів. Подальші роботи в цьому напрямі повинні бути спрямовані на розробку алгоритмів роботи електричних мереж з використанням штучного інтелекту, а також створенні нових пристроїв – energy router.

Список літератури

1. Ступак М.В., Ступак Г.В. Способи управління в електричних мережах. «ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології: зб. доповідей Всеукр. наук.-практ. конф. молодих вчених, 1-2 грудня 2021 р. / ДВНЗ «ДонНТУ»; відп. ред. М.В. Ступак. – Покровськ: ДВНЗ «ДонНТУ», 2021, 138-141 с.
2. Технология Smart grid и будущее мировой электроэнергетики - Статьи :: Международный Электротехнический Журнал Электрик [Электронное джерело] <http://electrician.com.ua/posts/1389>
3. H. Shahinzadeh, J. Moradi, G.B. Gharehpetian, H. Nafisi and M. Abedi, "Internet of Energy (IoE) in Smart Power Systems," 2019. The 5th Conference on Knowledge Based Engineering and Innovation (KBEI), 2019, pp. 627-636.
4. Y.R. Kafle, K. Mahmud, S. Morsalin and G.E. Town, "Towards an internet of energy," 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2016, pp. 1-6.
5. Huang, Alex Q., et al. "The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet." Proceedings of the IEEE 99.1 (2011): 133-148.
6. Chen, Dong, et al. "Distributed and autonomous control of the FREEDM system: A power electronics based distribution system." Industrial Electronics Society, IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE. IEEE, 2014.
7. Xu, Yi, et al. "Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet." Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on. IEEE, 2011.

References

1. Stupak M.V., Stupak H.V. Spособы upravlinnia v elektrychnykh merezhakh. «ТАК»: telekomunikatsii, avtomatyka, komp'yuterno-intehrovani tekhnolohii: zb. dopovidei Vseukr. nauk.-prakt. konf. molodykh vchenykh, 1-2 hrudnia 2021 r. / DVNZ «DonNTU»; vidp. red. M.V. Stupak. – Pokrovsk: DVNZ «DonNTU», 2021. 138-141 s.
2. Tekhnolohyia Smart grid y budushchee myrovoi elektroenerhetyky - Staty :: Mezhdunarodnyi Elektrotekhnicheskyy Zhurnal Elektrik [Elektronne dzherelo] <http://electrician.com.ua/posts/1389>
3. H. Shahinzadeh, J. Moradi, G.B. Gharehpetian, H. Nafisi and M. Abedi, "Internet of Energy (IoE) in Smart Power Systems," 2019. The 5th Conference on Knowledge Based Engineering and Innovation (KBEI), 2019, pp. 627-636.
4. Y.R. Kafle, K. Mahmud, S. Morsalin and G.E. Town, "Towards an internet of energy," 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2016, pp. 1-6.
5. Huang, Alex Q., et al. "The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet." Proceedings of the IEEE 99.1 (2011): 133-148.

6. Chen, Dong, et al. "Distributed and autonomous control of the FREEDM system: A power electronics based distribution system." Industrial Electronics Society, IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE. IEEE, 2014.

7. Xu, Yi, et al. "Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet." Smart Grid Com7. munications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on. IEEE, 2011.

Надійшла до редакції 22.10.2022

M. Stupak, H. Stupak

THE INTERNET OF ENERGY CONCEPT FOR MANAGEMENT OF ELECTRICAL NETWORK FACILITIES

Purpose. Determination of a promising way of managing electric networks in the conditions of an increase in the number of implemented distributed generation facilities using renewable sources. Dispatch systems are the object, methods of building dispatch systems are the subject.

Methods. Research was carried out on the basis of system and elemental-structural approaches.

Results. The article analyzes the subject industry and the evolution of energy facility management systems. The relevance of the work lies in the acute study of modern approaches to the management of electric power facilities, designed to change not only management methods, but also to generally revise the concept of modernization of existing systems and construction of new networks. It has been determined that information networks become not only the means of communication between people, but also open completely new ways of exchanging telemetric information regarding the management of technological processes between devices. The energy sector is no exception, where every year the penetration of telecommunication technologies is deepening, creating new approaches to the management of energy systems of electricity generation and distribution. The work considers ways of organizing network management and increasing its stability with a decrease in the level of inertia, based on the use of differential meters, the concept of hot backup, the use of intelligent forecasting and information exchange technologies, and the introduction of modern communication technologies, and parallels between the levels of power distribution and data transmission in information networks.

Scientific novelty. It has been offered to increase the efficiency of management in electrical networks with distributed generation with the help of energy routers.

Practical significance. The work proves that the IoE concept is the most promising for the use in power grids in the conditions of an increase in the number of distributed objects of small generation.

Keywords: telemetric information, concept, electric power industry, IoE, telecommunication technologies, management.

Відомості про авторів

Ступак Марина Володимирівна, аспірантка кафедри автоматики та телекомунікацій, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», maryna.stupak@donntu.edu.ua

Ступак Гліб Володимирович, старший викладач кафедри автоматики та телекомунікацій, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», glib.stupak@donntu.edu.ua

Stupak Maryna Volodymyrivna, PhD student of the Department of Automation and Telecommunications, Donetsk National Technical University, maryna.stupak@donntu.edu.ua

Stupak Hlib Volodymyrovych, senior lecturer of the Department of Automation and Telecommunications, Donetsk National Technical University, glib.stupak@donntu.edu.ua

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-162-170](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-162-170)

Г.О. Теличко, О.О. Коршиков, Д.С. Машьянов, О.І. Ткаченко

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯ ВАГОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ INDUSTRY 4.0

Мета роботи. Розробка системи автоматичного керування завантаження вагонів, котра зможе об'єднати окремі вузли в одну спільну систему для забезпечення більшого контролю та надійності процесу. Методи дослідження – графокомбінаторний.

Методика. Проведення дослідження обґрунтовано логічним синтезом на основі апаратних засобів вбудованих систем керування, програмування на мові функціональних блоків стандарту MEK61131-3.

Результати. Сформульовані вимоги до структури системи автоматизації вуглевантажувальних комплексів, обрана базова апаратура автоматизації, визначено алгоритми керування. На підставі вимог до системи автоматизації розроблено функціональну схему та її технічну реалізацію автоматизації вуглевантажувальних комплексів як єдиної системи керування. Розроблений алгоритм та в подальшому розроблена програма САК локальної системи, яка змогла показати свою працездатність у середовищі «Owen Logic». Це дозволило налаштувати та підібрати правильні коефіцієнти та можливих розрахованих даних.

Наукова новизна. Розробка функціональної моделі вуглевантажувального комплексу і застосування бездротових зв'язків, спрямованих на об'єднання розділених локальних систем у одну спільну для забезпечення більшого контролю та надійності процесу.

Практичне значення. Функціональна та структурна модель вуглевантажувального комплексу дозволить підвищити його рівень автоматизації, надійність і ефективність експлуатації, усунути недоліки технічного розділення системи та запобігти значних матеріальних, часових та економічних витрат на налагодження системи.

Ключові слова: система автоматичного керування, алгоритм, програмування, бездротовий зв'язок, контролер.

Вступ. У сучасному світі розвитку вугледобувної промисловості приділено велику увагу, але вона стикається з проблемами покращення якості автоматизованих процесів та зменшення людської присутності в технологічному процесі, ефективності використання транспортного та технологічного обладнання.

Відвантаження вугілля споживачам є кінцевим етапом роботи шахти. Навантаження вугілля проводиться через вуглевантажний пункт на який вугілля надходить із накопичувальних бункерів, або з вугільних складів поверхні шахти.

Крім якісного контролю вугілля, що відвантажується, піддається кількісному контролю, який має комерційний характер при розрахунку споживачів із гірничим підприємством

Основним видом зовнішнього транспорту вугілля від шахт є залізничний транспорт.

Для досягнення підвищення ефективності вуглевантажних комплексів створено низку заходів на покращення процесу навантаження вугілля у залізничних вагонах. З отриманих результатів з'явилися автоматизовані комплекси навантаження на вугілля.

Обов'язковість присутності таких установок обумовлюється зростанням споживання вугілля, отже і вугледобувних майданчиків, через що необхідно підвищити рівень якості завантаження вугілля шляхом повної автоматизації процесу навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виконаний аналіз сучасних моделей вуглевантажувальних комплексів [1-3], виконаний аналіз автоматизації у металургії [4-6], було проведено аналіз передачі даних у системах автоматизації [7-10].

Мета дослідження. Мета даної роботи полягає у розробці і дослідженні системи автоматичного керування вуглезавантажувального комплексу, котра зможе об'єднати окремі вузли в одну спільну систему для забезпечення більшого контролю та надійності процесу.

Методи дослідження. Проведені дослідження ґрунтувалися на загальних положеннях теорії автоматичного керування та теорії проектування комп'ютеризованих систем з використанням технологій Industry 4.0.

Виклад основного матеріалу. Існуючі системи автоматизованого керування вуглезавантаженням вагонів мають певні недоліки, які ускладнюють процес обслуговування та аналізу системи. Система роздібнена на окремі вузли які працюють окремо і ні як не спілкуються один з одним. Цей недолік не дозволяє у повному обсязі контролювати процес завантаження, що в свою чергу призводить до зменшення продуктивності та збільшення аварійності.

На основі докладного аналізу системи вуглезавантаження та зроблених висновках в попередньому розділі, пропонуємо розробити САК, котра зможе об'єднати окремі вузли в одну спільну систему для забезпечення більшого контролю та надійності процесу.

В основі проектованої системи закладено принцип контролю і передачі інформації окремих вузлів за допомогою хмарного сервісу з подальшою передачею інформації на пульт диспетчера та управлінням цих вузлів за допомогою програмованого логічного контролеру. Використання хмарного сервісу дозволить передавати інформацію по бездротовому зв'язку, так ми зможемо знизити витрати ресурсів на дротове підключення. А контролер дозволить побудувати розподілену систему управління та диспетчеризації, яку можна використовувати у рамках одного пристрою.

Функціональна схема САК. Для проектування модернізованої САК вуглезавантажувального комплексу була розроблена функціональна схема, яка наведена на рисунку 1.

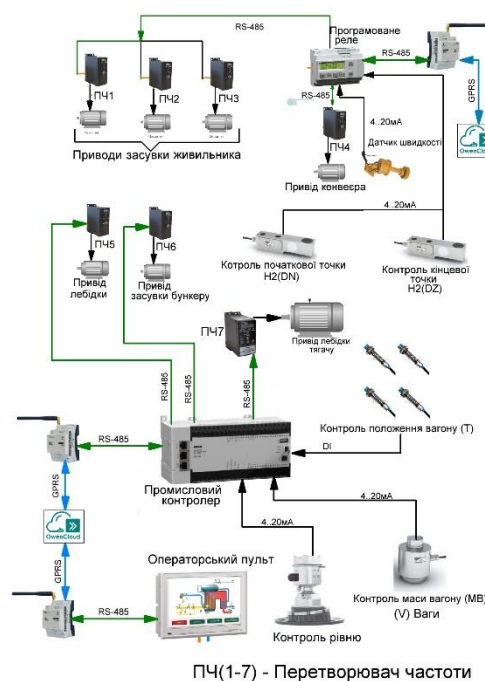


Рисунок 1 – Функціональна схема модернізованої системи автоматичного керування

Розроблена САК повинна забезпечити автоматичне завантаження вагону за обсягом і масою, рівномірний розподіл «шапки» вугілля у вагоні, зчитування даних з усіх датчиків, об'єднання вузлів вуглезавантажувального комплексу в єдину автоматизовану систему щоб в процесі завантаження мати можливість автоматичного корегування процесу навантаження.

Для пошуку оптимальних параметрів, таких як швидкість конвеєрної стрічки, кут відкриття засувки живильника та швидкість приводу лебідки тягача, необхідно знати реальні значення маси вагону та враховувати рівень заповнюваності вагону. Масу вагону ми вимірюємо за допомогою тензодатчику вбудованого в колійні ваги, щоб програмно вираховувати масу вагону. Це необхідно для формування звітності про масу вантажу. Датчик швидкості конвеєру необхідний для контролю прослизання стрічки. Початкове (DN) та кінцеве (DZ) положення конвеєру визначається тензодатчиками встановленими на полотно для переміщення конвеєру. Датчиком рівню ми вимірюємо рівень заповнюваності вагону. Індуктивні датчики необхідні для запису даних про положення вагону. Таким чином данні з тензодатчику у парі з індуктивними дають змогу корегувати швидкість приводу лебідки. Данні з тензодатчиків (DN) та (DZ) у парі з даними про масу і рівень заповнюваності вагону корегують швидкість конвеєрної стрічки. Кут відкриття засувки живильника корегується спираючись на вихідні данні з датчику швидкості стрічки, тобто чим вища швидкість тим більше відкривається засувка живильника.

Основою системи є програмований логічний контролер. Він бере на себе усі розрахунки тих даних котрі отримує з датчиків, тобто обчислює масу, рівень завантаження і швидкість. ПЛК на основі отриманих розрахунків видає завдання для всіх механізмів управління. В розпорядженні контролера знаходяться перетворювачі частоти, програмоване реле та операторський пульт для виводу інформації. Для перетворювачів частоти задається частота, котра обчислена контролером. Програмоване реле являє собою окрему підсистему, котра також спілкується з перетворювачем частоти і приймає та обробляє інформацію з датчиків.

Розробка алгоритмів САК. Розробка алгоритмів системи автоматичного керування вуглезавантажувальним комплексом необхідна для написання програмного забезпечення та створення єдиної системи на базі промислового контролеру. Алгоритми розробляються на основі вище описаних в роботі вимог до системи автоматичного керування та створеної і описаної модернізованої функціональної схеми з усім підібраним обладнанням.

Передбачається розробка алгоритмів основної системи та локальної системи. Основна система контролюється контролером ПЛК160. Локальна система основана на програмованому реле і керує засувками живильника та приводом конвеєру. Для локальної системи буде створена програма у середовищі OwenLogic.

Для початку необхідно описати як працює система в цілому щоб створити блок-схеми алгоритмів для подальшої розробки системи керування. На функціональній схемі, котра приведена у попередньому розділі на рисунку 1, процес починається з панелі оператора на якій треба обрати режим керування, ручний (ручний необхідний для відкати системи) або автоматичний. В автоматичному режимі сигнал пуску з панелі оператора виходить по RS485, потім сигнал перетворюється за допомогою мережевого шлюзу ПМ210 і далі передається на промисловий контролер ПЛК160. Наступним кроком ПЛК160 обробляє сигнал і видає відповідну команду на перетворювач частоти (ПЧ7) котрий керує приводом лебідки для початку руху залізничного складу. Після спрацювання першої пари індуктивних кінцевих, котрі встановлено за фіксує опори сигнал передається у контролер і звід у перетворювач

частоти (ПЧ7). Перетворювач частоти (ПЧ7) зменшує обороти приводу за допомогою зменшення частоти програмним шляхом з отриманням командного слова від ПЛК160. Коли спрацює друга пара індуктивних датчиків, сигнал з них та тензодатчику (МВ) опрацює ПЛК та видає інформацію на панель оператора щодо ваги вагона та готовності до завантаження.

Сигнал з ПЛК подається в програмоване реле через мережевий шлюз, реле приймає і обробляє сигнал та видає його на перетворювач частоти (ПЧ4) який запускає конвеєр, а згодом подає сигнали (ПЧ1), (ПЧ2), (ПЧ3) котрі керують приводами засувки живильника. У той же час програмоване реле отримує сигнали з датчика швидкості стрічки конвеєру та тензодатчиків(DN), (DZ) і на основі цих даних регулює швидкість конвеєрної стрічки і відкритість засувки живильника. Як тільки сигнал з тензодатчику(DN) стане нуль, то ПР200 віддасть сигнал на ПЛК160 котрий запустить привід лебідки укаткового ролика (ПЧ5), для формування шапки вагону.

Після спрацювання датчику рівня, та тензодатчику(МВ) ПЛК передає сигнал на (ПЧ6) про закриття засувки бункеру, та на припинення подачі вугілля до бункеру на програмоване реле яке в свою чергу спочатку закриває засувки живильника, а потім зупиняє конвеєр.

Сигнал про зупинку конвеєру та закриття засувки надходить до ПЛК, що в свою чергу запускає (ПЧ7) привід лебідки, яка підтягує наступні вагони під завантаження.

На блок-схемі, яка наведена на рисунку 2 (а), описано алгоритм за яким виконується завантаження у залізничні вагони. Початок програми починається з опиту усіх вузлів управління та аналізу локальних систем до яких входять системи під управлінням ПЛК160 та ПР200. Якщо помилку було виявлено то система передає код помилки до операторської панелі, де далі оператор приймає рішення щодо усунення помилки. Якщо ж помилок не виявлено і вихідний сигнал ALM1 та ALM2 дорівнюють нулю то система переходить до наступного кроку. Далі система записує початкові дані з усіх датчиків підключених до системи. Це дані з індуктивних датчиків, вагові дані, данні з рівнеміра та тензодатчиків. Потім йде перевірка на відсутність вагону на платформі для заповнення, це необхідно для того щоб уникнути зіткнення. Після перевірки починається процес підгонки вагону під заповнюючий бункер за допомогою маневрового пристрою. Після відключення маневрового пристрою відбувається замір маси вагону та перехід до наступного кроку заповнення вагону.

Наступним кроком алгоритму є передача вже визначених змінних до ПЛК та виведення на операторській панелі відповідної інформації що до готовності заповнення залізничного складу.

Аналогічно з попереднім кроком проводиться опитування всіх вузлів та зрівняння даних локальних систем. У разі коли помилок не виявлено перехід до кроку де отримані сигнали порівнюються та запускають блок керування засувкою бункеру, після чого йде перехід до локальної системи.

Розробка програми для локальної системи вуглезавантажувального комплексу буде проходити у середовищі OwenLogic. Насамперед це пов'язано з тим що майже уся система автоматичного керування побудована на базі приладів від компанії «ОВЕН», також це досить зручний інструмент для побудови САК. Мова програмування котра буде використовуватися у середовищі, це мова функціональних блоків яка відповідає стандарту MEK61131-3.

Для початку роботи у середовищі необхідно створити новий проект та обрати модельний ряд приладу.

Після створення нового проекту необхідно створити змінні котрі будуть використовуватися під час написання програми.

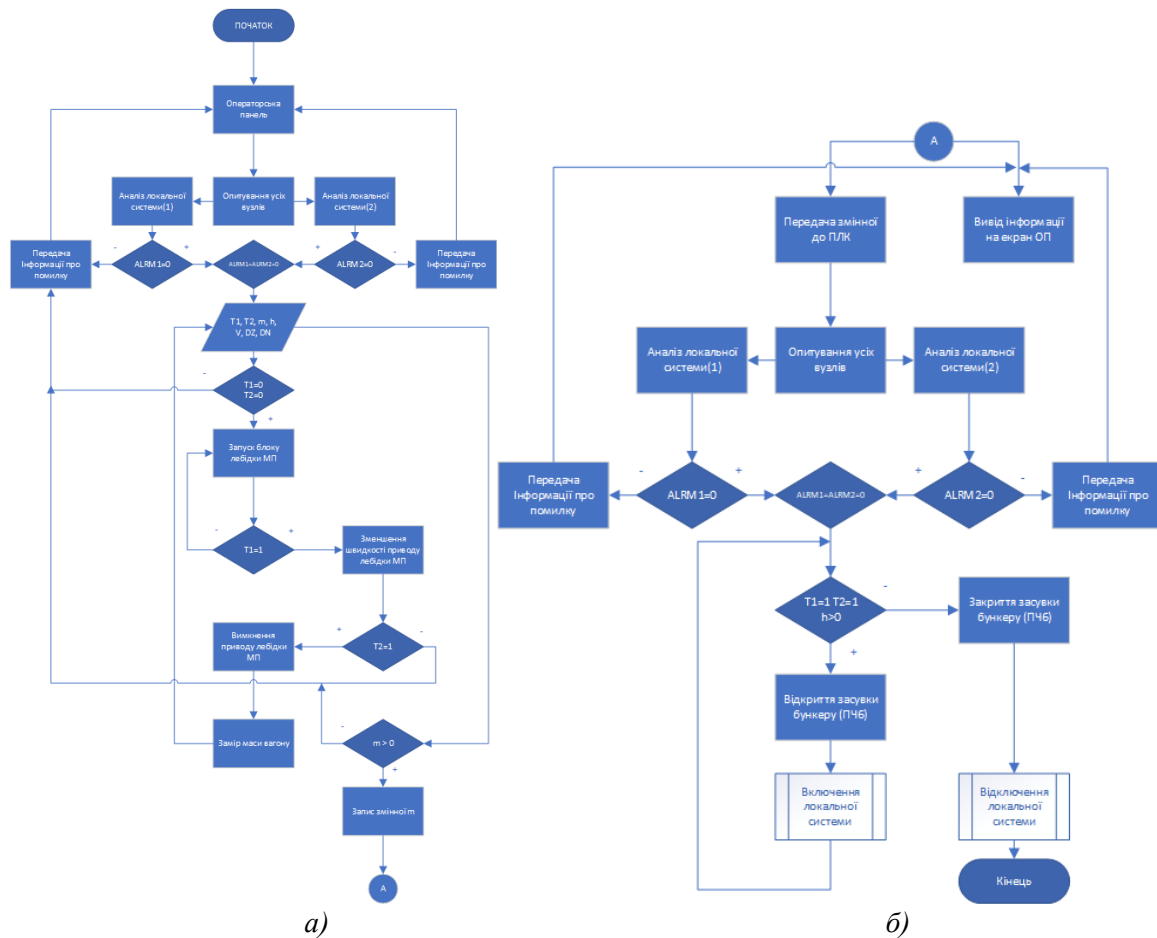


Рисунок 2 – Блок-схема основної програми

Серед вхідних змінних котрі приходять на програмоване реле з датчиків записуємо швидкість з типом змінної цілісна, кінцевий (DN) та (DZ) з типом змінної булева.

Також необхідно додати змінні котрі буде використовувати мережевий шлюз, перетворювачі частоти.

Наступним кроком необхідно створити блок управління перетворювачем частоти. Так як у програмі не передбачено такого функціонального блоку створимо його самотужки.

Програма виходить дуже громіздка тому блок управління ПЧВ було скомпоновано у макрос.

Треба додати до програми ще чотири блоки управління ПЧВ, та створити для кожного завдання.

На рисунку 3 зображена програма управління для локальної системи. На ньому ми бачимо завдання для кожного макросу ПЧВ. Для ПЧВ(1-3) використовуємо наступний принцип, коли приходять сигнал з датчику швидкості (AI1) ми його перетворюємо на цілковий і подаємо на блок множення MUL, сюди ж подаємо коефіцієнт множення від якого залежить на який кут будуть відкриватись засувки. Закриття засувки відбувається після спрацювання кінцевого (DZ).

Перетворювач частоти під номером чотири має постійну частоту роботи і керується мережевою змінною PUSK/ZUP, ПЧВ5 відповідає за лебідку укаткового

ролика, яка запускається після відключення кінцевого (DN) з затримкою сигналу на 5 секунд. Це необхідно для того щоб лебідка встигла виїхати на потрібну відстань.

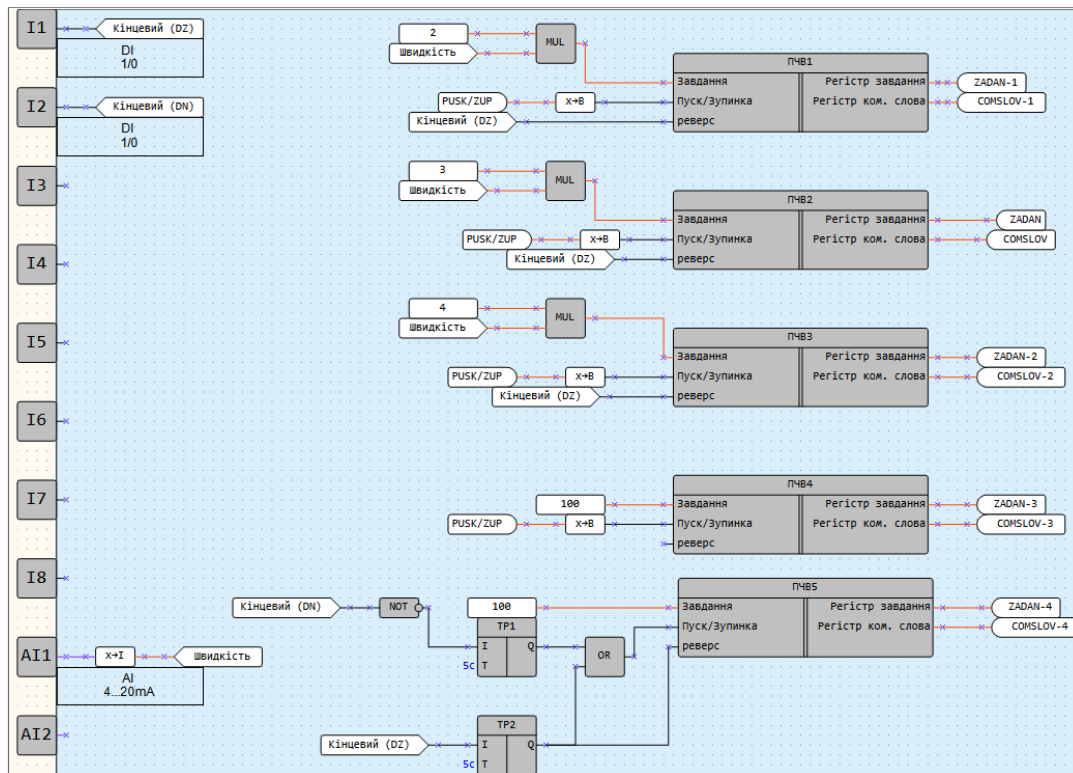


Рисунок 3 – Програма для локальної системи

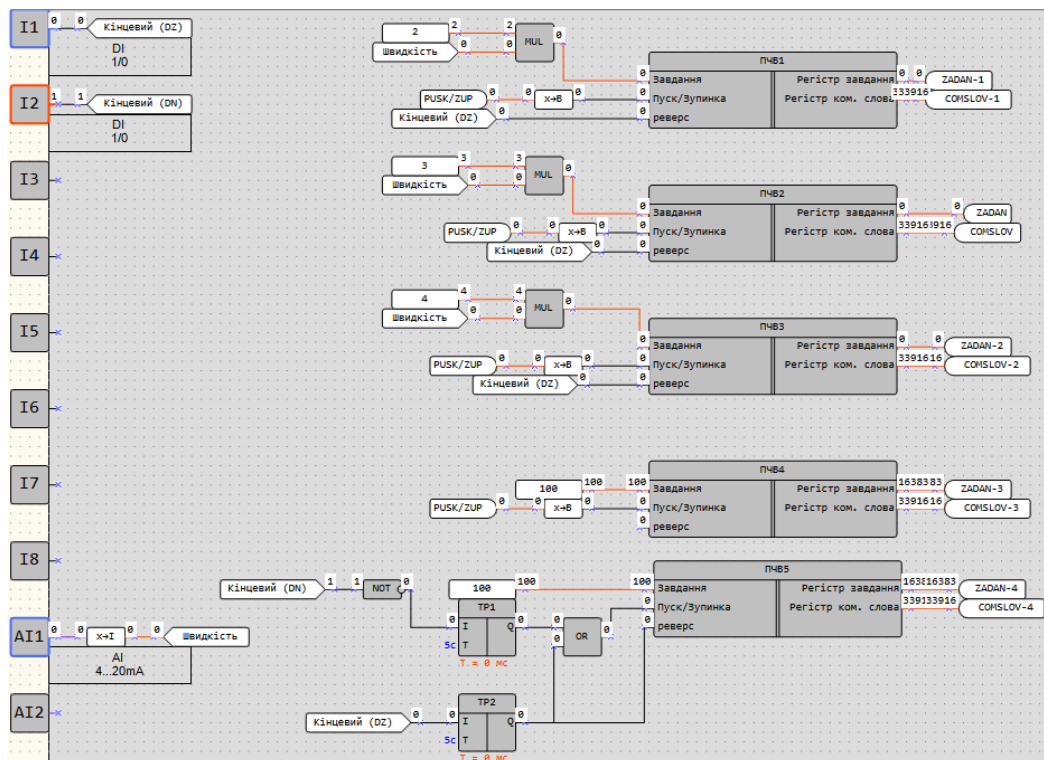


Рисунок 4 – Початок роботи програми

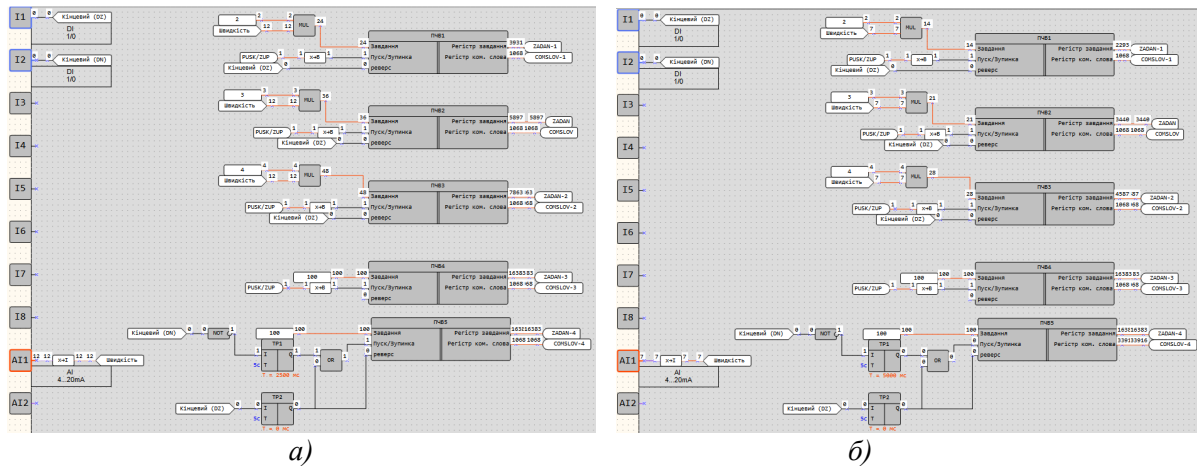


Рисунок 5 – Робота програми при подачі (а) та зміні (б) сигналу на (AI1)

На рисунку 6 зображено налагоджену та симульовану програму завантаження вагонів після проведення низки тестів на придатність до роботи. Програма відпрацювала стабільно помилок не виявлено, а отриманні дані задовольняють умовам алгоритму роботи усієї схеми.

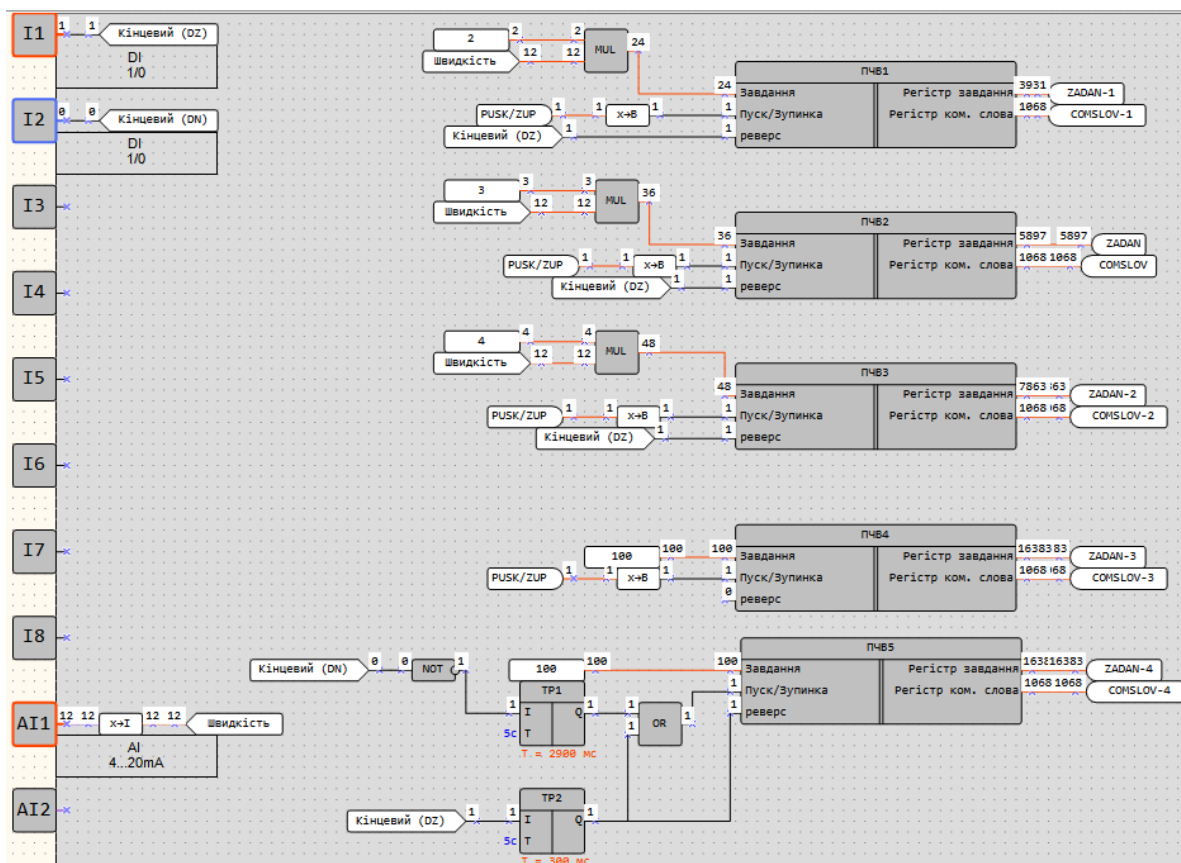


Рисунок 6 – Кінець роботи програми

Висновок. Розроблено і досліджено систему автоматичного керування вуглезавантажувального комплексу, котра зможе об'єднати окремі вузли в одну спільну систему для забезпечення більшого контролю та надійності процесу.

Розроблено модернізовану функціональну схему САК вуглезавантажувального комплексу, обрано комплекс апаратних засобів для технічної реалізації системи. Розроблені алгоритми завантаження вагонів для локальної та основної системи під керуванням програмованого реле і промислового контролера. Розроблено у середовищі програмування OwenLogic на мові стандарту МЕК61131-3 програму за модернізованими алгоритмами завантаження вагонів.

Список літератури

1. Гончаренко Б. М., Осадчий С. І., Віхрова Л. Г., Каліч В. М., Дідик О. К. Автоматизація виробничих процесів. - Кіровоград: Видавець - Лисенко В.Ф., 2016 - 352 с.
2. Вантажно-розвантажувальні роботи з насипними вантажами: Довідник / Д.С. Плюхін, Є.Г. Угодін, Іконніків. - М.: Транспорт, 1989. - 303 с
3. Демченко Н.П.. Технічні засоби передачі інформації в системах управління вугільних шахт. - М: Надра, 1984. - 245с.
4. Мелькумов Л.Р., Башков М. І., АСУ ТП вугільної шахти. - К.: Техніка, 1978. – 216 с.
5. Толнежников Л.І.. Автоматичне керування процесами шахт рудників: Підручник для вузів – 2-ге вид., перероб. та дод. - М.: Надра, 1985. – 352с.
6. Ramakrishnan Ramanathan, The IEC 61131-3 programming languages features for industrial control systems. «2014 World Automation Congress (WAC)» (Waikoloa, HI, USA 03-07 2014).
7. Control and Automation Systems for the Mining Industry. [Web resource]. – Access mode: <https://www.mining-technology.com>.
8. Sensing and automation in mining. . [Web resource]. – Access mode: <https://www.csiro.au/en/work-with-us/industries/mining-resources/sensing>.
9. Networking and Information Technology Research and Development. [Web resource]. – Access mode: <http://www.nitrd.gov/pubs/2012supplement/FY12NITRD.pdf>
10. The Federal Networking and Information Technology Research and Development Program: Background, Funding, and Activities [Web resource] – Access mode: : <https://www.fas.org/sgp/crs/misc/RL33586.pdf>

References

1. Goncharenko B. M., Osadchiy S. I., Vikhrova L. G., Kalich V. M., Didyk O. K. Automation of production processes. - Kirovohrad: Publisher - VF Lysenko, 2016 - 352 p.
2. Loading and unloading operations with bulk cargo: Handbook / D.S. Plyukhin, E.H. Ugodin, Iconniki. - M.: Transport, 1989. - 303 p.
3. N.P. Demchenko. Technical means of information transmission in coal mine management systems. - M: Nadra, 1984. - 245p.
4. Melkumov L.R., Bashkov M.I., ACS TP of a coal mine. - K.: Technika, 1978. – 216 p.
5. Tolnezhnikov L.I. Automatic control of processes of mines: Textbook for universities - 2nd ed., revised. and add. - M.: Nadra, 1985. – 352p.
6. Ramakrishnan Ramanathan, The IEC 61131-3 programming language features for industrial control systems. "2014 World Automation Congress (WAC)" (Waikoloa, HI, USA 03-07 2014).
7. Control and Automation Systems for the Mining Industry. [Web resource]. – Access mode: <https://www.mining-technology.com>.
8. Sensing and automation in mining. . [Web resource]. – Access mode: <https://www.csiro.au/en/work-with-us/industries/mining-resources/sensing>.
9. Networking and Information Technology Research and Development. [Web resource]. – Access mode: <http://www.nitrd.gov/pubs/2012supplement/FY12NITRD.pdf>
10. The Federal Networking and Information Technology Research and Development Program: Background, Funding, and Activities [Web resource] – Access mode: : <https://www.fas.org/sgp/crs/misc/RL33586.pdf>

Надійшла до редакції 30.10.2022

H. Telychko, O. Korshikov, D. Mashianov, O. Tkachenko

AUTOMATIC WAGON LOADING CONTROL SYSTEM USING INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES

Purpose: To develop a system for automatic control of car loading to combine separate nodes into one common system to ensure greater control and reliability of the process. Research methods are grapho-combinatorial.

Methodology: The research is justified by a logical synthesis based on the hardware of embedded control systems, programming in the language of functional blocks of the MEK61131-3 standard.

Results: The requirements for the structure of the automation system of coal loading complexes have been formulated, the basic automation equipment has been selected, and the control algorithms have been determined. Based on the requirements for the automation system, a functional scheme and its technical implementation of the automation of coal loading complexes as a single control system have been developed. The algorithm and subsequently the SAC program of the local system have been developed, which is able to show its performance in the "Owen Logic" environment. This made it possible to adjust and select the correct coefficients and possible calculated data.

Scientific novelty: Development of a functional model of the coal loading complex and the use of wireless communications, aimed at combining fragmented local systems into one common one to ensure greater control and reliability of the process.

Practical significance: Functional and structural model of the coal loading complex allows to increase its level of automation, reliability and efficiency of operation, to eliminate the shortcomings of the technical fragmentation of the system and to prevent significant material, time and economic costs for setting up the system.

Keywords: automatic control system, algorithm, programming, wireless communication, controller.

Відомості про авторів

Теличко Ганна Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та телекомунікацій ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; hanna.telychko@donntu.edu.ua

Коршиков Олексій Олегович, студент кафедри автоматики і телекомунікацій ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; oleksii.korshykov.kita@donntu.edu.ua

Машьянов Данило Сергійович, студент кафедри автоматики і телекомунікацій ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; danylo.mashianov.kita@donntu.edu.ua

Ткаченко Олег Ігорович, студент кафедри автоматики і телекомунікацій ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; oleh.tkachenko.kita@donntu.edu.ua

Telychko Hanna, PhD, Docent of Automation and Telecommunications Department, Donetsk National Technical University; hanna.telychko@donntu.edu.ua

Korshikov Oleksii, student of the Department of Automation and Telecommunications, SHEE Donetsk National Technical University; oleksii.korshykov.kita@donntu.edu.ua

Mashianov Danylo, student of the Department of Automation and Telecommunications, SHEE Donetsk National Technical University; danylo.mashianov.kita@donntu.edu.ua

Tkachenko Oleh, student of the Department of Automation and Telecommunications, SHEE Donetsk National Technical University; oleh.tkachenko.kita@donntu.edu.ua

УДК 331.45

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-171-182](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-171-182)

Г.І. Туровська, О.В. Богданенко

ЗАСТОСУВАННЯ ФАКТОРНОГО АНАЛІЗУ ТА МЕТОДУ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК ДО ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ НАВЧАЛЬНИХ ОРГАНІЗАЦІЙ З ОХОРОНИ ПРАЦІ

Мета. Розробка методики оцінки ефективності навчальних організацій з охорони праці та побудова системи відповідних ризик-оцінок.

Методика. Оцінка ефективності навчальних організацій з охорони праці ґрунтувалася на використанні «пелюсткових діаграм» спільно із факторним аналізом для визначення важливих індикаторів моніторингу навчання та методу експертної оцінки для побудови системи відповідних ризик-оцінок.

Результати. У статті, на підставі результатів моніторингу, анкетних опитувань, застосування методу експертних оцінок, було проведено оцінку стану ефективності навчальних організацій. Оцінка проводилась за кожною навчальною організацією з визначенням відповідних рівнів і найважливіших індикаторів, що впливають на ефективність навчання з охорони праці, які були відповідно згруповані. Проведено аналіз експертних оцінок для виділених груп індикаторів та представлено критерії їх оцінки. Виконано аналіз для формування висновків щодо підвищення ефективності навчальних організацій з охорони праці з розробкою заходів для поліпшення існуючого стану. Здійснено обґрунтування відповідності запропонованих методів оцінки індикаторів, їх наповнення відповідно до критеріїв оцінювання.

Наукова новизна. Розроблено методику оцінки ефективності навчальних організацій з охорони праці. Обґрунтовано застосування «пелюсткових діаграм» для оцінки ефективності навчання, що дає можливість визначення найбільш важливих індикаторів навчання за результатами експертного опитування в факторному аналізі. Обґрунтовано існуючі вимоги до навчання з охорони праці з виявленням взаємозв'язків між індикаторами та здійснено їх оцінку на підставі застосування факторного аналізу і методу експертних оцінок.

Практична значимість. Використання розробленої методики на практиці дозволить знизити кількість нещасних випадків і професійних захворювань працівників, підвищити якість навчання та отримати мотивацію на успіх та освітній ефект.

Ключові слова: охорона праці; навчання; пелюсткова діаграма; індикатори; експертна оцінка.

Вступ. Навчання з питань охорони праці – це навчання працівників з метою отримання необхідних знань і вмінь з питань охорони праці або безпечного ведення робіт [1], що є частиною комплексу заходів з охорони праці в системі управління охороною праці (СУОП). Вивчення та виявлення можливих причин виробничих нещасних випадків, професійних захворювань, розробка заходів і вимог, спрямованих на усунення цих причин в процесі навчання з охорони праці, дозволяють створити безпечні й нешкідливі умови праці для працівників.

Найбільш важливий результат навчання – отримання рекомендацій щодо полегшення умов праці при виконанні своїх обов'язків на робочому місці, зниження шкідливого й небезпечного впливу виробничих факторів на робочих місцях, а також сформованість та удосконалення рівня компетентностей щодо вирішення завдань професійної діяльності, пов'язаних із забезпеченням безпеки працівників під час роботи та наявність основних загальнокультурних і професійних компетентностей з охорони праці. Після проведення навчання доцільним є оцінка його ефективності, щоб зрозуміти, чи правильно було обрано методику навчання та чи потрібно щось змінювати у майбутньому [2]. Тому розробка методики оцінки ефективності навчальних організацій з охорони праці наразі є доцільною і актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Необхідність навчання з охорони праці обґрунтована рядом вчених [3-7] як превентивний фактор зниження виробничого

травматизму і професійних захворювань для працівників, які можуть потенційно використовувати свої можливості для досягнення цілей, уникаючи небезпеки. Наприклад, людина з низькими психофізіологічними якостями може забезпечити необхідну безпеку тільки за рахунок розвитку професійних якостей і високої мотивації до безпечної праці. При цьому система навчання з охорони праці повинна бути неформальною, а органічно поєднуватися з технологічним процесом і організацією виробництва. У праці [3] обґрунтовано, що проведення належного навчання з питань безпеки та гігієни праці має першорядне значення навіть для малих підприємств.

Навчання безпечній діяльності є ефективним засобом вироблення навичок безпечної праці. У своїй практичній діяльності людина опирається, як було зазначено Шишковим В.З у книзі «Психологія безпеки», на дві категорії знань: отриманих від викладача, від більш досвідченого колеги або з книг («холодні» знання); накопичених у своїй практичній діяльності, на власному досвіді та власних помилках («гарячі» знання). З точки зору психології, при навчанні питанням безпеки праці, необхідно «холодні» знання викладати працівнику в такій формі, щоб вони якомога легше перетворилися в їхній свідомості для вирішення практичних завдань і знаходили якнайшвидше підтвердження в «гарячих» знаннях.

Відомо, що значно складніше навчити працівників вмінню приймати правильні рішення і уникати супутніх помилок, ніж виробити в них навички і закріпити прийоми безпечної праці. Навчання безпечній праці нерозривно пов'язане з професійним навчанням. Тому вироблення рухових, сенсомоторних та інших трудових навичок слід орієнтувати не тільки на отримання високих виробничих результатів, але обов'язково на отримання їх найбезпечнішим способом, врахувавши основні причини помилок, що призводять до травм [4], і те, що в більшості нещасних випадків причинами є особисті якості працівників [8]. Такий взаємозв'язок прослідковується також у книзі «Психологія і безпека» психолога Котика М.А.

У праці [6] наведено результати аналізу зв'язку зростання числа пунктів правил і числа їх порушень. Результатом дослідження був висновок про практично пропорційне зростання числа порушень при зростанні кількості пунктів правил. Тому є нагальна потреба скорочення числа пунктів правил безпеки, а при появі змін в них акцентувати увагу працівників на нових елементах правил, обґрунтуванні й поясненні їх необхідності.

Таким чином, створення психологічного настрою на безпеку, стимуляція безпечної діяльності, навчання їй, контроль за виконанням правил безпеки слугують однієї важливої мети – вихованню безпечної поведінки.

Мета статті полягає в розробці методики оцінки ефективності навчальних організацій з охорони праці та побудові системи відповідних ризик-оцінок.

Методи дослідження. Оцінка ефективності навчальних організацій з охорони праці ґрунтувалася на використанні «пелюсткових діаграм» (рис. 1) спільно із факторним аналізом для визначення важливих індикаторів моніторингу навчання, що впливають на його ефективність, та методу експертної оцінки для побудови системи відповідних ризик-оцінок.

З рис. 1 бачимо, що за результатами факторного аналізу та опитувань експертів найбільш значущі індикатори за коефіцієнтами відносної важливості. Відповідно, їх роль у загальній оцінці ефективності навчальної організації найбільша, і тому при зниженні величин за цими індикаторами нижче нормативних критеріїв оцінки індикаторів знижується і загальна величина ефективності навчальної організації. Виходячи з цього, немає необхідності піддавати оцінці всі індикатори, крім найбільш значущих. Це значно скорочує час на визначення оцінки ефективності навчання з охорони праці без істотних помилок загальної оцінки ефективності навчальної

організації з охорони праці. Також такі діаграми дозволяють ув'язати кількість працівників, що пройшли навчання в навчальних організаціях з охорони праці з конкретним значенням індикатора; побачити значущі результати навчання в процентному співвідношенні тестування; значущий чи ні фактор перездачі; як впливає на індикатори здатність працювати без порушень працівників, які пройшли навчання з охорони праці; факт своєчасності подачі на перездачу. При цьому, все це пов'язується як з якісним (своєчасність), так і кількісним (зниження травматизму, захворювань) результатом трудових процесів на підприємствах, в організаціях, що є наразі важливим питанням.

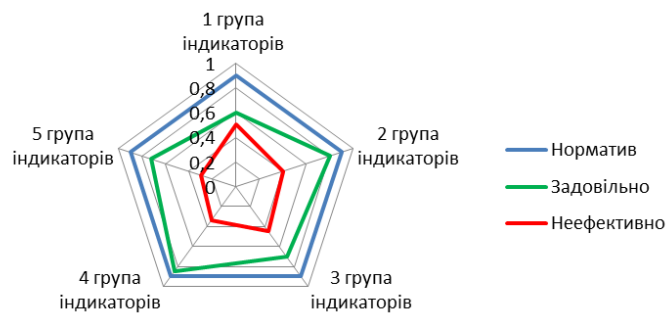


Рисунок 1 – Пелюсткова діаграма індикаторів ефективності навчання навчальних організацій з охорони праці

За цими підприємствами (організаціями) можна вказувати та оцінити:

- зв'язок подачі знань з практикою, з видом економічної діяльності працівників підприємства (організації), яким проводяться навчання з охорони праці;
- рівень подачі матеріалів про міжнародні стандарти з охорони праці;
- чи є оновлення нормативно-правової бази, чи враховується передовий досвід в галузі охорони праці;
- висвітлення питань психології праці, ризику, тобто приводяться чи ні психофізіологічні вимоги до професій працівників;
- специфіка обладнання та технологічних процесів, висвітлення спеціальних розділів з безпеки праці тощо.

Основне призначення «пелюсткової діаграми» – дати графічне уявлення про рівень функціонування бізнес-процесу (проблемної області) у порівнянні з іншими організаціями. Основною метою застосування діаграми є: визначення того, яка проблема є найбільш серйозною і важливою; порівняння рівнів серйозності проблем і причин. У такої діаграми акцент робиться на величину показників, які використовуються в діаграмі.

Для побудови «пелюсткових діаграм» за даними індикаторів моніторингу навчальних організацій використовується табличний процесор MS Excel [5]. Такі «пелюсткові діаграми» («діаграма-павутина» або «діаграма-зірка») в Excel – діаграми, в яких значення кожної категорії йдуть уздовж окремої осі. Тому пелюсткова діаграма часто використовується в тих випадках, коли необхідно відобразити одну або кілька груп даних за різними категоріями.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до СУОП дуже важливою підпрограмою є реалізація заходів щодо забезпечення безперервної підготовки працівників з охорони праці, значна увага приділяється питанню якості навчання з питань охорони праці працівників організацій, що особливо актуально для малого і

середнього бізнесу. У багатьох областях України з цією метою проведено узгодження навчальних планів і програм навчання з охорони праці працівників організацій і новостворених навчальних центрів. Доречним є те, що перед початком складання навчальних програм, необхідно визначити потреби у навчанні персоналу підприємства як у якісному, так і в кількісному аспектах, а після проведення навчання доцільним є оцінка його ефективності [2]. При цьому кожний курс навчання повинен відповідати вимогам чинних нормативно-правових актів з використанням найбільш ефективних і передових методів навчання. Регламентує дане питання Закон «Про охорону праці» (стаття 18) та Кодекс законів про працю, в статтях якого закріплено, що саме роботодавець зобов'язаний за свій рахунок забезпечити, а працівник повинен пройти навчання з охорони праці.

Для досягнення безперервного та безпечного стану виробничого процесу роботодавцю потрібно організувати відповідне навчання з питань охорони праці посадових осіб, трудові обов'язки яких пов'язані з загальною організацією здійснення робіт на підприємстві. Порядок проведення навчання та перевірки знань з питань охорони праці визначається Типовим положенням [9]. При цьому головними визначальними факторами, що впливають на досягнення підприємством високих рубежів в умовах жорсткої конкуренції, є наявність на підприємстві висококваліфікованих фахівців і можливість підвищення професійного та освітнього рівня працівників.

Передовий міжнародний досвід показує, що впровадження на рівні підприємства або організації навчання не тільки сприяє усуненню небезпеки і знижує ризики, але і підвищує продуктивність праці й конкурентоспроможність підприємства. Ефективне навчання, як зазначають фахівці, сприяє зацікавленості, в тому числі економічній, і роботодавця, і кожного працівника в безперервному поліпшенні умов і охорони праці. У той же час, діючи на більшості вітчизняних підприємств СУОП не забезпечує належної ефективності. Це пояснюється, насамперед, формальним підходом роботодавців до її впровадження, тому вимоги положень про СУОП, затверджених на більшості підприємств, не виконуються. Досить часто в СУОП не беруть безпосередньої участі власники або ними уповноважені особи і працівники (робітники).

Як відомо, міжнародні норми в сфері охорони праці ґрунтуються на превентивних підходах, що передбачають залучення та соціальну відповідальність усіх учасників, у тому числі працівників, з метою розвитку культури попередження ризиків засобами освіти, обізнаності та профілактики [7].

Для організації профілактичних заходів, спрямованих на зниження травматизму і професійних захворювань, визначення пріоритетів для підвищення ефективності СУОП, виявлення найбільш вразливих моментів, які потребують оперативного втручання і виділення додаткового фінансування для їх виправлення, потрібна достовірна інформація про ці негативні явища та знання причин їх виникнення. Як зазначає автор статті [4], у структурі узагальнених технічних причин, аварій перше місце (близько 60 %) займають причини, пов'язані: з масовим порушенням дисципліни праці; з низьким рівнем культури виробництва, професійної підготовки працівників; зі зниженням відповідальності, вимогливості до контролю за дотриманням норм і правил з охорони праці.

Розглянувши існуючі програми, навчальні плани навчання і роботи навчальних організацій, було визначено як проблемні моменти, так і необхідні стандарти для ефективного навчання, які мають загальний для всіх характер [5]:

- наповнюваність, розподіл годин (пріоритетність однакової наповнюваності на кожен тему, якість планування тем);
- переходи з базових рівнів на більш складні при підготовці;

- наявність обліку зв'язку з попередньою тематикою, наведення прикладів про кумулятивний вплив небезпечних і шкідливих виробничих факторів;
- облік професійних якостей працівників, відповідальних за власне життя і життя оточуючих, за чітке виконання технологічних процесів;
- у процесі навчання повинен фіксуватися рівень знань, а не тільки підсумкова атестація;
- можливості сприйняття аудіовізуальної інформації;
- розробка презентацій, наповненість курсу сучасними медіапристроями: проекторами, екраном.

Обговорення результатів. Оцінка станів ефективності навчальних організацій проводилась на підставі результатів моніторингу, анкетних опитувань і застосування запропонованого методу експертних оцінок (в якості експертів, з кількістю не менше 15-20 осіб, були ті, хто пройшов навчання, навчається або атестовані фахівці сторонніх організацій). Розглядали як викладачів, що проходили навчання, так і посадових осіб і працівників підприємств міста.

Оцінка проводилася за кожною навчальною організацією з визначенням наступних рівнів: «1» – якщо він відповідає мінімальному рівню вимог законодавства, а також іншим додатковим вимогам щодо якості навчання з охорони праці; «-1» – якщо є порушення вимог охорони праці; «0» – якщо немає можливості оцінити даний показник точно. Запропоновані критерії оцінювання: від 90-100 – відмінно; 70-90 – добре; 60-70 – задовільно; до 60 – неефективне.

Представимо в табл. 1, за аналогією з методом перевірного листа, розроблений бланк індикаторів навчання навчальних організацій з охорони праці, який може застосовуватися на практиці.

Таблиця 1 – Бланк індикаторів навчання навчальних організацій з охорони праці

Група індикаторів	Характеристика індикаторів	Оцінки			Критерій оцінки
		1	-1	0	
1	2	3	4	5	6

Визначимо найважливіші індикатори, що впливають на ефективність навчання з охорони праці, та відповідно їх згрупуємо, створивши 5 груп [5]:

1. Ефективність за чіткістю розроблених програм і навчальних планів навчання з охорони праці.

2. Ефективність перевірки знань за результатами навчання.

3. Ефективність викладу матеріалу курсів за програмами і навчальними планами навчання з охорони праці.

4. Ефективність успіху при здачі курсів.

5. Ефективність щодо зниження рівня ризику на підприємстві.

Кожна група індикаторів включає сукупність відповідних показників. Наприклад, група 1 містить такі індикатори: розбиття курсу за темами; відповідність сучасним міжнародним стандартам; зв'язок між розділами; наповненість оновленою нормативно-технічною документацією курсів з охорони праці; виклад на понятійно-категоріальному рівні; включення спеціальних питань з безпеки праці та техногенної безпеки. Група 4 містить наступні показники: використання віртуальних комплексів прикладного програмного забезпечення; обґрунтування пунктів у розділах курсу;

дублювання положень нормативної документації; можливість тестування, самонавчання на тестових завданнях курсу; кількість тих, хто навчається, і показали достатні знання після закінчення курсу навчання; кількість тих, хто навчається, і яким необхідно повторно здати курс.

Проведемо аналіз експертних оцінок для виділених груп індикаторів. Як приклад (табл. 2), розглянемо 3 групу індикаторів (факторів): 1 – чіткість викладу; 2 – наводяться приклади з відповідних вимог професій, яких навчають; 3 – облік змін в нормативно-правовій документації з охорони праці з відсиленням попередніх; 4 – міжнародні норми соціальної відповідальності (стандарти) SA 8000 «Соціальна відповідальність», стандарти в сфері охорони праці: OHSAS 18001, ISO 45001; 5 – розгляд умов праці, змін і рекомендацій атестації робочих місць за умовами праці, зменшення в таблиці напруженості трудового процесу за параметрами, перегляд проведення за НШВФ, розрахунок тяжкості трудового процесу; 6 – можливість відпрацювання навичок на віртуальному комплексі з використанням прикладних програм; 7 – передмова до тем; 8 – наявність розділу культури безпеки праці та обговорення, дискусії; 9 – роз'яснення термінів (особливо нового трактування за зміною (редакцією, оновленням) НПАОП); 10 – використання матеріального супроводу курсу навчання; 11 – планові переходи між темами; 12 – дидактична побудова матеріалу курсів навчання.

Таблиця 2 – Таблиця рангів 3 групи факторів (індикаторів)

№ експерта	Фактори											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	4	12	5	8	7	1	3	9	10	11	6	2
2	7	11	3	2	10	12	1	4	8	6	5	9
3	9	1	7	3	5	2	8	11	4	10	9	6
4	12	9	7	4	5	1	1	9	4	7	12	2
5	6	7	2	1	4	5	8	3	11	10	9	12
6	2	6	7	1	12	5	8	3	10	4	11	9
7	7	1	9	10	11	2	3	5	8	4	12	6
8	2	8	12	4	7	3	10	11	1	9	11	5
9	3	11	2	7	8	1	4	6	10	5	12	9
10	9	12	3	7	6	11	1	2	5	8	10	4
11	1	2	11	7	8	5	4	12	9	3	5	6
12	10	3	8	11	2	4	12	6	7	1	9	5
13	6	2	4	12	9	8	11	5	3	1	10	7
14	7	9	3	6	2	10	12	1	4	11	8	5
15	6	9	11	12	3	7	4	8	10	1	8	5
16	10	5	8	1	11	12	3	7	9	2	4	6
17	4	7	11	2	5	4	8	6	12	1	3	10
18	11	10	3	5	7	12	8	1	4	2	9	6
19	5	3	9	10	6	8	11	1	8	12	4	2
20	2	4	10	8	5	1	11	3	7	2	12	9
Сума	123	132	135	121	133	114	131	113	144	110	169	125

В якості узгодженості експертів використовуємо коефіцієнт конкордації, який може приймати значення від 0 до 1. Якщо значення коефіцієнта конкордації дорівнює 0-0,1, то це означає, що зв'язку між оцінками експертів не існує, тобто, немає узгодженості їх думок.

Коефіцієнт конкордації розраховується наступним чином:

$$\sum_j^n R_{ij} = \frac{m \cdot (n+1)}{2}, \quad (1)$$

де m – кількість експертів; n – кількість індикаторів.

Обчислення середньої за всіма чинниками суми рангів:

$$\sum_j^n R_{ij} = \frac{20(12+1)}{2} = 130.$$

Знаходження відхилення суми рангів фактора від середньої суми:

$$D_i = \sum_j^n R_{ij} - \overline{\sum_j^n R_{ij}} \quad (2)$$

Кількість експертів – 20; кількість факторів – 12; максимальна оцінка – 12.

Сума всіх балів, виставлених усіма експертами, $S = 1550$. При цьому максимальна кількість балів, які могли б бути виставлені, $S_{\max} = 20 \times 12 \times 12 = 2880$.

Коефіцієнт конкордації:

$$W = \frac{S}{S_{\max}} = \frac{1550}{2880} = 0,538.$$

Для оцінки значущості значень коефіцієнта конкордації використовують критерій згоди X^2 , який визначається за формулою:

$$X^2 = \frac{(m-1) \cdot X^1}{m \cdot (n-1) - X^1} \quad (3)$$

$$X^1 = m \cdot (n-1) \cdot W \quad (4)$$

$$X^1 = 20 \cdot (12-1) \cdot 0,538 = 118,4$$

$$X^2 = \frac{(20-1) \cdot 118,4}{20 \cdot (12-1) - 118,4} = 22,14.$$

Для обробки таблиць рангів використовується статистика X^2 , що підкоряється F-розподілу Фішера з числами ступенів свободи.

Наступним етапом аналізу експертних оцінок є порівняння розрахункового критерію згоди з критерієм, який підпорядковується F-розподіленню Фішера:

$$\vartheta_1 = 12; \vartheta_2 = n - m - 1 = 240 - 12 - 1 = 227,$$

де n – число спостережень.

За таблицею F-розподілу Фішера [5] визначаємо інтерполяцією теоретичне значення $F_{\text{табл}} \rightarrow 1,715$:

$$\begin{aligned} F_{\text{табл}} &\rightarrow \left(1,8 - \frac{|1,8 - 1,57|}{|24 - 12|} (13 - 12) \right) = 1,78 \\ &\rightarrow \left(1,79 - \frac{|1,79 - 1,55|}{|24 - 12|} (13 - 12) \right) = 1,77 \\ &\rightarrow \left(1,72 - \frac{|1,78 - 1,77|}{|200 - 300|} (246 - 200) \right) = 1,715. \end{aligned}$$

Так як $X^2 = 22,14 > F_{\text{табл.}} = 1,715$, то узгодженість експертів є достатньою.

Далі розраховуємо критерій згоди.

Результати розрахунку представлено в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунку коефіцієнта конкордації і критерію згоди 3 групи факторів (індикаторів)

Показники	Фактори											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
d_i	7	-2	-5	9	-3	16	-1	17	-14	20	-39	5
d_i^2	49	4	25	81	9	256	1	289	196	400	1521	25
$\sum d_i^2$	2856											
W	0,538											
X^2	22,14											

Розрахуємо коефіцієнт відносної важливості (табл. 4).

Таблиця 4 – Перетворені суми рангів 3 групи факторів

	Фактори (індикатори)												Сума
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Сума рангів	123	132	135	121	133	114	131	113	144	110	169	125	
Перетворена сума рангів	12,6	11,7	11,5	12,8	11,7	13,6	11,8	13,7	10,8	14,1	9,2	12,4	145,9

Коефіцієнт відносної важливості визначається діленням перетвореної суми рангів за кожним фактором до загальної суми. Отримані результати зводяться в табл. 5.

Таблиця 5 – Коефіцієнти відносної важливості 3 групи факторів

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,09	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09	0,08	0,09	0,07	0,10	0,06	0,08

За результатами табл. 5 коефіцієнта відносної важливості будується «пелюсткова діаграма» (рис. 2). Значення в прикладі діаграми: 0,00-0,02 – крок системної шкали, 1-12 – найменування факторів – індикаторів; 0,01-0,10 – коефіцієнт відносної важливості.

З рис. 2 найбільш вагомими індикаторами, що впливають на ефективність навчання навчальними організаціями з охорони праці, є: 1 – чіткість викладу; 4 – міжнародні норми соціальної відповідальності (стандарти) SA 8000 «Соціальна відповідальність», стандарти в сфері охорони праці: OHSAS 18001, ISO 45001; 6 – можливість відпрацювання навичок на віртуальному комплексі з використанням прикладних програм; 8 – наявність розділу культури безпеки праці та обговорення, дискусії; 10 – матеріальний супровід.

Наведемо критерії оцінки індикаторів (за наведеними критеріями оцінювання) в табл. 6 та ризик-оцінку (табл. 7).

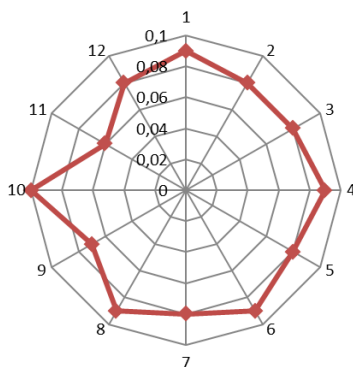


Рисунок 2 – Розподіл 3 групи індикаторів (факторів), що впливають на показник ефективності навчання навчальної організації

Таблиця 6 – Критерії оцінки індикаторів

Оцінка	Критерії
більше 0,4	Неефективне навчання
0,1–0,4	Є передумови до незадоволеності результатами навчання
менше 0,1	Ефективне навчання

Таблиця 7 – Рівень неефективності – зниження ефективності 3 групи факторів індикаторів (ризик-оцінка)

Фактори (індикатори)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Сума
Перетворена сума рангів	12,6	11,7	11,5	12,8	11,7	13,6	11,8	13,7	10,8	14,1	9,2	12,4	
Ймовірність	0,09	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09	0,08	0,09	0,07	0,10	0,06	0,08	1,0
Ймовірність з врахуванням експертів	1,30	1,13	1,08	1,35	1,11	1,52	1,15	1,54	0,95	1,63	0,69	1,2	14,65

Оцінка ефективності навчання з охорони праці – неефективне навчання, так як за критеріями оцінки індикаторів рівень ефективності навчання в числовому виразі становить 1,22.

За даним алгоритмом розрахунку оцінки ефективності навчання навчальними організаціями з охорони праці для покращання оцінки можна коригувати вплив системи факторів. У іншому випадку, якщо система факторів, що впливають на ефективність навчання з охорони праці навчальними організаціями не зміниться, то в наступному періоді не варто очікувати зменшення значень показників (причин) відмов, порушень.

Висновки. Відомо, що ефективність виконання технологічних процесів в умовах виробництва залежить від ефективності навчання з охорони праці. У цій статті виконана мета, що передбачала розробку методики оцінки ефективності навчальних організацій з охорони праці із застосуванням «пелюсткових діаграм» для визначення важливих факторів, що впливають на ефективність навчання (індикаторів навчання), та побудову системи відповідних ризик-оцінок за методом експертної оцінки за визначеними індикаторами навчання. Використання розробленої методики на практиці дозволить знизити кількість нещасних випадків і професійних захворювань

працівників, підвищити якість навчання та отримати мотивацію на успіх та освітній ефект.

Теоретична значимість проведеної роботи полягає в обґрунтуванні існуючих вимог до навчання з охорони праці з виявленням взаємозв'язків між індикаторами та здійсненні їх оцінки на підставі застосування факторного аналізу і методу експертних оцінок. За результатами оцінки індикаторів можливо запропонувати ряд заходів, що підвищать ефективність навчання з охорони праці. Визначено критерії оцінювання результатів навчання. Розроблений бланк індикаторів моніторингу навчальних організацій може застосовуватися на практиці та дозволить визначити за нормативними критеріями оцінку індикаторів моніторингу, а значить і оцінити ефективність навчання з охорони праці навчальними організаціями.

Список літератури

1. Навчання з охорони праці. URL: <https://cutt.ly/SLMhFHL> (дата звернення: 23.06.2022).
2. Оцінка ефективності проведеного навчання. *Консультант кадровика*. URL: <https://kadrhelp.com.ua/>
3. Barros B.L., Dore, A.R., Rodrigues, M.A. Effectiveness of Occupational Safety and Health Training Methods: A Study with Metalworking Small Enterprises. In: Occupational and Environmental Safety and Health. Studies in Systems, Decision and Control. 2019. Vol 202. PP. 631-640. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14730-3_67
4. Sharon Clarke, Christine Flitcroft. The effectiveness of training in promoting a positive OSH culture. 76 p. URL: <https://cutt.ly/QZeI5cg>
5. Богданенко О.В. Розробка методики оцінювання ефективності навчальних організацій з охорони праці. *Science, society, educational: topical issues and development prospects*: матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф., (м. Харків, 5-7 лип. 2020 р.). Харків, 2020. С. 84-90.
6. Щенніков Н.І. Психологічний акцент в аналізі виробничого травматизму і його профілактики // Щенніков Н.І., Курагіна Т.І., Пачурін Г.В. *Сучасні проблеми науки та освіти*. К., 2009. Вип. 4. С. 162-166.
7. Туровська Г.І. Впровадження ризик-орієнтованого мислення – важливий крок для українських підприємств. *Проблеми та перспективи розвитку охорони праці*: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. викладачів та фахівців-практиків та XI Всеукр. наук.-практ. конф. курсантів, студентів, аспірантів та ад'юнктів (м. Львів, 27 квіт. 2021 р.). Львів, 2021. С. 33-34.
8. Яремко З.М., Галаджун Я.В., Дерезенєць В.В., Муць І.Р., Ковтун Р.М., Третяк О.І. Кореляційні співвідношення між деякими психофізіологічними особливостями людини, рівнем уваги та ступенем задоволення основних потреб. *Безпека життя і діяльності людини – освіта, наука, практика*: матеріали II Міжнар. наук.-метод. конф., м. Київ, 2003. С.142-144.
9. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці (НПАОП 0.00-4.12-05): наказ Держнаглядохоронпраці від 26.01.2005, № 15.

References

1. Occupational health and safety training [Navchannia z okhorony pratsi]. Available at: <https://cutt.ly/SLMhFHL> (accessed June 23, 2022) (in Ukrainian).
2. Evaluating Effectiveness of the conducted training [Otsinka efektyvnosti provedenoho navchannia]. *Konsultant kadrovyka*. Available at: <https://kadrhelp.com.ua/> (in Ukrainian).
3. Barros, B.L., Dore, A.R., Rodrigues, M.A. (2019). Effectiveness of Occupational Safety and Health Training Methods: A Study with Metalworking Small Enterprises. In: Occupational and Environmental Safety and Health. Studies in Systems, Decision and Control, Vol 202, pp. 631-640. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14730-3_67 (in English).
4. Sharon Clarke and Christine Flitcroft (2013). The effectiveness of training in promoting a positive OSH culture. 76 p. Available at: <https://cutt.ly/QZeI5cg> (in English).
5. Bohdanenko O.V. (2020). Development methodology for evaluating the effectiveness of educational organizations in occupational health and safety [Rozrobka metodyky otsiniuvannia efektyvnosti navchalnykh orhanizatsii z okhorony pratsi]. *Science, society, educational: topical issues and development prospects*: materialy VIII Mizhnar. nauk.-prakt. konf. Kharkiv, pp. 84-90 (in Ukrainian).

6. Shchennikov N.I. (2009). Psychological emphasis in the analysis of industrial injuries and its prevention [Psykhologichnyi aktsent v analizi vyrobnychoho travmatyzmu i yoho profilaktyky] // Shchennikov N.I., Kurahyna T.I., Pachurin H.V. *Suchasni problemy nauky ta osvity*. Kyiv, issue 4, pp. 162-166 (in Ukrainian).

7. Turovska H.I. (2021). Implementation of risk-based thinking is an important step for Ukrainian enterprises. [Vprovadzhennia ryzyk-orientovanoho myslennia – vazhlyvyi krok dlia ukrainskykh pidpriemstv]. *Problemy ta perspektyvy rozvytku okhorony pratsi: materialy Vseukr. nauk.-prakt. konf. vykladachiv ta fakhivtsiv-praktykiv ta KhI Vseukr. nauk.-prak. konf. kursantiv, studentiv, aspirantiv ta adiunktiv*. Lviv, pp. 33-34 (in Ukrainian).

8. Yaremko Z.M., Haladzhun Ya.V., Derezhnets V.V., Muts I.R., Kovtun R.M., Tretiak O.I. (2003). Correlations between some psychophysiological characteristics of a person, the attention level and the satisfaction degree of basic needs [Koreliatsiini spivvidnoshennia mizh deiakymy psykhofiziologichnymi osoblyvostiamy liudyny, rivnem uvahy ta stupenem zadovolennia osnovnykh potreb]. *Bezpeka zhyttia i diialnosti liudyny – osvita, nauka, praktyka: materialy II Mizhnar. nauk.-metod. konf.* Kyiv, pp. 142-144 (in Ukrainian).

9. Typove polozhennia pro poriadok provedennia navchannia i perevirky znan z pytan okhorony pratsi (NPAOP 0.00-4.12-05): nakaz Derzhnahliadokhoronpratsi vid 26.01.2005, no 15 (in Ukrainian).

Надійшла до редакції 02.09.2022

H. Turovska, O. Bohdanenko

APPLICATION OF FACTOR ANALYSIS AND THE DELPHI METHOD TO EVALUATE THE EFFECTIVENESS OF OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH TRAINING ORGANIZATIONS

Purpose. Developing a methodology to evaluate the effectiveness of occupational safety and health training organizations and building a system of appropriate risk assessments.

Methodology. The effectiveness evaluation of occupational safety and health training organizations was based on using "radar charts" together with factor analysis to define important indicators of training monitoring and the Delphi method to build a system of appropriate risk assessments.

Results. In the article, the effectiveness assessment of training organizations has been carried out. This assessment is based on the results of monitoring, questionnaire surveys and applying the Delphi method. The assessment has been done for every training organization with the determination of relevant levels and the most important indicators, which affect the effectiveness of occupational safety and health training. The levels and the indicators have been grouped. The analysis of expert evaluation for selected groups of indicators has been performed and their evaluation criteria have been presented. The analysis has been done in order to make the conclusions about improving the effectiveness of occupational safety and health training organizations with developing measures for advancing the existing conditions. The substantiation of the correspondence of the proposed methods of evaluating the indicators, their filling in accordance to the evaluation criteria, has been carried out.

Scientific novelty. The methodology of the effectiveness evaluation of occupational safety and health training organizations has been developed. The use of "radar charts" has been justified for the effectiveness evaluation of training. This rationale gives the opportunity to define the most important training indicators from expert survey results in factor analysis. The existing requirements of occupational safety and health training have been justified with detecting the relationship between indicators. Their assessment has been carried out and based on the use of factor analysis and the Delphi method.

Practical significance. The use of the developed methodology in practice allows to reduce the number of occupational accidents and diseases, improve the quality of employee training and find the motivation to success.

Keywords: occupational safety and health; training; radar chart; indicators; expert evaluation.

Відомості про авторів

Туровська Галина Іванівна, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності, Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, вул. Соборна, 11; h.i.turovska@nuwm.edu.ua

Богданенко Олександр Вікторович, старший викладач кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності, Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, вул. Соборна, 11; o.v.bogdanenko@nuwm.edu.ua

Halyna Turovska, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate professor at the Department of Labour Security, Health and Safety, National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Soborna St., 11; h.i.turovska@nuwm.edu.ua

Oleksandr Bohdanenko, Senior Lecturer of the Department of Labour Security, Health and Safety, National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Soborna St., 11; o.v.bogdanenko@nuwm.edu.ua

УДК 613.6:331.105.6

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-183-192](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-183-192)**В.І. Федорчук-Мороз, Г.А. Герасимчук, Л.Ф. Бондарчук****ПЕРСПЕКТИВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СОЦІАЛЬНОГО ДІАЛОГУ ЗАДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ СТАНУ БЕЗПЕКИ ТА ГІГІЄНИ ПРАЦІ**

Мета. Пошук перспектив вдосконалення соціального діалогу між представниками влади, роботодавців та працівників задля покращення стану безпеки та гігієни праці в Україні на основі міжнародного досвіду.

Методика. Спеціальні методи досліджень – методи збору та узагальнення інформації, критичного аналізу та прогнозування, аналітичні методи (аналіз статистики травматизму та його причин), методи системного аналізу (для формулювання теоретичних і прикладних узагальнень).

Результати. Розглянуто актуальність проблеми вдосконалення соціального діалогу в Україні в умовах воєнного стану. На основі даних міжнародних досліджень зроблено припущення, що між ефективністю соціального діалогу в суспільстві та станом безпеки праці існує кореляція. Наведено приклади міжнародного досвіду, коли соціальний діалог є інструментом сприяння здоров'ю та безпеці на роботі. Показано, що на неефективність соціального діалогу у сфері праці вказує високий рівень виробничого травматизму в Україні. Проаналізовано причини виробничого травматизму за 2019-2021 роки, а також оперативні дані про нещасні випадки зі смертельним наслідком та групові нещасні випадки, пов'язані з виробництвом, у Волинській області. Виявлено, що один з індикаторів Цілей сталого розвитку – кількість смертельних виробничих травм на 100000 працівників – в Україні двічі перевищує цей показник у розвинутих європейських країнах. Для покращення стану безпеки та гігієни праці на підприємствах запропоновано утворювати консультативні комітети, які сприятимуть взаємодії між представниками влади, роботодавців та працівників. Також зменшенню кількості нещасних випадків на сучасному етапі сприятиме цифровізація, яка є одним із «векторів змін» у процесі виробництва чи надання послуг.

Наукова новизна. Дослідження полягає у вперше обґрунтованій можливості вдосконалення соціального діалогу між представниками влади, роботодавців та працівників задля покращення стану безпеки та гігієни праці в Україні на основі міжнародного досвіду.

Практична значимість. Для відновлення української економіки та швидкої інтеграції у європейське середовище визначна роль належить соціальному діалогу як дієвому інструменту вирішення проблем суспільства. Запропоновані рішення дозволять вдосконалити соціальний діалог між представниками влади, роботодавців та працівників для зменшення рівня виробничого травматизму в Україні.

Ключові слова: соціальний діалог, Міжнародна організація праці, безпека праці, виробничий травматизм, цифровізація.

Вступ. Соціальний діалог у сфері праці вже багато років становить значний інтерес у світі, адже саме на основі консолідації і взаєморозуміння різних груп людей можливий неухильний розвиток економіки та суспільства. В Україні, починаючи зі здобуття незалежності, у регулюванні соціально-трудових відносин беруть участь три сторони – держава, наймані працівники (в особі профспілок) та роботодавці (в особі їх об'єднань). Як відомо, такий принцип – трипартизм є головною передумовою успішної діяльності Міжнародної організації праці.

З початком повномасштабного вторгнення рф в Україну спостерігається певне зниження інтересу до проблематики соціального діалогу у сфері праці, проте, за словами Ігора Дядюри, заступника Міністра економіки з питань цифрового розвитку, цифрових трансформацій і цифровізації, заступника Співголови Національної тристоронньої соціально-економічної ради від сторони органів виконавчої влади, члена Президії Національної ради, під час війни особливо важливим є дотримання балансу інтересів держави, бізнесу та громадян. Щоб прийняті рішення були зваженими і дієвими, Уряд, підприємці та громадяни мають активізувати співпрацю [1].

Перед нашою державою постали серйозні виклики щодо відновлення української економіки, яка має бути трансформована для швидшої інтеграції у європейське економічне середовище, а також щодо реформ у сфері трудового права й соціального захисту.

За оцінкою фахівців, не зважаючи на політичний, економічний і соціальний прогрес реформ в Україні, соціальний діалог залишається занадто формальним та спорадичним, майже не орієнтується на результати й не спрямований на конкретні цілі [2].

На початку війни Держпраці (згідно з Постановою КМУ № 303 від 13.03.2022 р.) ввела мораторій на проведення планових та позапланових заходів державного нагляду (контролю) і державного ринкового нагляду. Проте, зважаючи на численні звернення громадян щодо порушення їх трудових прав, 1.07.2022 р. було прийнято Закон України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо оптимізації трудових відносин». Цим Законом було відновлено проведення перевірок з питань додержання законодавства про працю у період дії воєнного стану [3].

Якщо соціальний діалог між представниками влади, роботодавців та працівників носить лише формальний характер, то трудові права працівників можуть порушуватися, зокрема, щодо безпеки та гігієни праці. Високий рівень виробничого травматизму в Україні зумовлює пошук нових підходів і методів для вирішення даної проблеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Правові аспекти соціального діалогу в сфері праці досліджуються у працях таких відомих вітчизняних науковців, як: Колодій А.М., Поплавська О.М., Самолук Н.М., Сорочишин М.В., Трунова Г.А., Трюхан О.А., Цина А.Ю., Чубарова Т.В., Шумило М.М., Ярошенко О.М. та ін.

Принципи соціального діалогу у сфері праці розглядалися у дисертаційних дослідженнях Трюхан О.А. «Організаційно-правові форми соціального діалогу у сфері праці» (2006 р.), Сорочишина М.В. «Правові аспекти соціального діалогу у сфері праці» (2012 р.) та Яцишина В.В. «Принципи соціального діалогу у сфері праці» (2021 р.).

Поплавська О.М. стверджує, що подальше удосконалення соціально-трудова відносин неможливе без трансформації соціального діалогу з урахуванням вимог цифрової економіки [4]. «Для розширення співпраці та полегшення комунікацій між роботодавцями, профспілками та відповідними державними органами у забезпеченні тристороннього діалогу варто скористатися новітніми цифровими інструментами» – вважає Самолук Н.М. [5].

Більшість вищезазначених науковців розглядають соціальний діалог у сфері праці як категорію трудового права, хоча констатують, що соціальний діалог здійснюється також у сферах зайнятості, соціального забезпечення, охорони здоров'я та охорони праці.

Тому вивчення перспектив вдосконалення соціального діалогу задля покращення стану безпеки та гігієни праці залишається актуальним питанням.

Мета статті полягає у пошуку перспектив вдосконалення соціального діалогу між представниками влади, роботодавців та працівників задля покращення стану безпеки та гігієни праці в Україні на основі міжнародного досвіду.

Методи дослідження: спеціальні методи досліджень – методи збору та узагальнення інформації, критичного аналізу та прогнозування, аналітичні методи (аналіз статистики травматизму та його причин); методи системного аналізу (для формулювання теоретичних і прикладних узагальнень).

Виклад основного матеріалу. Внесок соціального діалогу у формування сучасного суспільства можна продемонструвати заснуванням Міжнародної організації праці (МОП) у 1919 році. МОП має на меті досягнення гідних умов праці та основних прав працівників (таких як безпечні та здорові умови праці, стандартизація робочого часу або гідна оплата праці).

Міжнародна організація праці втілює унікальний глобальний проект, який має на меті формувати світ праці. Це інституція, яка працює на всіх континентах. Сфера застосування і результати діяльності МОП впливають на найширше коло працівників, роботодавців, а також на окремих осіб загалом [6].

За визначенням МОП, соціальний діалог включає всі види переговорів, консультацій або просто обмін інформацією між представниками урядів, роботодавців і працівників з питань, що становлять спільний інтерес, що стосуються економічної та соціальної політики [7]. Він може існувати як тристоронній процес, де уряд є офіційною стороною діалогу, або він може складатися з двосторонніх відносин лише між працівниками та адміністрацією (або профспілками та організаціями роботодавців).

Європейська Комісія наголошує на важливості соціального діалогу та колективних переговорів для гарантування гідної оплати праці. Президент Європейської комісії Урсула фон дер Ляєн висловила переконання, що робітники повинні мати доступ до адекватної мінімальної заробітної плати та гідного рівня життя [8].

Становлення соціального діалогу в Україні було започатковане з 2006 року, коли було видано Указ Президента від 29.12.2005р. № 1871 «Про розвиток соціального діалогу в Україні» та утворено консультативно-дорадчий орган – Національну тристоронню соціально-економічну раду (НТСЕР) при Президентові України [2].

Прийняття в Україні Закону «Про соціальний діалог» у 2010 році започаткувало новий етап у розвитку взаємодії між профспілками й організаціями роботодавців, а також посилює їхній політичний вплив у координації з урядом.

Децентралізація влади та утворення територіальних громад (2015-2020 р.р.) створили певні виклики для представників профспілкових організацій, які діють на їх території. Виникає загроза зменшення кількості первинних профспілкових організацій, перерозподіл їх майна та штатів. На думку авторів [2], для посилення соціального діалогу після адміністративно-територіальної реформи необхідно зберегти галузевий принцип побудови профспілок.

Сучасна модель соціального діалогу в Україні характеризується як неефективна, тому що не має необхідних організаційних, інституційних та нормативно-правових ресурсів для того, щоб бути дієвим інструментом виходу країни з соціально-економічної кризи та забезпечення її сталого розвитку [9].

На нашу думку, на неефективність соціального діалогу у сфері праці вказує високий рівень виробничого травматизму в Україні. На рисунку 1 представлено стан виробничого травматизму в Україні згідно офіційних даних Державної служби України з питань праці за період 2019-2021 років. Зокрема, кількість нещасних випадків у 2019 році склала 3876 інцидентів, при чому найбільше їх було зафіксовано у вересні цього року – 358 випадок. У 2020 році трапилося 3634 випадків, пов'язаних з виробництвом, найбільше у грудні цього року – 378 інцидентів. Щодо 2021 року, то за 11 місяців було зафіксовано 3070 виробничих травм, найбільше у липні місяці – 333 нещасних випадки. Згідно [10], за цей період трапилося 255 (понад 74%) смертельних нещасних випадки через організаційні причини, 47 випадків (13,7%) – через психофізичні, техногенні,

природні, екологічні та соціальні причини, 42 випадки (12,2%) – через технічні причини.

Стан виробничого травматизму в Україні у 2019 - 2021 р.р. (кільк. осіб)

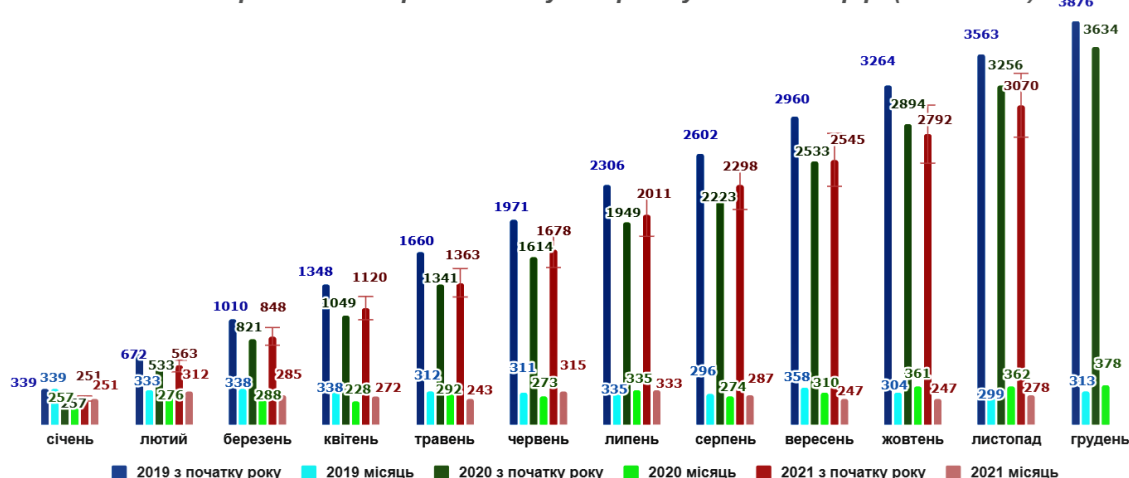


Рисунок 1 – Стан виробничого травматизму в Україні у 2019-2021 р.р.

Крім того, було проаналізовано оперативні дані про нещасні випадки зі смертельним наслідком та групові нещасні випадки, пов'язані з виробництвом і зареєстровані Держпраці за 2021 рік. Зокрема, за цей період у Волинській області було зафіксовано 4 нещасних випадки, пов'язаних з виробництвом, які трапилися в результаті ДТП, в т.ч. в результаті наїзду транспортних засобів; 1 – в результаті падіння потерпілого з висоти; 4 – в результаті падіння, обрушення, обвалення предметів, матеріалів, породи, ґрунту; 1 – в результаті дії предметів та деталей, що рухаються, розлітаються, обертаються, в т.ч. дії рухомих і таких, що обертаються, деталей обладнання машин і механізмів; 1 – в результаті дії шкідливих і токсичних речовин та 12 одиноких нещасних випадків зі смертельним наслідком в результаті інфікування COVID-19 при виконанні службових обов'язків [11].

На рисунку 2 представлено події, які призвели до нещасних випадків зі смертельним наслідком та групових нещасних випадків, пов'язаних з виробництвом, у 2021 році (Волинська область).

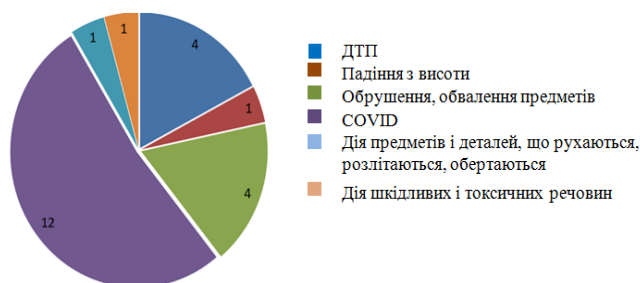


Рисунок 2 – Події, які призвели до нещасних випадків зі смертельним наслідком та групових нещасних випадків, пов'язаних з виробництвом, у 2021 році (Волинська область)

Дані міжнародних досліджень дозволяють припустити, що між ефективністю соціального діалогу в суспільстві та станом безпеки праці існує кореляція.

В європейській соціальній моделі соціальні партнери та соціальний діалог загалом відіграють ключову роль для сприяння покращенню умов праці.

На своїй 566-й пленарній сесії, що відбулася 19 і 20 січня 2022 р., Європейський економічний і соціальний Комітет (EESC) ухвалив висновок: соціальний діалог є інструментом сприяння здоров'ю та безпеці на роботі.

У цьому дослідницькому висновку EESC бачить соціальний діалог як інструмент для досягнення трьох ключових цілей: передбачення та управління змінами в світі праці; покращення профілактики нещасних випадків на виробництві та професійних захворювань; і бути готовим до будь-яких потенційних майбутніх криз зі здоров'ям [12].

В світовій практиці основними індикаторами ефективності роботи підприємств в сфері безпеки та гігієни праці є Lost Time Incident Frequency Rate LTIFR (коефіцієнт частоти травм з тимчасовою втратою працездатності) і Lost Time Accident Frequency Rate – LTAFR (коефіцієнт частоти нещасних випадків зі смертельним наслідком серед всіх випадків травматизму).

$$LTIFR = \frac{N \cdot 100000}{T} \quad (1)$$

де N – кількість випадків з тимчасовою втратою працездатності;

T – кількість відпрацьованих людиногодин.

$$LTIFR = \frac{S}{R} \quad (2)$$

де S – кількість НВ зі смертельним наслідком;

R – кількість травм з тимчасовою втратою працездатності і легких травм без втрати працездатності.

Індикатор 8.8.1 Цілей сталого розвитку – кількість смертельних нещасних випадків на 100000 працівників в Україні за період 2010-2020 років згідно даних Міжнародної організації праці [12] представлено на рисунку 3.

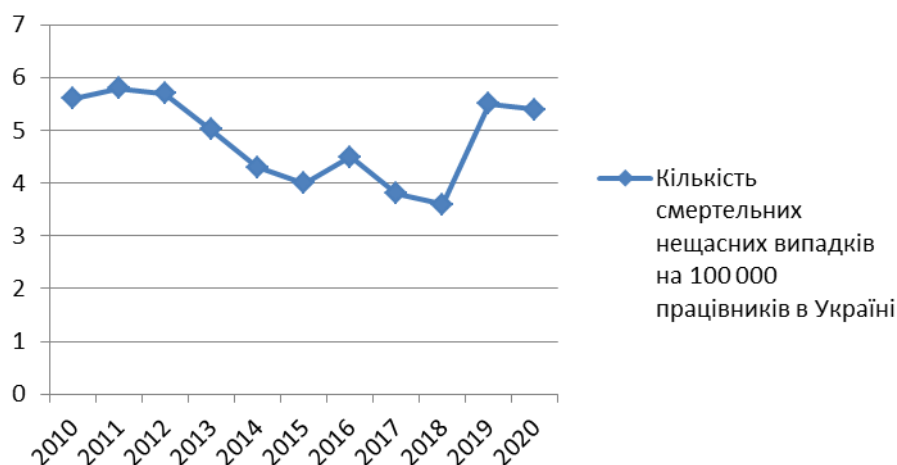


Рисунок 3 – Кількість смертельних виробничих травм на 100000 працівників в Україні за період 2010-2020 років

Згідно наведеного рисунка, кількість смертельних виробничих травм на 100000 працівників в Україні зменшувалася з 2011 до 2018 року, а у 2019 – зросла в більше, ніж 1,5 рази і склала 5,5. У 2020 році цей показник незначно зменшився. Якщо порівнювати з розвинутими європейськими країнами, наприклад, Австрією, Бельгією чи Швейцарією, то він вищий у два рази і більше. Це свідчить про низький рівень культури безпеки та гігієни праці в Україні.

За даними Європейського агентства з безпеки та гігієни праці, робоче середовище на малих підприємствах є небезпечнішим, ніж на великих. У Бельгії нещасні випадки на виробництві трапляються на 50 відсотків частіше в малих та середніх підприємствах, ніж у великих фірмах, у той час як працівники малих і середніх підприємств хімічної, металообробної та складальної промисловості – мають втричі вищу ймовірність постраждати від нещасного випадку на виробництві, ніж їхні колеги на великих підприємствах в тому ж секторі. Крім того, аварії на малих і середніх підприємствах, ймовірно, будуть більш серйозними. В Іспанії, рівень нещасних випадків вищий у малих та середніх підприємствах, ніж у великих фірмах [13].

Ефективно контролювати ризики безпеки та гігієни праці (БГП), запобігати нещасним випадкам і професійним захворюванням – і таким чином покращувати продуктивність – роботодавці повинні створити надійну систему управління БГП як невід’ємну частину своєї діяльності. Системи управління БГП є логічним і корисним інструментом для забезпечення безпеки та здоров’я працівників, а також на дотримання національного законодавства.

Як відомо, система управління охороною праці ефективна лише тоді, коли вона супроводжується позитивною культурою БГП на робочому місці.

Наприклад, з 1986 по 2013 рік у будівельній галузі в Гонконзі спостерігалось зниження рівня нещасних випадків на виробництві та професійних захворювань (рисунк 4) [13].

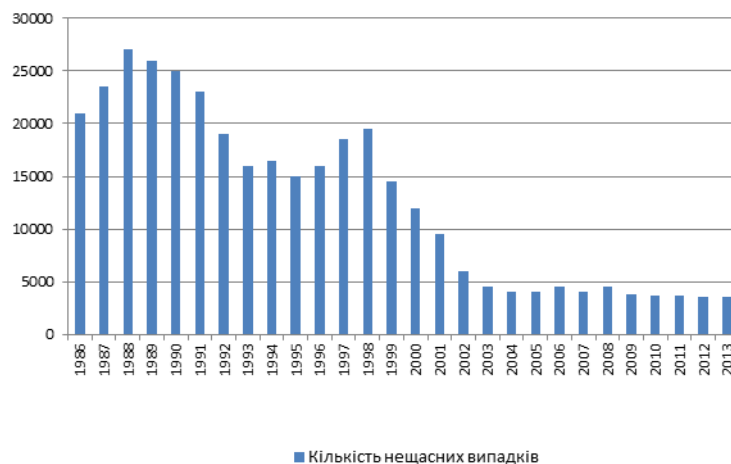


Рисунок 4 – Кількість нещасних випадків на виробництві та професійних захворювань у будівельній галузі в Гонконзі

Як видно з наведеного рисунка, запровадження та посилення культури безпеки на робочому місці може значно зменшити кількість нещасних випадків.

Для зменшення кількості нещасних випадків на сучасному етапі варто застосовувати цифровізацію, яка є одним із «векторів змін» у процесі виробництва чи

надання послуг. Взаємодія та комунікація між різними учасниками процесів виробництва/надання послуг посилюється, у тому числі у випадках, коли ці учасники географічно розосереджені, а до прийняття рішень, як правило, залучається ширше коло зацікавлених сторін.

Крім того, оцифрування може збільшити кількість віддаленої роботи, оскільки оцифровані процеси менш прив'язані до місця, ніж більш традиційні.

Хоча цифровізація відкриває нові можливості працевлаштування, існує також реалістичний ризик того, що деякі працівники втратять роботу. Для працівників, які постраждали від звільнень, Європейський фонд адаптації до глобалізації для переміщених працівників (EGF) може зіграти певну роль у підтримці перепідготовки та підвищення кваліфікації. Бюджет EGF на період 2021-2027 років становить 210 мільйонів євро; це може бути використано для фінансування 60-85% витрат на проекти, спрямовані на звільнених працівників [14].

Соціальний діалог і колективні переговори можуть сприяти пошуку безпрограшних рішень, прийнятних як для роботодавців, так і для працівників у разі реструктуризації. Існуючі структури, такі як інформаційні та консультаційні процедури, слід використовувати в цифровій реструктуризації; може знадобитися підвищення потенціалу залучених сторін для врахування потенційних конкретних наслідків такої реструктуризації. Це можна зробити на галузевому, національному рівні чи рівні ЄС з додатковою метою сприяння обміну досвідом, набутими уроками та передовою практикою.

Цифрові бізнес-моделі та організація роботи можуть покращувати стан безпеки праці чи погіршувати його. Наприклад, штучний інтелект може призвести до об'єктивнішого розподілу завдань і оцінки продуктивності, а автоматизація може покращити здоров'я та безпеку працівників, якщо фізично важкі чи небезпечні завдання виконують машини. З іншого боку, було виявлено, що оцифрування та робота на платформі можуть негативно вплинути на якість робочого часу, а також на автономію та гнучкість працівників [15].

Обговорення результатів. Кількість досліджень щодо впливу соціального діалогу на покращення безпеки праці на сьогодні досить незначна, в Україні їх майже немає. Більшість науковців розглядають соціальний діалог у сфері праці як категорію трудового права, хоча визнають, що він здійснюється також у сферах зайнятості, соціального забезпечення, охорони здоров'я та охорони праці. Дослідження закордонних науковців вказують на кореляцію між соціальним діалогом і покращенням умов праці: підвищення заробітної плати та винагороди, скорочену тривалість та гнучкість робочого часу, яка підходить працівникам за потреби, доступ до навчання та участь у ньому, існування політики рівних можливостей та заходи безпеки праці.

За даними Міжнародної організації праці індикатор 8.8.1 Цілей сталого розвитку – кількість смертельних виробничих травм на 100000 працівників в Україні вдвічі перевищує цей показник у розвинутих європейських країнах, що свідчить про низький рівень культури безпеки та гігієни праці.

На нашу думку, для покращення стану безпеки та гігієни праці на підприємствах, установах чи організаціях варто утворювати консультативні комітети, які матимуть тристоронню структуру та покращуватимуть взаємодію між представниками влади, роботодавців та працівників. Впровадження превентивних підходів, що базуються на міжнародних нормах, сприятиме впровадженню культури безпеки та гігієни праці на робочих місцях.

Крім того, для зменшення кількості нещасних випадків на сучасному етапі варто застосовувати цифровізацію, яка є одним із «векторів змін» у процесі виробництва чи надання послуг.

Висновки. Отже, в результаті проведеної роботи було запропоновано перспективи вдосконалення соціального діалогу між представниками влади, роботодавців та працівників задля покращення стану безпеки праці на основі міжнародного досвіду.

Очевидно, що в умовах повномасштабного вторгнення РФ, терористичного руйнування об'єктів критичної інфраструктури та цивільних об'єктів, коли прямі збитки українській економіці становлять понад 30 млрд доларів США, складно прогнозувати короткострокову позитивну динаміку у питаннях безпеки та гігієни праці. Проте дослідження у напрямку впливу соціального діалогу на покращення безпеки праці будуть і надалі актуальними в умовах відбудови нашої держави.

Список літератури

1. Тристоронній соціальний діалог залишається важливим чинником у прийнятті рішень в умовах воєнного стану – Ігор Дядюра. URL: <https://cutt.ly/mNm9Xhm>
2. Гостева Н., Тулей П., Давиденко В. та ін. Стан соціального діалогу в Україні та позиції соціальних партнерів. URL: <https://cutt.ly/CNm90jB>
3. Закон України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо оптимізації трудових відносин». URL: <https://cutt.ly/sNm9MsT>
4. Поплавська О.М. Соціальний діалог в Україні: стан, ефективність, перспективи розвитку в цифровій економіці. Науковий вісник Ужгородського національного університету. Випуск 26, частина 2. 2019. С.44-49.
5. Самолюк Н. Проблеми розвитку соціального діалогу в Україні. Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. 2022, № 4. С. 111-117.
6. Norecky J., Smejkal M. The importance of social dialogue and collective bargaining in the process of shaping working conditions. June 2021. Balkans Journal of Emerging Trends in Social Sciences 4(1):54-63. DOI: 10.31410/Balkans.JETSS.2021.4.1.54-63.
7. Social dialogue. ILO. URL: <https://cutt.ly/4Nm3d1N>
8. Advancing the EU social market economy: adequate minimum wages for workers across Member States. URL: <https://cutt.ly/pNm3AOB>
9. Як налагодити ефективний соціальний діалог в Україні? URL: <https://cutt.ly/JNm3FRW>
10. Статистика виробничого травматизму на кінець 2021 року. URL: <https://cutt.ly/KNm3HIR>
11. Оперативні дані про нещасні випадки зі смертельним наслідком та групові нещасні випадки, пов'язані з виробництвом і зареєстровані Держпраці. URL: <https://cutt.ly/kNm3ZQn>
12. Occupational safety and health indicators. URL: <https://cutt.ly/hNDB4zi>
13. The impact of social dialogue and collective bargaining on working conditions in SMEs / International Labour Office, Enterprises Department. URL: <https://cutt.ly/0Nm3CXn>
14. Enhancing social dialogue towards a culture of safety and health: What have we learned from the COVID-19 crisis? URL: <https://cutt.ly/TNm3BFF>
15. Eurofound (2022), Recovery from COVID-19: The changing structure of employment in the EU, Publications Office of the European Union, Luxembourg. URL: <https://cutt.ly/INm3NCY>

References

1. Tripartite social dialogue remains an important factor in decision-making under martial law – Ihor Dyadyura. URL: <https://cutt.ly/mNm9Xhm> (in Ukrainian).
2. Gosteva N., Tuley P., Davydenko V. and others. The state of social dialogue in Ukraine and the positions of social partners. URL: <https://cutt.ly/CNm90jB> (in Ukrainian).
3. The Law of Ukraine «On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine on Optimizing Labor Relations». URL: <https://cutt.ly/sNm9MsT> (in Ukrainian).
4. Poplavska O.M. Social dialogue in Ukraine: state, efficiency, prospects for development in the digital economy. Scientific Bulletin of the Uzhhorod National University. Issue 26, part 2. 2019. P.44-49. (in Ukrainian).

5. Samoliuk N. Problems of the development of social dialogue in Ukraine. Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Economic sciences. 2022, No. 4. P. 111-117. (in Ukrainian).
6. Horecky J., Smejkal M. The importance of social dialogue and collective bargaining in the process of shaping working conditions. June 2021. Balkans Journal of Emerging Trends in Social Sciences 4(1):54-63. DOI: 10.31410/Balkans.JETSS.2021.4.1.54-63. (in English).
7. Social dialogue. ILO. URL: <https://cutt.ly/4Nm3d1N> (in English).
8. Advancing the EU social market economy: adequate minimum wages for workers across Member States. URL: <https://cutt.ly/pNm3AOB> (in English).
9. How to establish effective social dialogue in Ukraine? URL: <https://cutt.ly/JNm3FRW> (in Ukrainian).
10. Statistics of industrial injuries at the end of 2021 URL: <https://cutt.ly/KNm3HIR> (in Ukrainian).
11. Operational data on fatal accidents and group accidents related to production and registered with the State Labor Office. URL: <https://cutt.ly/kNm3ZQn> (in Ukrainian).
12. Occupational safety and health indicators. URL: <https://cutt.ly/hNDB4zi> (in English).
13. The impact of social dialogue and collective bargaining on working conditions in SMEs / International Labour Office, Enterprises Department. URL: <https://cutt.ly/0Nm3CXn> (in English).
14. Enhancing social dialogue towards a culture of safety and health: What have we learned from the COVID-19 crisis? URL: <https://cutt.ly/TNm3BFF> (in English).
15. Eurofound (2022), Recovery from COVID-19: The changing structure of employment in the EU, Publications Office of the European Union, Luxembourg. URL: <https://cutt.ly/INm3NCY> (in English).

Надійшла до редакції 24.10.2022

V. Fedorchuk-Moroz, H. Herasymchuk, L. Bondarchuk

PROSPECTS FOR IMPROVING SOCIAL DIALOGUE FOR IMPROVING OCCUPATIONAL SAFETY AND HYGIENE

Purpose. Searching for prospects for improving the social dialogue between representatives of the authorities, employers and workers to improve the state of occupational safety and hygiene in Ukraine based on international experience.

Methodology. Special methods of research – methods of collecting and summarizing information, critical analysis and forecasting, analytical methods (analysis of injury statistics and its causes), methods of system analysis (for formulating theoretical and applied generalizations).

Results. The relevance of the problem of improving social dialogue in Ukraine in the conditions of martial law has been considered. Based on the data of international studies, it has been assumed that there is a correlation between the effectiveness of social dialogue in society and the state of labor safety. Examples of international experience where social dialogue is a tool for promoting health and safety at work have also been given. It has been shown that the ineffectiveness of a social dialogue in the field of labor is indicated by the high level of industrial injuries in Ukraine. The causes of industrial injuries for 2019-2021, as well as operational data on fatal accidents and group accidents related to production in the Volyn region, have been analyzed. It has been found that one of the indicators of the Sustainable Development Goals – the number of fatal industrial injuries per 100,000 workers – in Ukraine is twice as high as in developed European countries. In order to improve the state of safety and occupational hygiene at enterprises, it has been proposed to form advisory committees to facilitate interaction between representatives of the authorities, employers and employees. Digitalization, which is one of the «vectors of change» in the process of production or service provision, will also help reduce the number of accidents at the current stage.

Scientific novelty. The research consists in the first substantiated possibility of improving the social dialogue between representatives of the authorities, employers and workers in order to improve the state of safety and occupational hygiene in Ukraine on the basis of international experience.

Practical significance. For the restoration of the Ukrainian economy and faster integration into the European environment, an important role belongs to social dialogue as an effective tool for solving society problems. The proposed solutions allow to improve the social dialogue between representatives of the authorities, employers and employees to reduce the level of industrial injuries in Ukraine.

Keywords: social dialogue, International Labor Organization, occupational safety, industrial injuries, digitalization.

Відомості про авторів:

Федорчук-Мороз Валентина Іванівна, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри цивільної безпеки, Луцький національний технічний університет, fedorchukmorozvalentyna@lutsk-ntu.com.ua

Герасимчук Галина Андріївна, кандидат технічних наук, доцент, декан факультету цифрових, освітніх та соціальних технологій, Луцький національний технічний університет, exmeva@ukr.net

Бондарчук Лариса Федорівна, кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри цивільної безпеки, Луцький національний технічний університет, l.bondarchuk@lutsk-ntu.com.ua

Fedorchuk-Moroz Valentyna, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Civil Security, Lutsk National Technical University; fedorchukmorozvalentyna@lutsk-ntu.com.ua

Herasymchuk Halyna, PhD (Engineering), Associate Professor, Dean of Faculty of Digital, Educational and Technologies, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine; exmeva@ukr.net

Bondarchuk Larysa, PhD (Agriculture), Associate Professor, Department of Civil Security, Lutsk National Technical University; l.bondarchuk@lutsk-ntu.com.ua

УДК 622.22.553.4:519.85

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-193-205](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-193-205)

А.О. Хорольський, А.В. Косенко

РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ ВІДПРАЦЮВАННЯ ВИКИДОНЕБЕЗПЕЧНИХ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ

Мета. Полягає в розробці та реалізації моделі, щодо оцінки вірогідності виникнення раптових викидів вугілля та пилу, яка враховує технічні рішення та гірничо-геологічні умови для обґрунтування оптимальних технологічних схем відпрацювання викидонебезпечних вугільних пластів.

Методика. Застосовано комплексний підхід, що передбачає застосування графів, мережесих моделей, алгоритмів оптимізації для пошуку оптимальних технологічних рішень; застосування енергетично-силових моделей для оцінки вірогідності виникнення раптових викидів вугілля та газу; застосування динамічного програмування для обґрунтування технологічних параметрів (потужність пласта, ширина захвату очисного комбайну, довжина очисного вибою та ін.) відпрацювання викидонебезпечних вугільних пластів.

Результати. У процесі виконання роботи отримано та реалізовано нову математичну модель, що дозволяє оцінити ризики виникнення раптового викиду вугілля та газу під час відпрацювання вугільних пластів. На основі застосування моделі розроблено алгоритм обґрунтування технічних та технологічних рішень. Технічні рішення передбачають вибір засобів механізації очисного вибою, схему відпрацювання очисного вибою, заходи щодо дегазації вугільного пласта, а технологічні рішення передбачають обґрунтування довжини очисного вибою, ширину захвату виймального органу, швидкість посування лінії очисного вибою.

Наукова новизна. Полягає у створенні математичної моделі, яка дозволяє оцінити вірогідність виникнення раптового викиду вугілля чи газу, що дало можливість створити новий підхід, на основі застосування графів та мережесих моделей, який дозволяє визначити оптимальні технологічні рішення для відпрацювання викидонебезпечних вугільних пластів.

Практичне значення. Полягає у створенні пакету прикладних програм для вибору очисного обладнання у відповідності до визначених технологічних рішень. Загальний алгоритм обґрунтування технологічних схем відпрацювання викидонебезпечних вугільних пластів передбачає наступну послідовність дій: задання вихідних параметрів масиву гірських порід та розбиття їх на дискретні значення; для можливих маршрутів графу технологічних рішень визначається математичне очікування та дисперсія; визначається вірогідність раптових викидів вугілля та газу для досліджуваних параметрів; на основі розрахованої вірогідності отримуються залежності виникнення викиду вугілля чи газу у відповідності до значень параметрів (довжина лави, швидкість посування очисного вибою та ін.); на основі отриманих даних обґрунтовуються оптимальні технологічні схеми відпрацювання викидонебезпечних вугільних пластів; на основі застосування пакету прикладних програм обираються засоби механізації. Область застосування наведеного підходу не обмежується існуючими засобами механізації, гірничо-геологічними умовами вугільних пластів, існуючими технологічними схемами та ін.

Ключові слова: вірогідність, очисний вибій, вугілля, газ, технологічна схема, граф, програмне забезпечення.

Вступ. Процес розробки родовищ корисних копалин передбачає ряд вимог до інженерного, технологічного, організаційного забезпечення. Проте розробка вугільних родовищ корисних копалин, підземним способом, ускладнена несприятливими гірничо-геологічними умовами, високими ризиками виникнення раптових викидів вугілля, газу, вугільного пилу. Розвиток поглядів на природу виникнення раптового викиду вугілля та пилу завжди був пов'язаний ступенем знань про масив гірських порід та технологію ведення робіт. Вперше, природу виникнення раптового викиду вугілля та пилу розглядали «під кутом» наявності газу який знаходиться у вугільному пласті у вільній фазі. Внаслідок цього було розроблено ряд «гніздових» гіпотез. Автори цих гіпотез робили припущення про наявність в масиві гірських порід пустот («гнізд»), які заповнені газом. Тоді механізм раптового викиду пояснювався наступним чином: при підході до «гнізда» коли товщина стінки, яка відділяє «гніздо» від вибою є недостатньою для

здійснення опору тиску газу, тому відбувається раптовий викид вугілля та газу. Однак, надалі, в процесі розвитку гірничої науки, стало відомо, що газ може знаходитись не тільки у вільній фазі, але і в сорбованій фазі, виникли «осередкові» гіпотези. Під «осередком» розуміли ділянки вугільних пластів з підвищеною газоносністю. Внаслідок цих уявлень про «гнізда та осередки» було запропоновано буріння свердловин, як спосіб боротьби із раптовими викидами. Проте, наведений спосіб не дозволив позбутись негативного явища, яке супроводжувалося раптовим викидом вугілля та газу. Це стало підґрунтям для розробки нових, більш сучасних гіпотез, які базувались на впливі гірського тиску, як чинника виникнення раптового викиду. Гіпотези, були різними, проте відмінність полягала у превалюванні одного чи іншого виду гірського тиску, будь-то статичний, динамічний, тектонічний прояв гірського тиску. Однак, і ці гіпотези виявились недостатніми, для опису механізму виникнення. Тому, з'явилися сучасні гіпотези, які враховують сукупний вплив усіх цих факторів на механізм розв'язання раптового викиду. Саме тому, у представленій роботі застосовано комплексний підхід, який враховує і параметри вугільного пласта і наявні технологічні схеми.

В роботі [1] описано механізм виникнення раптового викиду вугільного газу та пилу, відповідно до якого раптовий викид виникає у разі лавиноподібного перевищення напружень межі міцності порід гірського масиву в результаті втрати стійкості крайової частини пласта корисних копалин, або будь-якого блоку порід, які знаходяться під опорним або консольним тиском, що призводить до його крихкого руйнування. Сьогодні існує ряд теорій виникнення раптового викиду: енергетична, силова, різні підходи до розв'язання задач, проте відсутнє чітке усвідомлення фізичної суті – єдине в чому дійшли згоди усі дослідники, то це розробка технологічних рішень щодо попередження раптових викидів вугілля та газу. Існує ряд сучасних досліджень про кінетику та механізм викидів порід і газу, що розглядають ці процеси не з позицій законів механіки пружного тіла та гідродинаміки газів, а з позицій електродинаміки, сил міжатомних взаємодій та квантової фізики, але в представленій роботі увага буде приділена саме технологічній частині боротьби з цим негативним явищем. Незалежно від того, яке є уявлення про «природу» виникнення раптового викиду вугілля та газу, єдиними є технологія відпрацювання вугільних пластів: довгими очисними вибоями за односторонньою схемою, довгими очисними вибоями за «човниковою» схемою, свердловинний видобуток; способи дії на пласт: нанесення поверхнево-активних речовин, зниження пластового тиску та ін.. Тому обґрунтування оптимальних технологічних схем відпрацювання викидонебезпечних вугільних пластів є актуальним науковим завданням. В представленій роботі буде наведено математичну модель оцінки ризиків виникнення раптових викидів, алгоритм обґрунтування оптимальних технологічних рішень, а також наведено систему підтримки прийняття рішень (СППР).

Аналіз останніх рішень і публікацій. Насамперед необхідно проаналізувати основні підходи, щодо прийняття оптимальних рішень – це дозволить розробити математичну модель, а також створити СППР для реалізації наведеного підходу. В роботі [2] наведено аналіз підходів щодо прийняття рішень та пошуку оптимальних технологічних схем. Із наведеного аналізу встановлено, що умовно підходи можна розділити на інформаційні та оптимізаційні. До інформаційних відноситься: метод аналізу ієрархій, дослідження операцій (дерева прийняття рішень, прийняття рішень в умовах невизначеності), а до оптимізаційних (математичне програмування, детерміновані, ймовірнісні моделі). Інформаційні моделі дають відповідь на те, яке рішення є кращим з точки зору якісних характеристик, а оптимізаційні – кількісних. Проаналізуємо ці групи підходів. Для прийняття рішень застосовують критеріальні оцінки, методи теорії прийняття рішень, суть яких полягає в розстановці найбільш значущих пріоритетів з подальшою оптимізацією параметрів. Базовий АНР (МАІ – метод

аналізу ієрархій) метод розроблений Т. Сааті [Thomas Saaty] [3], в роботах М. Атаєї [M. Ataei], С. Алпайя [S. Alpay], М. Даскіна [M. Daskin] описано застосування в гірничому виробництві. Однак, існує ряд труднощів: важливість і пріоритет критерію встановлює особа, що приймає рішення (ОПР) – для достовірного прийняття рішень повинна бути узгодженість між ОПР; велика вибірка і опитування не завжди гарантує правильний вибір, крім того, критерії вибору не завжди відповідають розв'язуваній задачі [4]. З огляду на специфіку виробництва енергії з вугілля були розроблені модифікації методу з урахуванням відхилень від моделі раціонального вибору (TODIM), а також відхилень від «ідеального» значення з наступною нормалізацією (Grey-ANP). Так само, набув поширення метод аналізу переваг (PROMETHEE), суть якого полягає в завданні функції переваги, порівнянні варіантів і подальшому ранжуванні отриманих функцій переваги. Даний метод використовували Ванг Чен [Wang Chen] для вирішення завдань транспортування вугілля, Жанг Джіанпінг [Zhang Jianping] для збалансування поставок матеріалів. Застосувати даний метод важко, тому що достовірно не відомі вагові коефіцієнти кожної групи параметрів (обладнання, технологічні параметри, техніко-економічні показники).

Залежно від характеру оптимізаційного параметра та його зміни в часі можуть бути використані методи лінійного, квадратичного, цілочисельного, геометричного програмування, що застосовуються в детермінованих моделях; також застосовують стохастичне програмування для ймовірнісних моделей. Єдиним недоліком описаних підходів є те, що вони не можуть бути використані в інформаційних моделях. Апробації в гірничому виробництві, описаних підходів, присвячені роботи А. Морина [A. Morin], А. Гайдара [A. Haidar], М. Бразил [M. Brazil], Д. Томаса [D. Thomas], О. Озтаса [O. Oztas], В.Г. Гриньова, В.І. Назимко, В.Н. Кухарева, В.І. Саллі. В роботі [5] проведено комплексний аналіз методів математичного програмування, а в роботі [6] проаналізовані економіко-математичні методи і моделі в плануванні та управлінні. Із наведеної класифікації видно, що незалежно від методу прийняття рішення необхідно обрати інструмент, що дозволить обґрунтувати оптимальні рішення для розробки викидонебезпечних вугільних пластів – і це ще один «підводний камінь», який може нівелювати усі попередні вдалі рішення. Від адекватності інструменту залежить ефективність процесу проектування. Під «адекватністю» інструменту розуміють його відповідність цільовій меті процесу проектування, водночас необхідно забезпечити економію часу, ресурсів, а отримане рішення повинно знаходитись в області раціонального проектування. На наше переконання інструмент прийняття рішень повинен відповідати таким вимогам: комплексність, тобто враховувати багатоманіття технологічних і гірничо-геологічних параметрів; варіативність, тобто враховувати різні технологічні схеми відпрацювання, різні заходи боротьби з викидами; наочність – ієрархічне та структуроване представлення можливих рішень; можливість інтерпретації – на основі цього можуть бути створені моделі «проектних» рішень, які будуть реалізовані у СППР. Усім цим критеріям відповідають граfi та мережеві моделі. Наш вибір, перш за все, пояснюється наступним чином: задача вибору оптимального способу відпрацювання викидонебезпечних вугільних пластів ускладнена багатоманіттям різних «за природою» виникнення та ступенем впливу параметрів, що здійснюють вплив на загальну ефективність мінімізації викидів вугілля і газу. Якщо враховувати й оптимізувати усі параметри одночасно, то це 2^N (де N – кількість параметрів задачі), що ставить неможливим її вирішення через брак обчислювальних ресурсів, а також детермінований ступінь впливу, під час етапів відпрацювання викидонебезпечних пластів. Проте можна застосувати декомпозиційний підхід. Суть декомпозиційного підходу полягає в тому, що на кожному етапі визначається

один – головний параметр, а інші – як допоміжні [7]. Від оптимізації саме цього параметру залежить ефективність процесу в цей проміжок часу.

Мета статті (постановка завдання). Мета роботи полягає в розробці та реалізації моделі, щодо оцінки вірогідності виникнення раптових викидів вугілля та пилу, яка враховує технічні рішення та гірничо-геологічні умови для обґрунтування оптимальних технологічних схем відпрацювання викидонебезпечних вугільних пластів. Для вирішення поставленої мети необхідно виконати такі завдання: розробити математичну модель, щодо оцінки вірогідності виникнення раптових викидів вугілля та газу залежно від технології ведення робіт; запропонувати алгоритм обґрунтування оптимальних технологічних схем відпрацювання викидонебезпечних вугільних пластів; реалізувати наведений підхід за допомогою СППР.

Методи дослідження. Відповідно до поставленої задачі умови можна сформулювати таким чином. Є вугільний пласт чи група вугільних пластів, небезпечних за раптовими викидами вугілля чи газу, водночас вони не захищені пластами-супутниками. Необхідно створити або обґрунтувати таку технологічну схему розробки пласта, щоб вірогідність виникнення раптового викиду в очисному вибою була мінімальною чи дорівнювала 0.

В математичній постановці, вказана задача, буде мати наступну постановку. Є впорядкований граф $G=(K, \Gamma)$ якісних характеристик технологічної системи та способів активної дії на масив гірських порід, для якого визначені допустимі шляхи від мінорант до мажорант.

Кожному допустимому маршруту $M_j \in M_\partial(G)$ від будь-якої $x_i \in X_i, x_j \in X_n$ відповідають дві цільові функції:

для енергетичної схеми

$$P_b(M_j) = F_j(\bar{S}, \bar{Y}) \rightarrow \min,$$

для силової схеми

$$P_b(M_j) = \Phi_j(\bar{S}, \bar{V}, \bar{Z}) \rightarrow \min,$$

при обмеженнях, які накладені на режими та геометричні параметри технологічної схеми:

$$\begin{aligned} \bar{Y} &\in \{\Phi_1\}CH^k \\ \bar{Z} &\in \{\Phi_2\}CH^m \end{aligned}$$

де $\bar{Y}$ – вектор параметрів, якими можна керувати, що належать області допустимих рішень $\{\Phi_1\}$;

$\bar{Z}$ – вектор дискретних (цілочисельних) параметрів, що належать області допустимих рішень $\{\Phi_2\}$;

$\bar{S}$ – вектор природніх даних (середовище), що характеризує властивості масиву вугілля та порід;

F_j, Φ_j – функція, що визначає вірогідність виникнення раптового викиду в очисному вибою.

Таким чином, отримане загальне формулювання проблеми у вигляді оптимізаційних математичних моделей. Для вирішення цієї проблеми необхідно виконати наступні етапи:

- обґрунтувати аналітичні форми функції F_j, Φ_j для визначення вірогідності виникнення раптових викидів вугілля за умов різних значень параметрів якими можна

керувати та дискретних, що належать до області допустимих рішень, тобто $\bar{Y}$, $\bar{Z}$ в маршрутах $M_j \in M_\theta(G)$;

- сформувати блок даних середовища в масив;
- «прив'язати» моделі до конкретних пластів, тобто сформувати вектор середовища $\bar{S}$.

Для переходу від загальної постановки задачі до прикладної необхідно формалізувати її. Тобто, в результаті рішення, може бути запропонована технологія розробки вугільних пластів, схильних до викидів, механізованим способом. Наведемо параметри, якими можна керувати x_1 – тип виймальної машини, x_2 – технологічна схема, x_3 – спосіб дегазації масиву гірських порід:

$$x_1 = \{x_{1,1}; x_{1,2}; x_{1,3}\},$$

де x_{11} – вузькозахватний комбайн;

x_{12} – струг;

x_{13} – буровий агрегат,

$$x_2 = \{x_{2,1}; x_{2,2}; x_{2,3}\},$$

де x_{21} – довгий очисний вибій з повним вийманням пласта за його потужністю;

x_{22} – довгий очисний вибій з «човниковою» схемою виймання;

x_{23} – короткий очисний вибій, очисний вибій-свердловина;

$$x_3 = \{x_{3,1}; x_{3,2}; x_{3,3}; x_{3,4}\},$$

де x_{31} – попередня дегазація вугільного пласта;

x_{32} – гідравлічний розрив вугільного пласта;

x_{33} – попереднє зниження гірського та газового тиску, в масиві порід;

x_{34} – без попередньої підготовки пласта та порід.

Для факторів, якими можна керувати, але які є неперервними, необхідно ввести наступні обмеження:

$$0 < y_1 \leq u_1,$$

$$0 < y_2 \leq u_2,$$

$$0 < y_3 \leq \widehat{u_3},$$

де u_1 , u_2 , u_3 – верхнє граничне значення параметрів, які для кожного пласта визначаються окремо;

$\widehat{u_3}$ – нижнє граничне значення, що дорівнює 40 м.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до прийнятих визначень, та змінних: x_1 – тип виймальної машини, x_2 – технологічна схема, x_3 – спосіб дегазації масиву гірських порід, маємо простий, квазівпорядкований граф керування у просторі H^n (див. рис. 1).

Відповідно до поставленого завдання критерієм оптимальності буде вірогідність виникнення раптового викиду вугілля та газу в очисному вибою

$$J = F(\bar{S}, \bar{Y}),$$

де F – функціональна залежність;

$\bar{S}$ – вектор вхідної інформації, що може залежати від прийнятої гіпотези виникнення механізму розв’язування раптового викиду.

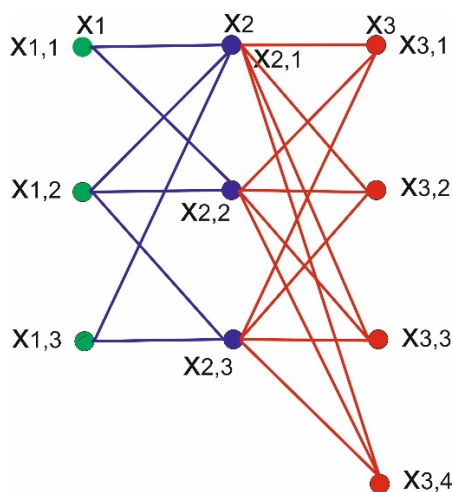


Рисунок 1 – Граф якісних, змінних технологій керування

Вірогідність виникнення раптового викиду F визначається виходячи із двох концепцій: силової чи енергетичної [8]. Всього, на зображеному на рис. 1 графі є $3 \cdot 4 \cdot 3 = 36$ шляхів від мінорант x_1 до мажорант x_3 . У цьому графі є маршрути, які є недопустимі чи взаємовиключними, тому слід привести лише множину $M_j \in M_\partial(G)$ допустимих (табл. 1).

Наведені в табл. 1 $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{34}$ – параметри, що були описані вище. Вказані параметри відповідають типу виймальної машини (очисний комбайн, струг, бурильний агрегат), технології, засобам дії на вугільний пласт з метою мінімізації раптового викиду.

Таблиця 1 – Можливі якісні рішення управління для запобігання раптових викидів вугілля та газу в очисному вибою

№	Маршрут	№	Маршрут	№	Маршрут	№	Маршрут
m_1	$[x_{11}; x_{21}; x_{31}]$	m_6	$[x_{11}; x_{22}; x_{32}]$	m_{11}	$[x_{13}; x_{21}; x_{33}]$	m_{16}	$[x_{12}; x_{23}; x_{34}]$
m_2	$[x_{11}; x_{21}; x_{32}]$	m_7	$[x_{11}; x_{22}; x_{33}]$	m_{12}	$[x_{13}; x_{21}; x_{34}]$	m_{17}	$[x_{13}; x_{23}; x_{31}]$
m_3	$[x_{11}; x_{21}; x_{33}]$	m_8	$[x_{11}; x_{22}; x_{34}]$	m_{13}	$[x_{12}; x_{22}; x_{31}]$	m_{18}	$[x_{13}; x_{23}; x_{32}]$
m_4	$[x_{11}; x_{21}; x_{34}]$	m_9	$[x_{12}; x_{21}; x_{31}]$	m_{14}	$[x_{12}; x_{22}; x_{32}]$	m_{19}	$[x_{13}; x_{23}; x_{33}]$
m_5	$[x_{11}; x_{22}; x_{31}]$	m_{10}	$[x_{12}; x_{21}; x_{32}]$	m_{15}	$[x_{12}; x_{23}; x_{33}]$	m_{20}	$[x_{13}; x_{23}; x_{34}]$

Таким чином, ми маємо 20 допустимих маршрутів, кожному з яких поставлена цільова функція:

$$J(M_j) = F(M_j, S(M_j), y_1, y_2, y_3)$$

та обмеження:

$$\begin{aligned} 0 < y_1 &\leq u_1(m_j) \\ 0 < y_2 &\leq u_2(m_j) \\ 0 < y_3 &\leq \widehat{u}_3(m_j), \end{aligned}$$

$$m_j \in M_\partial(G).$$

Явна аналітична цільова функція не залежить від гіпотези виникнення раптового викиду, тому може бути лише трьох видів.

Введемо наступні позначки:

$M_{F_n}, M_{F_A}, \sigma_{F_n}^2, \sigma_{F_A}^2$ – математичні очікування та дисперсії пасивних та активних сил за силовою схемою; $M_W, M_A, \sigma_W^2, \sigma_A^2$ – математичні очікування та дисперсії потенційної енергії W і роботи викиду вугілля A за енергетичною схемою.

Розглянемо три можливі випадки.

Значення вірогідності виникнення раптового викиду вугілля та газу буде дорівнювати:

$$J = \int_{\underline{F_A}}^{\widehat{F_n}} \psi(F_n) \int_{F_n}^{\widehat{F_n}} \psi(F_A) dF_n + \int_{F_n}^{\widehat{F_A}} \psi(F_A) dF_A$$

де

$$\psi(F_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{F_n}} \exp \left[\frac{(M(F_n) - F_n)^2}{2\sigma_{F_n}^2} \right]$$

$$\psi(F_A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{F_A}} \exp \left[\frac{(M(F_A) - F_A)^2}{2\sigma_{F_A}^2} \right]$$

у цих формулах величини

$$M(F_A) = F_A(\bar{S}_1(m_j, y_1, y_2, y_3))$$

$$\sigma_{F_A} = \Phi_A(\bar{S}_2(m_j, y_1, y_2, y_3))$$

$$M(F_n) = F_n(\bar{S}_3(m_j, y_1, y_2, y_3))$$

$$\sigma_{F_n} = \Phi_n(\bar{S}_4(m_j, y_1, y_2, y_3)),$$

залежать від шляху графу $M_j \in M_\partial(G)$ та змінних y_1, y_2, y_3 . Наведені формули аналогічні також для потенційної енергії W і роботи руйнування A .

Перш ніж перейти до опису алгоритму обґрунтування оптимальних технологічних схем слід ще раз пояснити процес виникнення раптового викиду вугілля та газу. Цей процес базується на сукупному врахуванні технологічних факторів та параметрів гірського масиву. Процес раптового викиду вугілля та газу включає дві стадії: на першій стадії вугілля руйнується та відтискається за рахунок роботи гірського тиску, а на другій стадії відбувається миттєве газовиділення роздробленого вугілля. Основну роботу в цей час здійснює робота розширення газу. Як підсумок процес раптового викиду базується на виконанні наступних вимог: перша умова – для виникнення раптового викиду вугілля та газу необхідно щоб сума потенційної енергії вугілля та кінетичної енергії гірських порід були більшими за суму роботи зміщення вугілля в сторону гірської виробки та роботи необхідної для руйнування вугілля; друга умова – швидкість руйнування вугілля повинна перевищити швидкість падіння тиску в тріщинах вугілля; третя умова – тиск газу в момент завершення руйнування вугілля повинен бути більшим ніж опір вугілля викиду. Таким чином, ми бачимо, що алгоритм обґрунтування оптимальних технологічних схем повинен враховувати значення параметрів масиву, тип виймальної техніки, швидкість відпрацювання очисного вибою. За рахунок зміни цих параметрів можна, у відповідності до наведених трьох умов виникнення раптового викиду, запобігти раптовому викиду вугілля та газу.

Після цього можна навести алгоритм обґрунтування оптимальних технологічних схем:

Крок 1. Вихідні параметри масиву гірських порід, а також технічні характеристики виймальної машини необхідно розбити на дискретні значення:

$$y_j = \{y_{j,1}, y_{j,2}, \dots, y_{j,n}\}$$

де

$$y_{j,j+1} = \left\{ y_{j,1} + \Delta y_j; \Delta y_j = \frac{y_{j,n} - y_{j,1}}{n} \right\}.$$

У якості вихідних параметрів враховано природні (глибина розробки, потужність пласта, кут падіння пласта, модуль пружності вугілля, модуль залишкової пружності та ін.), технологічні (довжина очисного вибою, швидкість посування лінії очисного вибою, ширина захвату виймальної машини та ін.), комплексні параметри (об'єм та маса блоку вугілля, який розглядаємо, реологічний параметр, коефіцієнт концентрації напружень та ін.), які здійснюють вплив на вірогідність формування раптового викиду вугілля та газу.

Крок 2. Для деякого базового шляху графу $G=(X, \Gamma)$ визначити $M_W, M_A, \sigma_W^2, \sigma_A^2$ – математичні очікування та дисперсії потенційної енергії W та роботи викиду вугілля A за енергетичною схемою.

Крок 3. Визначити вірогідність виникнення раптових викидів вугілля та газу за формулами:

$$J = \int_{F_A}^{\widehat{F}_n} \psi(F_n) \int_{F_n}^{\widehat{F}_n} \psi(F_A) dF_n + \int_{F_n}^{\widehat{F}_A} \psi(F_A) dF_A$$

де

$$\psi(F_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{F_n}} \exp \left[-\frac{(M(F_n - F_n))^2}{2\sigma_{F_n}^2} \right]$$

$$\psi(F_A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{F_A}} \exp \left[-\frac{(M(F_A - F_A))^2}{2\sigma_{F_A}^2} \right].$$

Крок 4. Визначити вірогідність $J = F(y_j)$ виникнення викиду як функції від досліджуваного параметру. Для цього слід варіювати наведені на першому кроці параметри. Тобто, слід задати значення параметрів та розбити їх на інтервали, з кроком 10% від заданого інтервалу. Усього було закладено 62 параметри. Тому, для кожного параметру отримаємо множину дискретних значень. Далі ці параметри слід відобразити на граф умов технологічних схем (рис. 1). Використовуючи алгоритм перебору дискретних значень по кожному параметру знаходиться середнє значення прирощення потенційної енергії в одиничному обсязі вугілля в зоні роботи виймальної машини.

Крок 5. В результаті імітаційного моделювання та алгоритму перебору буде визначено ступені «сили» впливу параметрів (λ – ступінь впливу параметру на вірогідність раптового викиду вугілля та газу; сума усіх параметрів λ дорівнює 1, при $\lambda=0.05$ вважаємо параметр керуючим, тобто пріоритетним). Тобто, виділено ті параметри, які суттєво впливають на вірогідність виникнення раптового викиду вугілля та газу. Було встановлено, що найбільш впливовим параметром є глибина розробки ($\lambda=0.20$), тиск газу в масиві до початку ведення робіт ($\lambda=0.198$), коефіцієнт сорбції Лонгмюра ($\lambda=0.169$), коефіцієнт міцності вугілля ($\lambda=0.092$), потужність вугільного пласта ($\lambda=0.073$), ширина захвату виймальної машини ($\lambda=0.056$), швидкість посування лінії очисного вибою ($\lambda=0.054$), пористість вугілля ($\lambda=0.053$), довжина очисного вибою

($\lambda=0.050$). Після цього можна отримати залежності впливу пріоритетних параметрів на вірогідність виникнення раптового викиду вугілля та газу. В подальшому, на основі імітаційного експерименту можна визначити оптимальні значення параметрів: тип виймальної машини, технологія відпрацювання вугільного пласта, довжина очисного вибою, швидкість посування лінії очисного вибою.

Крок 6. На основі застосування СППР обрати засоби механізації. Необхідно задати вихідні параметри за допомогою яких програма дозволить визначити структуру механізованого комплексу.

На основі оцінки вірогідності можна запропонувати оптимальні технологічні схеми. Далі необхідно навести приклад застосування наведеного підходу.

Обговорення результатів. У якості об'єкту дослідження розглянуто Державне підприємство «Вугільна компанія «Краснолиманська». Шахта є глибокою, небезпечною за раптовими викидами вугілля та газу, небезпечна за вибуховістю вугільного пилу. Задача стояла в обґрунтуванні оптимальних технологічних рішень, а також виборі засобів механізації.

На першому етапі було проведено імітаційне моделювання виникнення вірогідності раптових викидів вугілля та газу для різних параметрів. В таблиці 2 наведено оптимальні технологічні рішення щодо відпрацювання вугільних пластів схильних для раптових викидів вугілля та газу.

Таблиця 2 – Оптимальні технологічні рішення для відпрацювання викидонебезпечних вугільних пластів

Параметр	Значення	Пояснення
ширина захвату очисного комбайну	0,63 м	вірогідність раптового викиду зростає зі збільшенням ширини захвату;
швидкість посування лінії очисного вибою	3 м/доб.	зі збільшенням швидкості посування лінії очисного вибою зростає вірогідність викиду;
довжина очисного вибою	>250 м	зі збільшенням довжини очисного вибою зменшується вірогідність викиду;
глибина розробки	845 м	зі збільшенням глибини розробки зростає вірогідність
характеристика технологічної схеми	комбайновий, довгими очисними вибоями	у разі повільного посування очисного вибою зона максимального опорного тиску уходить «вглибину» вибою, що призводить до зменшення дотичних напружень, що впливають на вірогідність виникнення раптового викиду

Із табл. 2 виходить, що для умов шахти «Краснолиманська» необхідно обрати механізований спосіб виймання вугілля, із попередньою дегазацією вугільного пласта, разом з цим довжина очисного вибою повинна бути максимальною. Ширина захвату $b=0,63$ м є стандартною для вузькозахватних очисних комбайнів. Тому, наостанок необхідно обрати засоби механізації очисного вибою, що передбачає обґрунтування структури технологічного ланцюга «механізоване кріплення – очисний комбайн – забійний конвеєр». Для вибору обладнання необхідно скористатись «Програмою вибору оптимальних комплектацій очисного обладнання», що розроблена автором вказаної роботи (рис. 2).

Необхідно зазначити, що залежно від виймальної потужності пласта можуть бути запропоновані різні комплектації очисного обладнання. Попередньо обираємо виймальний комплекс МДМ, адже у нього найбільші показники продуктивності для

заданих значень параметрів: потужності пласта, довжини очисного вибою (рис. 3). Вказаний комплекс включає механізоване кріплення ДМ, а також може бути укомплектований різними типами комбайнів і конвеєрів. До основних вимог віднесені: наявність запропонованого обладнання на підприємстві; наявність ремонтного фонду гірничошахтного обладнання та досвіду його експлуатації; низька зольність вугілля; наявність серійного виробництва; шнековий тип виконавчого органу; взаємодія з конвеєром. Пошук оптимальної комплектації зручно проводити на основі порівняння комплектацій, тобто необхідно визначити значення оптимізаційного параметру для кожної комплектації, а потім представити альтернативи у вигляді мережевої моделі [9]. За допомогою алгоритмів оптимізації на мережах і графах [10, 11] можна знайти найкоротший маршрут, що відповідає оптимальному рішенню.

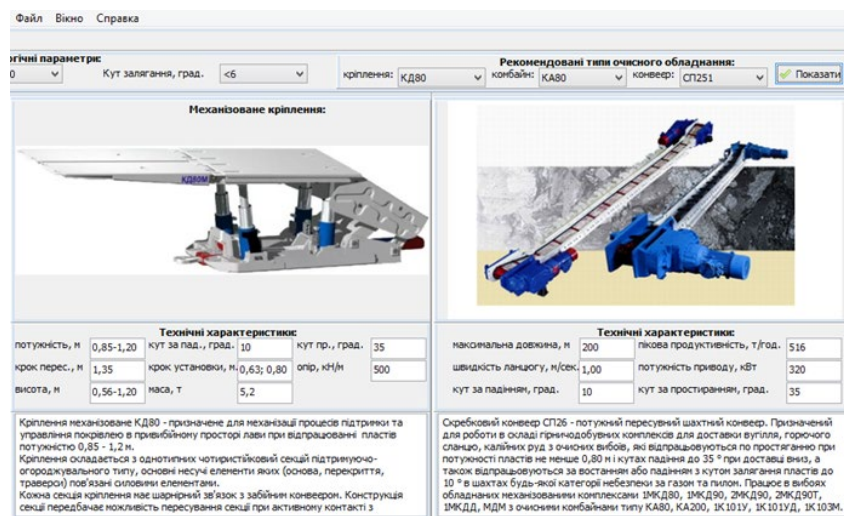


Рисунок 2 – Робоче вікно програми вибору оптимальних комплектацій очисного обладнання («CountsCEM.v1.p2.6_c25»)

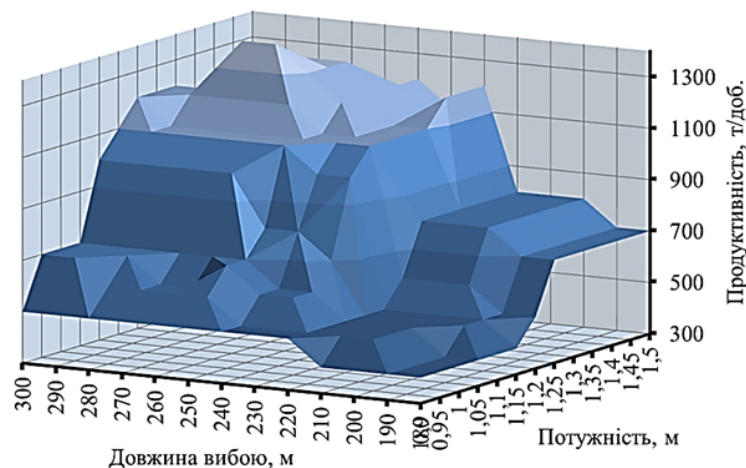


Рисунок 3 – Залежність продуктивності механізованого комплексу МДМ від потужності та довжини очисного вибою

На основі проведеного аналізу, для вказаних технологічних схем, було обрано наступну комплектацію механізованого комплексу «механізоване кріплення МДМ – очисний комбайн УКД400 – скребковий конвеєр СП326». Вказаний технологічний ланцюг відповідає усім вимогам, а також є найбільш оптимальним з точки зору питомої

собівартості видобутку, окрім цього, може застосовуватись за умов довжини очисного вибою понад 300 м, що значно мінімізує вірогідність виникнення раптового викиду вугілля та газу.

Висновки. В процесі виконання дослідження було розроблено та реалізовано модель, щодо оцінки вірогідності виникнення раптових викидів вугілля та пилу, яка враховує технічні рішення та гірничо-геологічні умови для обґрунтування оптимальних технологічних схем відпрацювання викидонебезпечних вугільних пластів. Це дозволило отримати наступні висновки:

- при розробці викидонебезпечних вугільних пластів слід обґрунтовувати оптимальні технологічні схеми, де критерієм оптимальності виступає вірогідність виникнення раптового викиду вугілля та газу;

- вірогідність виникнення раптового викиду вугілля та газу під час розробки викидонебезпечних вугільних пластів залежить від гірничо-геологічних умов, а також від прийнятих технологічних схем; у відповідності до результатів імітаційного моделювання впливу детермінованих параметрів на вірогідність виникнення раптового викиду встановлено, що пріоритетними керуючими параметрами є: ширина захвату очисного комбайну, швидкість посування лінії очисного вибою, довжина очисного вибою, глибина розробки, тип виймальної машини та заходи, щодо дегазації;

- процедура прийняття оптимального рішення полягає у визначенні значень технологічних параметрів відпрацювання вугільних пластів (довжина очисного вибою, ширина захвату очисного комбайну, швидкість посування лінії очисного вибою, довжина очисного вибою) на вірогідність виникнення раптового викиду та подальшому вибору засобів механізації (тип виймальної машини, конвеєр, кріплення) для реалізації наведених рішень;

- для реалізації наведеного підходу було вирішено задачу з обґрунтування оптимальних технологічних рішень, а також вибору засобів механізації для розробки викидонебезпечних вугільних пластів («Державне підприємство «шахта «Краснолиманська»); для вирішення задачі було задано гірничо-геологічні та технологічні параметри; в подальшому, на основі імітаційного моделювання, було визначено значення параметрів, при яких буде мінімальна вірогідність виникнення раптового викиду вугілля та пилу (довжина очисного вибою, швидкість посування лінії очисного вибою, тощо); в завершальній частині за допомогою «Програми вибору оптимальних комплектацій очисного обладнання» було обрано засоби механізації, які можуть експлуатуватись при визначених параметрах;

- незалежно від задачі, для прийняття рішень запропоновано застосувати алгоритми оптимізації на мережах і графах (Дейкстри, Белмана-Форда), що дозволяє сформувати банк проектних рішень та значно підвищити розмірність задач, заощадити обчислювальні ресурси.

Наведені в роботі результати сприятимуть підвищенню безпеки ведення очисних робіт на шахтах, що ведуть розробку пластів схильних до раптових викидів вугілля та газу.

Список літератури

1. Ma Y.K., Nie B.S., He X.Q., Li X.C., Meng J.Q., Song D.Z. Mechanism investigation on coal and gas outburst: an overview. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. – 2020. – Vol. 27(7). – pp. 872–887.
2. Khorolskyi A., Hrinov V., Mamaikin O., Demchenko Y. Models and methods to make decisions while mining production scheduling. *Mining of Mineral Deposits*. – 2019. – Vol. 13(4). – pp. 53–62.
3. De Felice F., Petrillo A., Saaty T. (Eds.). *Applications and Theory of Analytic Hierarchy Process: Decision Making for Strategic Decisions*. BoD–Books on Demand. – 2016. – 560 p.

4. Petlovanyi M., Malashkevych D., Sai K., Bulat I., Popovych V. Granulometric composition research of mine rocks as a material for backfilling the mined-out area in coal mines. *Mining of Mineral Deposits*. – 2021. – Vol. 15(4). – pp. 122-129.
5. Petlovanyi M., Medianyuk V., Sai K., Malashkevych D., Popovych V. Geomechanical substantiation of the parameters for coal auger mining in the protecting pillars of mine workings during thin seams development. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 16(15). – pp. 1572–1582.
6. Bazaluk O., Ashcheulova O., Mamaikin O., Khorolskyi A., Lozynskyi V., Saik P. Innovative Activities in the Sphere of Mining Process Management. *Frontiers in Environmental Science*. – 2022. – p. 304.
7. Dagdevir E., Tokmakci M. Truncation thresholds based empirical mode decomposition approach for classification performance of motor imagery BCI systems. *Chaos, Solitons & Fractals*. Vol. 152. – p. 111450.
8. Tynyna S., Chobotko I., Frolova L., Butyrina T. Modeling of influence of stresses on indicators of resistance of mining rocks to mechanical destruction. *E3S Web of Conferences, International Conference Essays of Mining Science and Practice*. – 2019. – Vol. 109. – p. 00104.
9. Chiang M., Low S.H., Calderbank A.R., Doyle J.C. Layering as optimization decomposition: A mathematical theory of network architectures. *Proceedings of the IEEE*. 2007. – Vol. 95(1). – pp. 255–312.
10. Broumi S., Bakal A., Talea M., Smarandache F., Vladareanu L. Applying Dijkstra algorithm for solving neutrosophic shortest path problem. In *2016 International conference on advanced mechatronic systems (ICAMechS)*. – 2016. – pp. 412–416.
11. Jin C., Liu Q., Miryoosefi S. Bellman eluder dimension: New rich classes of rl problems, and sample-efficient algorithms. *Advances in neural information processing systems*. – 2021. – Vol. 34. – pp. 13406–13418.

References

1. Ma, Y. K., Nie, B. S., He, X. Q., Li, X. C., Meng, J. Q., & Song, D. Z. (2020). Mechanism investigation on coal and gas outburst: an overview. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 27(7), 872-887.
2. Khorolskyi, A., Hrinov, V., Mamaikin, O., & Demchenko, Y. (2019). Models and methods to make decisions while mining production scheduling. *Mining of Mineral Deposits*, 13(4), 53-62.
3. De Felice, F., Petrillo, A., & Saaty, T. (Eds.). (2016). *Applications and Theory of Analytic Hierarchy Process: Decision Making for Strategic Decisions*. BoD—Books on Demand.
4. Petlovanyi, M., Malashkevych, D., Sai, K., Bulat, I., & Popovych, V. (2021). Granulometric composition research of mine rocks as a material for backfilling the mined-out area in coal mines. *Mining of Mineral Deposits*, 15(4), 122-129. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.122>
5. Petlovanyi M., Medianyuk V., Sai K., Malashkevych D., & Popovych V. (2021). Geomechanical substantiation of the parameters for coal auger mining in the protecting pillars of mine workings during thin seams development. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 16(15): 1572-1582.
6. Bazaluk, O., Ashcheulova, O., Mamaikin, O., Khorolskyi, A., Lozynskyi, V., & Saik, P. (2022). Innovative Activities in the Sphere of Mining Process Management. *Frontiers in Environmental Science*, 304.
7. Dagdevir, E., & Tokmakci, M. (2021). Truncation thresholds based empirical mode decomposition approach for classification performance of motor imagery BCI systems. *Chaos, Solitons & Fractals*, 152, 111450.
8. Tynyna, S., Chobotko, I., Frolova, L., & Butyrina, T. (2019). Modeling of influence of stresses on indicators of resistance of mining rocks to mechanical destruction. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 109, p. 00104). EDP Sciences.
9. Chiang, M., Low, S. H., Calderbank, A. R., & Doyle, J. C. (2007). Layering as optimization decomposition: A mathematical theory of network architectures. *Proceedings of the IEEE*, 95(1), 255-312.
10. Broumi, S., Bakal, A., Talea, M., Smarandache, F., & Vladareanu, L. (2016, November). Applying Dijkstra algorithm for solving neutrosophic shortest path problem. In *2016 International conference on advanced mechatronic systems (ICAMechS)* (pp. 412-416). IEEE.
11. Jin, C., Liu, Q., & Miryoosefi, S. (2021). Bellman eluder dimension: New rich classes of rl problems, and sample-efficient algorithms. *Advances in neural information processing systems*, 34, 13406-13418.

Надійшла до редакції 12.09.2022

A.O. Khorolskyi, A.V. Kosenko

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A MODEL FOR SUBSTANTIATION OF OPTIMAL TECHNOLOGICAL SCHEMES FOR THE MINING OF OUTBURST-PRONE COAL SEAMS

Purpose. The purpose of the work is to develop a new approach to substantiate the optimal technological schemes for the mining of outburst-prone coal seams, which will ensure the minimum likelihood of sudden outbursts of coal and gas in the breakage face.

Methodology. The integrated approach has been applied, involving the use of graphs, network models, optimization algorithms to find optimal technological solutions; application of energy-force models to assess the likelihood of sudden outbursts of coal and gas; application of dynamic programming to substantiate technological parameters (seam thickness, cutter-loader web width, length of a breakage face, etc.) for mining of outburst-prone coal seams.

Results. In the course of the work, a new mathematical model has been obtained and implemented, which allows assessing the risks of a sudden outburst of coal and gas during the mining of coal seams. Based on the application of the model, an algorithm for substantiating technical and technological solutions has been developed. Technical solutions provide for the choice of means of mechanization of a breakage face, a mining schedule out a breakage face, measures for degassing a coal seam, while technological solutions provide for the justification of the length of a breakage face, the cutter-loader web width, and the speed of movement of the breakage face line.

Scientific novelty. The originality lies in the creation of the mathematical model that allows assessing the likelihood of a sudden outburst of coal or gas, which made it possible to create a new approach based on the use of graphs and network models, as well as to determine the optimal technological solutions for mining coal seams.

Practical significance. The practical value of the work lies in the creation of an application package for the selection of purification facility in accordance with certain technological solutions. The general algorithm for justifying technological schemes for mining outburst-prone coal seams involves the following sequence of actions: setting the initial parameters of a rock mass and breaking them into discrete values; for possible routes of the graph of technological solutions, the mathematical expectation and dispersion are determined; the probability of sudden outbursts of coal and gas for the studied parameters is determined; on the basis of the calculated probability, dependences of the occurrence of a coal or gas outburst are obtained in accordance with the values of the parameters (face length, the speed of movement of the breakage face line, etc.); on the basis of the data obtained, the optimal technological schemes for mining outburst-prone coal seams are substantiated; based on the application of a package of applied programs, mechanization means are selected. The scope of the above approach is not limited to the existing means of mechanization, mining and geological conditions of coal seams, existing technological schemes, and others.

Keywords: probability, breakage face, coal, gas, technological scheme, schedule, software.

Відомості про авторів

Хорольський А.О., канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу управління станом гірничого масиву Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, andreykh918@gmail.com

Косенко А.В., канд. техн. наук, молодший науковий співробітник відділу управління станом гірничого масиву Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, andreyvladimirovich@email.ua

Khorolskyi A.O., Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher of the 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, andreykh918@gmail.com

Kosenko A.V., Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Junior Researcher of the 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, andreyvladimirovich@email.ua

УДК 614.841

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-206-215](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-206-215)

С.В. Цвіркун, Т.В. Костенко, М.Ю. Удовенко

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАХИСТУ ЛЮДЕЙ ВІД НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ПОЖЕЖАМИ В БУДІВЛЯХ, ЯКІ НАЛЕЖАТЬ ДО ОБ'ЄКТІВ КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ

Мета. Забезпечення захисту людей від надзвичайних ситуацій, пов'язаних з пожежами в будівлях, які належать до об'єктів культурної спадщини, за допомогою математичного моделювання динамічних процесів і явищ, характерних для пожежі.

Методи. Для визначення небезпечних чинників пожежі був використаний програмний комплекс FDS, який чисельно вирішує рівняння Нав'є-Стокса для низькошвидкісних температурно-залежних потоків. Для розрахунку часу евакуації людей використовувалася аналітична модель руху людей під час пожежі.

Результати. За результатами проведеного моделювання були розраховані значення небезпечних чинників пожежі в об'ємі будівлі, а також визначено залежність показників від часу. Отримані дані ілюструють розповсюдження небезпечних чинників пожежі в приміщеннях із складною планувальною схемою. Вони необхідні для раціонального розміщення людей з метою підвищення їхньої безпеки в разі надзвичайної ситуації. Таким чином, завдяки математичному моделюванню, ми отримуємо інформацію, яким саме заходам безпеки слід приділити особливу увагу.

Наукова новизна. отриманих результатів полягає в тому, що для умов саме таких параметрів об'ємно-планувальних рішень будівлі було визначено час настання критичного значення небезпечних чинників пожежі та час евакуації людей з приміщення.

Практичне значення. отриманих результатів полягає у можливості використання принципів та підходів, що викладено в роботі, для подібних об'єктів культурної спадщини для визначення необхідного часу евакуації, що дозволить підвищити безпеку відвідувачів та персоналу під час виникнення надзвичайної ситуації. У такого типу приміщеннях повинен бути зроблений особливий акцент на обладнанні візуальними вказівниками шляхів евакуації.

Ключові слова: небезпечні чинники пожежі, моделювання пожежі, евакуація людей під час пожежі.

Вступ. Пам'яток архітектури на території сучасної України чимало. Нещодавнім гірким досвідом для архітектурної спадщини столиці України стали пожежі у 7 історичних будівлях, які горіли за останні 5 років [1]. За останні шість років історична садиба відомого українського художника Олександра Мурашка на Малій Житомирській горіла два рази. Останнього разу — у 2015 році. Причиною пожежі назвали необережне поводження з вогнем невідомих осіб. Садиба Мурашка є пам'ятником історії й архітектури середини XIX століття. У січні 2019 року рятувальники гасили пожежу в нежитловій триповерховій будівлі 1883 року на Грушевського, 46. Ця будівля є прикладом первинної забудови вулиці Грушевського, яких залишилося лише кілька. 20 червня 2017 року на Хрещатику, 40/1 навпроти ЦУМу, горіла історична будівля колишнього Центрального гастроному. Там згоріли перекриття між поверхами і дах. Причиною пожежі назвали недбалість будівельників, які вели роботи в будівлі.

В сучасній практиці збереження культурної спадщини історичних міст України використовуються норми ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016 Настанова щодо виконання ремонтно-реставраційних робіт на пам'ятках архітектури та містобудування [2]. Зокрема, в пункті «Загальні положення» 1.2 визначено два головні принципи реставрації пам'ятки: «Принцип найменшого втручання та змін, забезпечення максимального збереження автентичності пам'ятки; принцип реверсивності, тобто всі застосовані матеріали і технології повинні бути максимально зворотними (підлягати видаленню без пошкодження автентичного матеріалу)». Окрім захисту життя

відвідувачів та персоналу, пожежна безпека в історичних будівлях та музеях – це питання збереження безцінної архітектури та артефактів.

Рішення проблем пожежної безпеки вимагає використання загальних принципів теорії розвитку горіння і різноманітних наукових методів, які має сучасна наука. Розвиток пожежі включає багато факторів, частину з яких важко передбачити, оскільки вони змінюються в часі і просторі. Для оцінки пожежної небезпеки того чи іншого об'єкту захисту та ефективного керування діями задля забезпечення пожежної безпеки необхідно з позиції сучасних наукових уявлень як можна глибше та детальніше пізнати закономірності виникнення, розвитку та ліквідації пожеж всіх класів і типів. Одним з оптимальних підходів вивчення таких систем є системний аналіз, який для вивчення складних систем включає метод моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моделюванню процесів евакуації присвячено значну кількість сучасних наукових робіт. Для евакуації можуть використовувати різні підходи для моделювання поведінки людини під час пожежі. В роботі [3] розглядаються існуючі програми для розрахунку часу евакуації людей під час пожежі. Проведений порівняльний аналіз існуючих програмних комплексів в області розрахунків. Наведено порівняльний аналіз математичних методів закономірностей руху людей під час пожежі у програмних продуктах. Дано висновок щодо функціональності досліджуваних програмних комплексів. Одна з робіт містить критичний огляд найбільш часто використовуваних методів моделювання для представлення процесу евакуації під час пожежі. [4]. Інше дослідження [5] присвячене моделюванню індивідуально-поточного руху людей Побудовано модель індивідуально-поточного руху людей з уточненням технологічних обмежень. Експериментально досліджено ефект зміни значень середнього квадратичного відхилення швидкості фізичних осіб на процес евакуації. Показано, що зі збільшенням середнього квадратного відхилення швидкості індивідів від його середнього значення, зазвичай, спостерігається розподіл потоку на групи, кожна з яких рухається з різною швидкістю, і збільшення часу евакуації, що обмежується отриманою верхньою оцінкою. Відомі також дослідження, під час яких було розроблено спрощену імітаційну модель для розрахунку часу евакуації на кожному поверсі будівлі, беручи до уваги будівлю з різними типами розміщення на різних поверхах (наприклад, офісні, житлові, комерційні тощо) і різні коефіцієнти об'єднання, які можуть бути викликані різною конфігурацією сходових дверей на кожному поверсі. [6]. В роботі [7] показано доцільність використання програмного комплексу FDS (FireDynamic Simulator) для моделювання динаміки розвитку небезпечних чинників пожежі.

Викликає занепокоєння стан організації належного догляду та утримання об'єктів культурної спадщини, виконання вимог чинного законодавства, зокрема в дотриманні протипожежних заходів, запропонованих у приписах інспекторів з нагляду за протипожежним станом. Залишаються невиконаними 80% протипожежних заходів, запропонованих приписами органів державного пожежного нагляду, термін виконання яких давно минув. Дуже часто, незважаючи на статус пам'ятки, який потребує отримання дозволу органів охорони культурної спадщини на проведення будь-яких робіт та погодження проектної документації, реставраційних завдань, релігійні громади нехтують цією вимогою, здійснюють самовільні ремонтні роботи не усвідомлюючи, що такі дії спотворюють пам'ятки та сприяють їх руйнуванню, призводять до безповоротних втрат їх історичної автентичності, а в деяких випадках – до пожеж [8].

Мета статті – забезпечення захисту людей від надзвичайних ситуацій, пов'язаних з пожежами в будівлях, які належать до об'єктів культурної спадщини, за допомогою математичного моделювання динамічних процесів і явищ, характерних для пожежі.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні задачі:

- проаналізувати шляхи евакуації в рамках об'ємно-планувальних рішень будівлі;
- провести розрахунок необхідного та фактичного часу евакуації відвідувачів;
- визначити особливості евакуації з будівель, які належать до об'єктів культурної спадщини.

Методи дослідження. Основними сучасними підходами до дослідження безпечної евакуації людей є комп'ютерне моделювання з використанням програм обчислювальної гідродинаміки (CFD). Для визначення небезпечних чинників пожежі був використаний програмний комплекс FDS [9]. FDS чисельно вирішує рівняння Нав'є-Стокса для низькошвидкісних температурно-залежних потоків, особлива увага приділяється поширенню диму і теплопередачі при пожежі. Математична модель FDS базується на використанні диференціальних рівнянь в приватних похідних, що описують просторово-часовий розподіл температури і швидкостей газового середовища в приміщенні, концентрацій компонентів газового середовища (кисню, продуктів горіння тощо), тисків і щільності.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження безпечної евакуації людей в умовах надзвичайних ситуацій є будівля, що має історичне значення - Повітрофлотський проспект № 28 (1914—1918) — будівля колишнього Миколаївського артилерійського училища (місто Київ). В даний час в цій будівлі знаходиться Касаційний цивільний суд — складова частина Верховного Суду, що здійснює касаційне провадження у справах, що виникають з цивільних, земельних, трудових, сімейних, житлових та інших прирівняних до них правовідносин на території України.

Особливістю пожежної небезпеки є те, що будівля відноситься до будівель із складним плануванням приміщень та поверхів. Організаційні заходи по забезпеченню евакуації людей при пожежі, як правило, недостатні.

Вибір місця розвитку сценарію пожежі. Осередки пожежі були обрані таким чином щоб або блокувати один із евакуаційних виходів, або створювати складні умови для евакуації. Так пожежа розвивається по найгіршому сценарію приймаємо, що система автоматичного пожежогасіння, якою обладнані приміщення Верховного суду, не спрацювала. Провівши аналіз креслень, схем та концепції забезпечення протипожежного захисту будівлі, було прийняте рішення провести розрахунки часу евакуації та настання небезпечних чинників пожежі з кожного поверху. Для цього було створено модель будівлі де і реалізовувалися сценарії пожеж (рис.1).

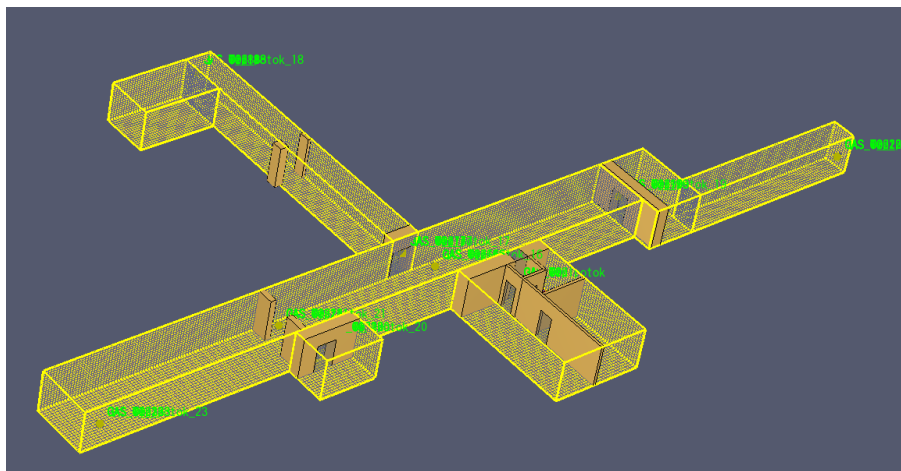


Рисунок 1 – Модель будівлі з осередками пожежі.

На кожному поверсі моделювалося по два сценарії пожежі. Основна причина пожежі це коротке замкнення електропроводки та порушення протипожежного режиму. Горіння та небезпечні чинники пожежі поширюються радіально по площі приміщення з осередку пожежі. Методику розрахунку часу евакуації застосовано згідно ДСТУ 8828-2019. Розташування датчиків: біля кожної сходової клітини. В розрахунку була використана стандартна пожежна навантага «Кабінет; меблі+папір (0,75+0,25).» [10]:

- нижня теплота згоряння 14 МДж/кг;
- лінійна швидкість розповсюдження полум'я 0,0042 м/с
- питома масова швидкість вигорання 0,0129 кг/м²с
- димоутворююча здатність 53 Нпм²/кг
- споживання кисню 1,161 кг/кг
- виділення вуглекислого газу 0,642 кг/кг
- виділення чадного газу 0,00317 кг/кг
- виділення хлористого водню 0,00 кг/кг

За результатами проведеного моделювання було отримано розподілення полів видимості та температури в приміщеннях будівлі (рис.2), а також визначено залежність показника видимості (рис.3а) та температури від часу (рис.3б). Отримані дані ілюструють розповсюдження небезпечних чинників пожежі в приміщеннях із складною планувальною схемою. Вони необхідні для раціонального розміщення людей з метою підвищення їхньої безпеки в разі надзвичайної ситуації. Так ми бачимо що перший небезпечний чинник пожежі, який досягає критичного значення, є втрата видимості на 122-й секунді тобто через 2 хвилини, ще через півтори хвилини критичним стає значення теплового потоку. Звідси ми можемо зробити висновок, що у приміщеннях повинен бути зроблений особливий акцент на обладнанні візуальними вказівниками шляхів евакуації, а також це приміщення повинно бути обладнане системою димовилучення. Такі заходи дозволять збільшити необхідний час евакуації ще на 2 хвилини. В сучасних будівлях такі заходи безпеки є очевидними та влаштовуються відповідно до будівельних норм, але у будівлях старого планування, які були збудовані ще на початку минулого сторіччя, складно проводити масштабне перепланування. Таким чином, завдяки математичному моделюванню, ми отримуємо інформацію яким саме заходам безпеки слід приділити особливу увагу.

Як свідчить статистичні дані та практичний досвід найпершими з небезпечних чинників досягають критичних значень видимість та температура. Графіки на рисунку 3 ілюструють настання критичного значення видимості вже на 122 секунді, що в свою чергу менше ніж значення тривалості від початку евакуації для об'єктів громадського призначення [10].

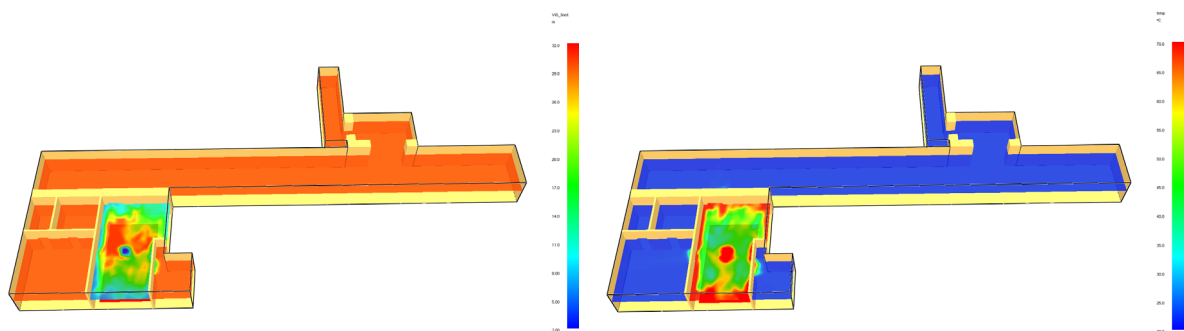


Рисунок 2 – Розподілення полів видимості та температури в приміщеннях.

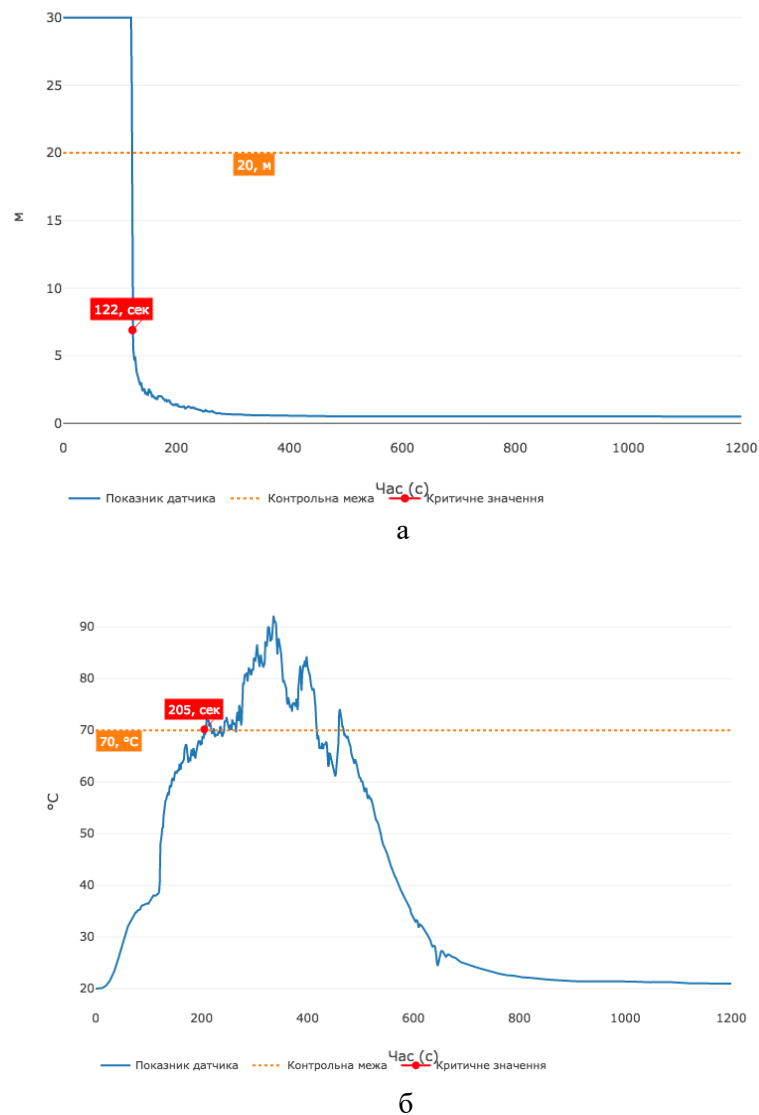


Рисунок 3 – Залежність показника видимості (а) та температури (б) від часу

Після проведення розрахунку необхідного часу евакуації потрібно визначити розрахунковий час евакуації з приміщень будівлі. Розрахунок проводився за спрощеною аналітичною моделлю руху згідно [10]. Розрахунки проводяться для кожного сценарію і на кожному поверсі, враховуючи особливості руху людей (рис.4).

Розбивши весь шлях руху на ділянки і визначивши параметри руху людей на кожній ділянці визначили розрахунковий час евакуації людей для кожного сценарію.

Результати розрахунку небезпечних чинників пожежі та порівняння їх з розрахунковим часом евакуації наводяться в нижче наведених таблицях.

Табличні дані показують нам, що умови безпечної евакуації виконуються. Але деякі показники мають значення дуже близькі до критичних, як, наприклад співвідношення розрахункового та необхідного часу евакуації на деяких ділянках 3-го та 2-го поверхів. Це означає, що під час проведення реконструкції на ці ділянки слід звернути особливу увагу і вжити додаткових заходів, які б змінили співвідношення розрахункових і критичних даних у бік їх більшої різниці.

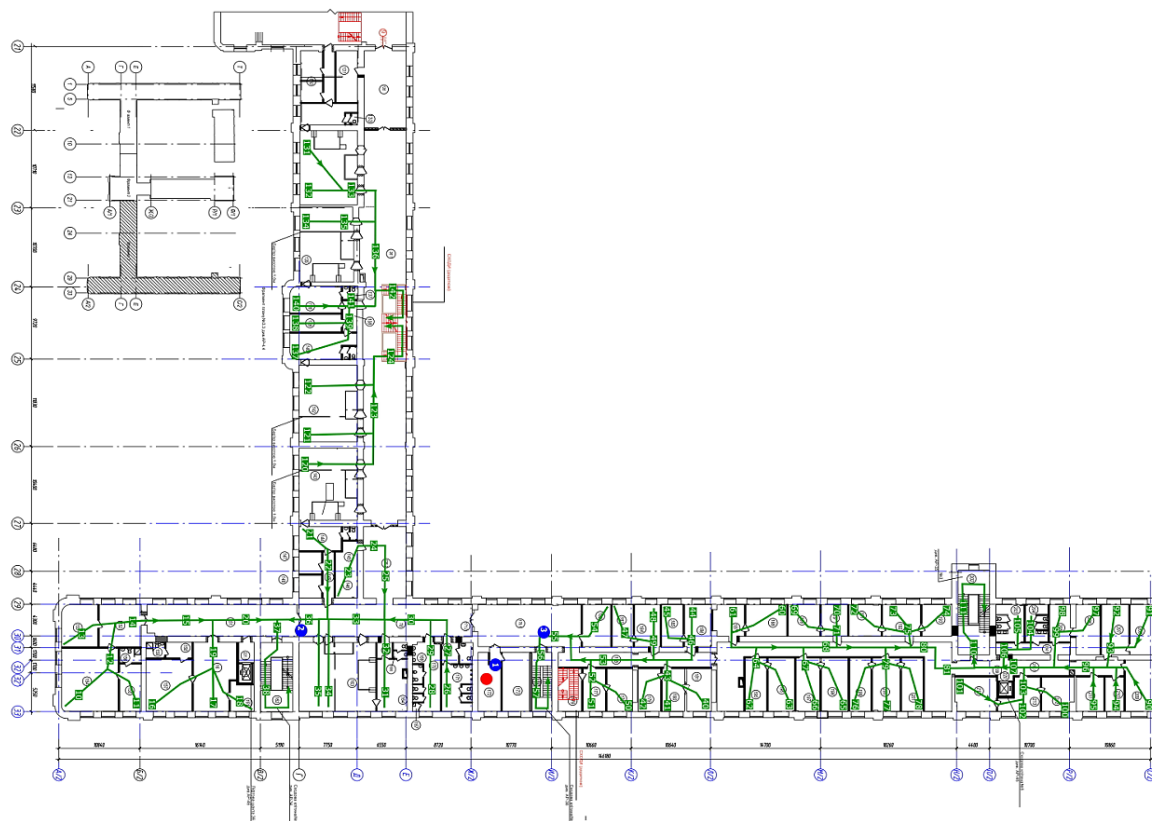


Рисунок 4 – Визначення розрахункового часу евакуації людей.

Таблиця 1 – Результати розрахунку необхідного часу евакуації з 3-го поверху

Сценарій пожежі/ датчики	Час досягнення небезпечного чиннику пожежі*						
	Вміст CO	Вміст CO ₂	Вміст HCl	Занижений вміст O ₂	Підвищена температура	Втрата видимості	Тепловий потік
Датчик 1	-	-	-	-	38,92	34,75	20,46
Датчик 2	-	-	-	-	205	122	363

Розрахунковий час евакуації (датчик 2): 112,2 с**.

Були враховані показники ділянок 11,12,16,22,23,26.

Розрахунковий час 112,2 с < Необхідний час 122 с.

Умова безпечної евакуації з 3-го поверху виконується.

Таблиця 2 – Результати розрахунку необхідного часу евакуації з 2-го поверху

Сценарій пожежі/ датчики	Час досягнення небезпечного чиннику пожежі*						
	Вміст CO	Вміст CO ₂	Вміст HCl	Занижений вміст O ₂	Підвищена температура	Втрата видимості	Тепловий потік
Датчик 1	-	-	76,14	-	76,14	54,99	164,97
Датчик 2	-	-	293,28	-	495,12	246,75	-
Датчик 3	-	-	167,79	-	198,81	129,31	913,68

Розрахунковий час евакуації до сходової клітини №162 (датчик 2): 121,1 с**.

Були враховані показники ділянок 23,24,25,33,36,37.

Розрахунковий час 121,1 с < Необхідний час 246,75 с.

Умова безпечної евакуації з 2-го поверху виконується.

Розрахунковий час евакуації до сходової клітини №174 (датчик 3): 121,1 с**.
 Були враховані показники ділянок 40,43,53,55,56.
 Розрахунковий час 121,1 с < Необхідний час 129,31 с.
 Умова безпечної евакуації з 2-го поверху виконується.

Таблиця 3 – Результати розрахунку необхідного часу евакуації з 1-го поверху

Сценарій пожежі/ датчики	Час досягнення небезпечного чиннику пожежі*						
	Вміст CO	Вміст CO ₂	Вміст HCl	Занижений вміст O ₂	Підвищена температура	Втрата видимості	Тепловий потік
Датчик 1	-	-	175,82	-	201,78	96,76	738
Датчик 2	-	-	299,72	-	490	202,96	-
Датчик 3	-	-	481,44	-	-	361,08	913,68

Розрахунковий час евакуації до сходової клітини №120 (датчик 2): 102 с**.
 Були враховані показники ділянок 10,11,15,17,18,22,35.
 Розрахунковий час 102 с < Необхідний час 202,96 с.
 Умова безпечної евакуації з 1-го поверху виконується.

Розрахунковий час евакуації до сходової клітини №106 (датчик 3): 113,4 с**.
 Були враховані показники ділянок 51,53,60,61.
 Розрахунковий час 113,4 с < Необхідний час 361,08 с.
 Умова безпечної евакуації з 1-го поверху виконується.

Таблиця 4 – Результати розрахунку необхідного часу евакуації з цокольного поверху

Сценарій пожежі/ датчики	Час досягнення небезпечного чиннику пожежі*						
	Вміст CO	Вміст CO ₂	Вміст HCl	Занижений вміст O ₂	Підвищена температура	Втрата видимості	Тепловий потік
Датчик 1	109	511	-	104	91	68	-
Датчик 2	172	354	-	262	141	127	414
Датчик 3	250	448	-	433	370	234	-

Розрахунковий час евакуації до сходової клітини №4 (датчик 2): 46 с**.
 Були враховані показники ділянок 10,11,13,14,15.
 Розрахунковий час 46 с < Необхідний час 127 с.
 Умова безпечної евакуації з цокольного поверху виконується.

Розрахунковий час евакуації до сходової клітини №8 (датчик 3): 53 с**.
 Були враховані показники ділянок 21,22,23,25.
 Розрахунковий час 53 с < Необхідний час 234 с.
 Умова безпечної евакуації з цокольного поверху виконується.

Таблиця 5 – Результати розрахунку необхідного часу евакуації з цокольного поверху (сценарій 2)

Сценарій пожежі/ датчики	Час досягнення небезпечного чиннику пожежі*						
	Вміст CO	Вміст CO ₂	Вміст HCl	Занижений вміст O ₂	Підвищена температура	Втрата видимості	Тепловий потік
Датчик 1	157	-	95	168	129	73	252
Датчик 2	217	-	167	313	243	152	-

Розрахунковий час евакуації до сходової клітини №57 (датчик 2): 57 с**.

Були враховані показники ділянок 62,63,65,67.

Розрахунковий час 57 с < Необхідний час 152 с.

Умова безпечної евакуації з цокольного поверху виконується.

* вказується час (в секундах) настання конкретного небезпечного чиннику пожежі від початку загоряння

** врахований час початку евакуації +0,5 хвилини, відповідно до [10]

Маломобільні групи населення. Відповідно до [11] місця обслуговування і (або) постійного перебування МГН повинні розташовуватися на мінімально можливих відстанях від евакуаційних виходів із приміщень, з поверхів і з будинків назовні. У даному проекті ця норма виконується.

Відповідно до ДБН В.2.2-40:2018 Інклюзивність будівель і споруд. Основні положення(додаток Б)[11] щільність людського потоку на маршрутах евакуації маломобільних груп населення до ліфтів на 3, 2 та 1 поверхах не досягає значення, яке впливає на швидкість руху людей у потоці.

Таким чином для визначення часу руху відвідувачів з малою мобільністю було використане табличне найнижче значення швидкості пересування для категорії М2 «Немічні люди, інваліди на протезах, інваліди з вадами зору». Для цієї категорії швидкість дорівнює 30 м/хв. Враховуючи довжину шляху по облаштованим коридорам кожного поверху 26.98 м, час руху рівний 1.4 хв з урахуванням часу початку евакуації. Отриманий час є меншим за необхідний та дозволяє евакуюватись до тамбуру ліфта, за допомогою якого

Висновки. За результатами математичного моделювання негативного впливу небезпечних чинників пожежі та визначення розрахункового часу евакуації людей з приміщення Касаційного цивільного суду, робиться висновок, що об'ємно-планувальні рішення цього закладу дозволяють провести безпечну евакуацію людей у разі пожежі. Проте деякі показники мають значення дуже близькі до критичних. Це означає, що під час проведення реконструкції на ці ділянки слід звернути особливу увагу і вжити додаткових заходів, які б змінили співвідношення розрахункових і критичних даних у бік їх більшої різниці.

На основі отриманих даних доцільно розробити рекомендації щодо оптимального розміщення людей в приміщеннях будівель, що належать до культурної спадщини.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше для умов саме таких параметрів об'ємно-планувальних рішень будівлі було визначено необхідний та розрахунковий час евакуації людей з приміщень.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання принципів та підходів, що викладено в роботі, для подібних об'єктів культурної спадщини для визначення часу безпечної евакуації, що дозволить підвищити безпеку відвідувачів та персоналу під час виникнення надзвичайної ситуації. У такого типу приміщеннях повинен бути зроблений особливий акцент на обладнанні візуальними вказівниками шляхів евакуації.

Список літератури

1. 7 історичних будівель у Києві, які горіли за останні 5 років [Електронне джерело] <https://bzh.life/ua/gorod/7-istoricheskikh-zdaniy-v-kieve-kotorye-goreli-za-poslednie-5-let/>
2. ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016 Настанова щодо виконання ремонтно-реставраційних робіт на пам'ятках архітектури та містобудування. [Електронне джерело] http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65005.
3. Тесленко, О. М., Цимбалістий, С. З., Кравченко, Н. В., Доценко, О. Г., Крикун, О. М. (2019). Аналіз існуючих програмних комплексів для розрахунку часу евакуації людей під час пожежі. Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека, (1), 33-39.

4. Ronchi, E. (2021). Developing and validating evacuation models for fire safety engineering. *Fire Safety Journal*, Vol. 120: 103020. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103020>.
5. Данілін, О. М., Ком'як, В. М., Дворецька, Т. О. (2019). Алгоритм моделювання індивідуально-потокowego руху людей при евакуації в умовах пожежі та його характеристики. *Проблеми надзвичайних ситуацій*, (29 (1)), 29-36.
6. Sano, T., Ronchi, E., Minegishi, Y., Nilsson, D. (2018). Modelling pedestrian merging in stair evacuation in multi-purpose buildings. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 85: 80-94. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.04.003>.
7. Kostenko, V., Gamiy, Y., Kostenko, T., Tsvirkun, S., Udovenko, M. (2021). Dynamics of motion of gases from a source of spontaneous combustion of coal in mine workings. *Rudarsko-geološko-NaftniZbornik*, n36(2): 109–117. <https://doi.org/10.17794/rgn.2021.2.10>.
8. Вовк С., Ференц Н. (2020). Протипожежний захист культових споруд в Україні. *Zeszyty Naukowe sgsp 2020, Nr 75/3/2020*. 39-49. DOI: 10.5604/01.3001.0014.4267.
9. Fire Dynamics Simulator – User's Manual. [Електронне джерело] <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir6469.pdf>.
10. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. [Електронне джерело] http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82138.
11. ДБН В.2.2-40:2018 Інклюзивність будівель і споруд. Основні положення. [Електронне джерело] http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79740.

References

1. 7 historical buildings in Kyiv that burned in the last 5 years [7 istorichnykh budivel' u Kyievi, yakihorily za ostanni 5 rokiv] [Electronic source] [https://bzh.life.ua/gorod/7-istoricheskikh-zdaniy-v-kieve-kotorye-goreli-za-poslednie-5-let/\(in Ukrainian\)](https://bzh.life.ua/gorod/7-istoricheskikh-zdaniy-v-kieve-kotorye-goreli-za-poslednie-5-let/(in Ukrainian)).
2. DSTU-N B V.3.2-4:2016 Guidelines on the execution of repair and restoration works on monuments of architecture and urban planning. [Nastanova shchodo vykonannya remontno-restavratsiynykh robit na pam'yatkakh arkhitektury ta mistobuduvannya] [Electronic source] http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65005 (in Ukrainian).
3. Teslenko, O. M., Tsimbalisty, S. Z., Kravchenko, N. V., Dotsenko, O. G., Krykun, O. M. (2019). Analysis of existing software complexes for calculating the time of evacuation of people during a fire. [Analiz isnuyuchykh prohramnykh kompleksiv dlya rozrakhunku chasu evakuatsiyi lyudey pid chas pozhezhi] *Scientific bulletin: civil protection and fire safety*, (1), 33-39 (in Ukrainian).
4. Ronchi, E. (2021). Developing and validating evacuation models for fire safety engineering. *Fire Safety Journal*, Vol. 120: 103020. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103020>.
5. Danilin, O. M., Komyak, V. M., Dvoretzka, T. O. (2019). Algorithm for modeling the individual flow movement of people during evacuation in fire conditions and its characteristics. [Alhorytm modelyuvannya indyvidual'no-potokovoho rukhu lyudey pry evakuatsiyi v umovakh pozhezhi ta yoho kharakterystyky] *Problems of emergency situations*, (29 (1)), 29-36 (in Ukrainian).
6. Sano, T., Ronchi, E., Minegishi, Y., Nilsson, D. (2018). Modelling pedestrian merging in stair evacuation in multi-purpose buildings. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 85: 80-94. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.04.003>.
7. Kostenko, V., Gamiy, Y., Kostenko, T., Tsvirkun, S., Udovenko, M. (2021). Dynamics of motion of gases from a source of spontaneous combustion of coal in mine workings. *Rudarsko-geološko-NaftniZbornik*, n36(2): 109–117. <https://doi.org/10.17794/rgn.2021.2.10>.
8. Vovk S., Ferenc N. (2020). Fire protection of religious buildings in Ukraine. [Protypozhezhnyy zakhyst kul'tovykh sporud v Ukrayini] *Zeszyty Naukowe sgsp 2020, Nr 75/3/2020*. 39-49. DOI: 10.5604/01.3001.0014.4267 (in Ukrainian).
9. Fire Dynamics Simulator – User's Manual. [Електронне джерело] <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir6469.pdf>.
10. DSTU 8828:2019 Fire safety. Terms. [Pozhezha bezpeka. Zahal'ni polozhennya.] [Electronic source] http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82138 (in Ukrainian).
11. DBN V.2.2-40:2018 Inclusiveness of buildings and structures. Substantive provisions. [Inklyuzyvnist' budivel' i sporud. Osnovni polozhennya.] [Electronic source] http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79740 (in Ukrainian).

Надійшла до редакції 04.10.2022

S. Tsvirkun, T. Kostenko, M. Udovenko

ENSURING THE PROTECTION OF PEOPLE FROM EMERGENCIES RELATED TO FIRES IN BUILDINGS BELONGING TO CULTURAL HERITAGE OBJECTS

Purpose. Ensuring the protection of people from emergency situations related to fires in buildings belonging to cultural heritage sites by means of mathematical modeling of dynamic processes and phenomena characteristic of fire.

Methods. The FDS software complex, which numerically solves the Navier-Stokes equation for low-speed temperature-dependent flows, was used to determine the dangerous factors of fire. An analytical model of the movement of people during a fire was used to calculate the evacuation time.

Results. Based on the results of the simulation, the values of fire hazard factors in the volume of the building have been calculated, and the dependence of the indicators on time has also been determined. The obtained data illustrate the spread of dangerous fire factors in premises with a complex planning scheme. They are necessary for the rational placement of people in order to increase their safety in the event of an emergency. Due to mathematical modeling, we get information about which security measures should be given special attention.

Scientific novelty of the obtained results lies in the fact that for the conditions of precisely such parameters of the volume-planning decisions of the building, the time of the onset of the critical value of dangerous fire factors and the time of evacuation of people from the premises have been determined.

Practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the principles and approaches presented in the work for similar cultural heritage sites to determine the necessary evacuation time, which allows increasing the safety of visitors and staff during an emergency situation. In this type of premises, special emphasis should be placed on equipping with visual indicators of evacuation routes.

Keywords: dangerous factors of fire, modeling, evacuation, estimated time.

Відомості про авторів

Цвіркун Сергій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри організації заходів цивільного захисту Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна), <https://orcid.org/0000-0002-1807-9330>; tsvirkun80@ukr.net

Костенко Тетяна Вікторівна – доктор технічних наук, професор, заступник начальника кафедри безпеки об'єктів будівництва та охорони праці Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна), <https://orcid.org/0000-0001-9426-8320>; tatiana.kostenko@gmail.com

Удовенко Максим Юрійович – старший науковий співробітник відділу організації наукової діяльності Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна), <https://orcid.org/0000-0002-4143-8645>; max.udovenko@gmail.com

Tsvirkun Serhii – PhD, Associate Professor, Head of the Department of organization of civil protection measures, Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-1807-9330>; tsvirkun80@ukr.net

Kostenko Tetiana - Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Department of construction objects safety and labor protection, Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0001-9426-8320>; tatiana.kostenko@gmail.com

Udovenko Maksym - Senior Researcher of the Department of Organization of Scientific Activity, Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-4143-8645>; max.udovenko@gmail.com

УДК 331.453:614.89

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-216-227](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-216-227)

С.І. Чеберячко, В.В. Гридяєв, **А.А.-А. Еннан**
Ю.І. Чеберяко, Н.М. Абрамова, І.М. Книш

ВИБІР РЕСПІРАТОРІВ НА ОСНОВІ РЕЗУЛЬТІВ ВИМІРЮВАННЯ АНТРОПОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ СЕРЕДНЬОСТАТИСТИЧНОГО РОБІТНИКА АКХЗ ТА ШЕФФІЛДІВСЬКОГО МАНЕКЕНУ ГОЛОВИ

Мета. Визначення антропометричного розподілу середньостатистичного українського робітника для підвищення достовірності розрахунку коефіцієнта захисту респіраторів завдяки удосконаленню процедури з лабораторної оцінки коефіцієнту проникнення.

Методи. Проведено порівняння методики вибору респіраторів на основі методів математичної статистики і статистичного аналізу – для встановлення взаємозв'язків між антропометричними розмірами обличчя користувачів і Шеффілдівського манекену голови, відповідно стандарту ISO 16900-1:2020 «Respiratory protective devices – Methods of test and test equipment – Part 1: Determination of inward leakage» та Технічного регламенту.

Результати. Удосконалено процедуру з визначення коефіцієнту проникнення респіраторів з підбору відповідного типу Шеффілдівського манекену та оцінки коефіцієнта підсмоктування – щодо підбору кількості випробувачів, які б забезпечили перевірку відповідності конструктивних параметрів півмасок респіраторів до антропометричних параметрів обличчя можливих користувачів. Визначені антропометричного розподілу середньостатистичного українського робітника для коригування параметрів (розміру комірок та кількості випробувачів в комірках) відомої параметричної таблиці з підбору випробувачів, щодо проведення лабораторного дослідження з визначення коефіцієнту підсмоктування півмасок респіраторів за смугою обтюрації чи клапанної системи (за наявності).

Наукова новизна. Покращення достовірності досліджень з визначення коефіцієнту захисту засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) - фільтрувальних респіраторів є актуальною задачею. Проте, у вітчизняних стандартах з визначення якості ЗІЗОД не наведено даних щодо антропометричних розмірів обличчя українських робітників, Шеффілдівського манекену голови та вимог до обличчя випробувачів-добровольців. Наслідком цього є невідповідність технічних характеристик респіраторів, що декларуються розробником і фактичних, одержаних під час їх експлуатації у виробничих умовах.

Практичне значення. На підґрунті одержаних даних щодо 400 типових користувачів ЗІЗОД – робітників Авдіївського коксохімічного заводу (АКХЗ) віком від 20 до 55 років виявлено їх розподіл за довжиною та шириною обличчя. За результатами досліджень, участь у яких приймали двадцять п'ять добровольців, відібраних за десятьма параметрами, визначено антропометричні розміри обличчя середньостатистичного робітника АКХЗ і відповідного Шеффілдівського манекену голови.

Ключові слова: фільтрувальний респіратор, коефіцієнт проникнення, антропометричні розміри обличчя, параметрична таблиця.

Вступ. Професійні захворювання органів дихання (пневмоконіоз та пилові бронхіти) належать до найпоширеніших, тому у розвинутих країнах світу ставлять жорсткі вимоги до викидів у навколишній простір. Зокрема, Національним інститутом охорони праці США у 2016 році були внесені зміни у стандарт 29 CFR 1910.134 «Respiratory Protection» – гранично допустиму концентрацію (ГДК) респірабельної фракції пилу зменшено з 2 мг/м³ до 1,5 мг/м³ [1, 2]. У зв'язку з цим, незважаючи на існування різноманітних засобів колективного захисту, виникає необхідність у застосуванні ЗІЗОД –фільтрувальних респіраторів, що забезпечують збереження здоров'я, а іноді й життя користувачів.

В Україні вибір респіраторів відбувається згідно з вимогами національних стандартів щодо засобів індивідуального захисту органів дихання – «актуалізованих» стандартів Євросоюзу [1-3], дослівний переклад котрих не в повній мірі відображає зміст необхідних випробувань і, головне, в національних стандартах України не визначені антропометричні розміри обличчя користувачів і Шеффілдівського манекену

голови, про які йдеться в ISO 16900-1:2020 «Respiratory protective devices—Methods of test and test equipment – Part 1: Determination of inward leakage». А втім, ефективність ЗІЗОД відповідно до Технічного регламенту фактично визначається за процедурами оцінки їх відповідності (модулі А - Д) вимогам національних стандартів за модулями А - Д. Зокрема, згідно ДСТУ EN 149:2017 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Фільтрувальні півмаски для захисту від аерозолів» (п. 7.9.1) одним із важливих показників, який впливає на ступінь захисту фільтрувальних респіраторів є коефіцієнт підсосу (п. 7.9.1). За методикою, наведеною у п. 8.5 вищезгаданого стандарту, для випробувань респіраторів необхідно відібрати десять поголених випробувачів (без бороди і бакенбардів) з характерними для типових користувачів антропометричними розмірами обличчя. Особи ж з іншими рисами обличчя, для яких неможливо підібрати фільтрувальну півмаску, до випробувань не залучаються. Тобто, достовірність визначених за такою методикою коефіцієнтів підсосу, що використовуються для оцінки захисних властивостей респіраторів, розповсюджується тільки на користувачів зі схожими параметрами обличчя. У інших випадках, коли антропометричні розміри обличчя користувачів більші або менші, респіратори не будуть відповідати задекларованому класу захисту. Більш того, відсутність вимог до розмірів Шеффілдівського манекену голови, з використанням якого визначаються коефіцієнти проникнення півмаски згідно пункту 8.11. ДСТУ EN 149:2017 та невідповідність його розміру конструкторським параметрам півмасок призводить до спотворення результатів лабораторних випробувань респіраторів через зменшення площі фільтрування півмасок внаслідок «провальювання» обличчя або несумісності півмасок з обличчям, відповідно.

Вирішення описаної дилеми, на першому етапі, вбачається в удосконаленні процедур з визначення коефіцієнту проникнення респіраторів з підбору відповідного типу Шеффілдівського манекену та оцінки коефіцієнта підсмоктування – щодо підбору кількості випробувачів, які б забезпечили перевірку відповідності конструктивних параметрів півмасок респіраторів до антропометричних параметрів обличчя можливих користувачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі наступні методики підбирання випробувачів, перша – випробувачів підбирають таким чином, щоб розмір та особливості їх обличчя були характерні для не менш ніж 95% користувачів [3]. Відповідно до другої методики у випробувачів антропометричні розміри обличчя та їх форма повинні відповідати розміру і формі лицевої частини півмаски [4].

У проведеному дослідженні [5] описуються проблеми, які пов'язані з визначенням коефіцієнта підсосу (ДСТУ EN 149:2017) на групі з 10-ти поголених випробувачів (рис. 1), яка охоплює набір характеристик обличчя типових користувачів за умов, що кожному з них правильно підібрана півмаска, однак дієвих рекомендацій надано не було.

Так, при виконанні чисельних сертифікаційних випробувань за даною методикою показали, що максимальне проникнення тест-аерозолі спостерігається у випробувачів з малими або великими

обличчями особливо при розмові та рухах голови. Тоді, як найкращий результат у випробувачів з середнім розміром обличчя [6].

Відмітимо, що дана проблема зараз активно обговорюється. Зокрема, увагу приділяють наступним питанням: часу проведення лабораторних досліджень (деякі фахівці вважають його занадто тривалий [7]), кількості задіяних випробувачів (щоб охопити весь спектр можливих антропометричних розмірів [8]), встановленню впливу найвпливовіших розмірів обличчя на коефіцієнт проникання (деякі фахівці говорять, що це довжина обличчя і ширина губ [9], інші – на довжині та ширині

обличчя, існують дослідження, які доводять необхідність врахування і ширини і висоти носа [10]).

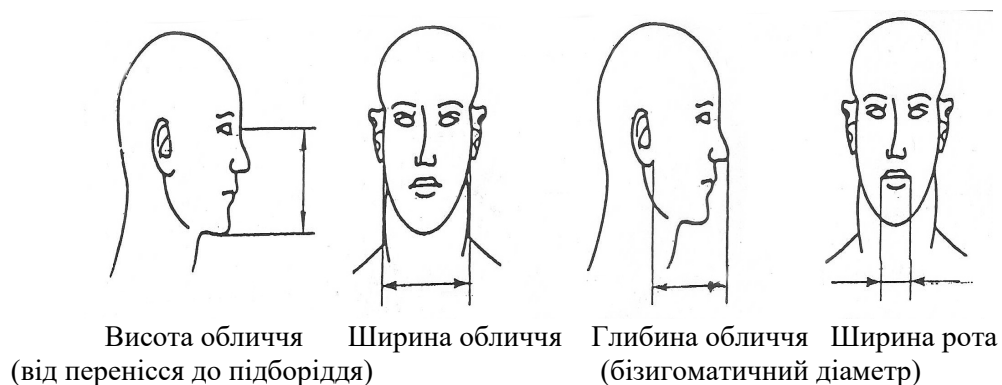


Рисунок 1 – Параметри обличчя, які необхідно контролювати при дослідженні ЗІЗОД відповідно до вимог ДСТУ EN 149:2017

Проведений аналіз вказує на існування проблем з визначенням коефіцієнта підсосу та коефіцієнта проникання при проведенні лабораторних випробувань фільтрувальних півмасок.

Таблиця 1 – Антропометричні розміри обличчя дослідників

Номер зразка на випробувачі	Розміри обличчя (мм)			Ширина рота
	Висота	Ширина	Глибина	
1	109	139	121	52
2	110	142	113	54
3	110	139	112	52
4	114	139	112	54
5	110	136	110	56
6	109	137	112	53
7	114	135	111	55
8	108	140	107	51
9	107	138	111	53
10	109	139	115	53

Мета роботи. Визначення антропометричного розподілу середньостатистичного українського робітника для підвищення достовірності розрахунку коефіцієнта захисту респіраторів завдяки удосконаленню процедури з лабораторної оцінки коефіцієнту проникнення фільтрувальних поверхонь/фільтрів респіраторів і коефіцієнта підсмоктування півмасок за смугою обтюрації через вибір відповідного типу Шеффільського манекену голови і відповідного підбору двадцяти п'яти випробувачів з антропометричними розмірами обличчя які відповідають середньостатистичному українському робітнику на прикладі Авдієвського коксохімічного заводу.

Методи дослідження. Відомо, що в США для лабораторної перевірки захисних властивостей півмасок, на відміну від країн Європейського союзу, залучають 25 осіб, яких вибирають у відповідності до спеціальної параметричної таблиці розробленої в Національній лабораторії з засобів індивідуального захисту в Лос-Аламосе (LANL) (рис. 2) [11]. В ній всі випробувачі поділені на десять груп за довжиною і шириною обличчя. При цьому кількість осіб в кожній комірці визначається експериментально – на основі проведених вимірів обличчя груп потенційних користувачів, обличчя яких

мають різні антропометричні особливості. Вважається, що використання даної методики підбору дозволить у 95% потенційних користувачів об'єктивно визначати захисні характеристики у лабораторних умовах.

Таким чином, виникає актуальна задача у визначенні антропометричного розподілу середньостатистичного українського робітника для коригування параметрів (розміру комірок та кількості випробувачів в комірках) відомої параметричної таблиці з підбору випробувачів, щодо проведення лабораторного дослідження з визначення коефіцієнту підсмоктування півмасок респіраторів за смугою обтюрації чи клапанної системи (за наявності). Крім того, отримані результати антропометричного розподілу дозволить встановити розміри і тип Шеффілдівського манекена голови, який необхідно для визначення коефіцієнту проникнення фільтрувальної поверхні/фільтрів респіратора.

		134,5	146,5	
138,5	6 2 випробувача	9 2 випробувача	10 2 випробувача	
128,5		7 4 випробувача	8 2 випробувача	
118,5	3 2 випробувача	4 5 випробувачів	5 2 випробувача	
108,5	1 2 випробувача	2 2 випробувача		
98,5				
	120,5	132,5	144,5	158,5
	Ширина обличчя, мм			

Рисунок 2 – Таблиця NIOSH з підбору випробувачів для перевірки захисних властивостей фільтрувальних півмасок

Виклад основного матеріалу. У дослідженні для визначення антропометричних розмірів обличчя брали участь 400 добровольців (320 чоловіків і 80 жінок) віком від 20 до 55 років з Авдіївського коксохімічного заводу. Вимірювались розміри обличчя, які впливають на захисні характеристики півмасок [11]. У таблиці 2 і рис. 3 показані скорочення і опис вимірюваних розмірів.

Визначення наведених антропометричних розмірів проводили за фотографіями добровольців (фас і профіль) у програмі Python 2.7 з бібліотеками NumPy та PIL. Для використовували алгоритм Local Binary Patterns (алгоритм розпізнавання обличчя, заснований на локальному двійковому операторі (рис. 4)). Суть його полягає в тому, що ми розбиваємо зображення на частини та у кожній такій частині кожен піксель порівнюється із сусідніми 8 пікселями. Якщо значення центрального пікселя більше за сусіднє, то пишемо 0, інакше 1. І так для кожного пікселя у нас виходить деяке число. Далі з урахуванням цих чисел всім частин, куди ми розбивали фотографію, вважається гістограма. Всі гістограми з усіх частин об'єднуються в один вектор, що характеризує зображення в цілому, на яких встановлювали необхідні ключові точки за пікселями.

Далі проводили розрахунок кількості пікселів, котрі попередньо масштабувались в одному міліметрі за допомогою математичних пакетів, при цьому градація головного

показчика масштабування відповідала стандартам, прийнятим в класичних антропометричних дослідженнях: «кордон мезокефалію» (середній розмір голови) лежить між значеннями 76 мм і 81 мм.

Таблиця 2 – Основні антропометричні розміри обличчя

Параметри, що визначають розмір обличчя	Опис параметрів основних розмірів обличчя	Позначення на рисунку
Ширина обличчя за лінією очей	Максимальна ширина обличчя у горизонтальній площині під очима	1
Ширина обличчя за лінією губ	Відстань між правою і лівою кутовими точками нижніх частин щелепи за лінією губ	2
Довжина обличчя	Відстань між нижньою точкою підборіддя і верхньою точкою заглибленості носа між бровами	3
Ширина обличчя за кутами нижньої щелепи	Відстань від нижнього кінчика вуха до нижньої точки щелепи	4

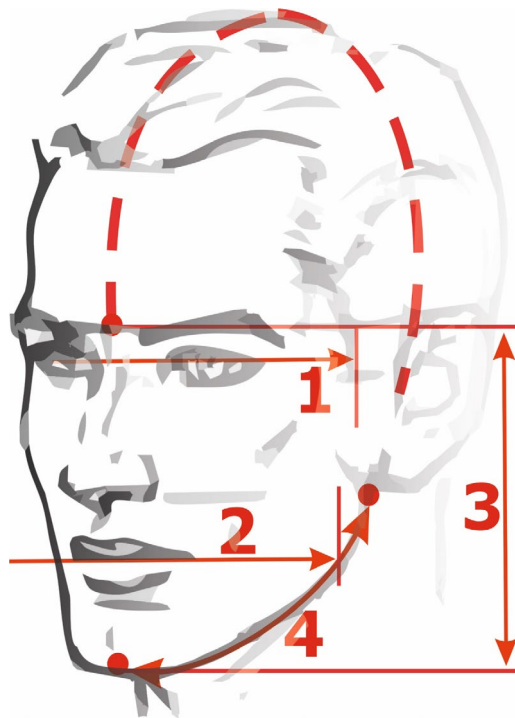


Рисунок 3 – Розміри обличчя, які визначались при дослідженні

В табл. 3 наведені середні результати вимірів основних антропометричних характеристик обличчя для чоловіків і жінок, які необхідні для визначення розміру манекена голови. Діапазон довжини обличчя перевірених осіб склав 98,5мм до 143,2мм, ширини – від 121,3мм до 164,9мм.

Визначені ширина і довжина обличчя дозволили встановити основні розміри параметричної таблиці. Її поле рівномірно поділене на десять комірок за діапазоном антропометричних параметрів обличчя (рис. 5). Далі розраховували кількість людей, які потрапили в ту чи іншу комірку параметричної таблиці (табл. 4). Процентне співвідношення кількості випробувачів у різних комірках, використовуючи за рекомендаціями Інституту з охорони праці США для розрахунку кількості

випробувачів засобів індивідуального захисту органів дихання, що будуть приймати участь у лабораторних перевірках. Загальна їх кількість складає 25 осіб. Їх розподіл відбувався за наступним принципом до 10 % кількості учасників дослідження з виміру антропометричних параметрів обличчя, які потрапили в певну комірку прирівнювались до 2-х випробувачів фільтрувальних респіраторів; до 15% потребували 3-ьох випробувачів і до 20% - 4 випробувача, відповідно (рис. 5).

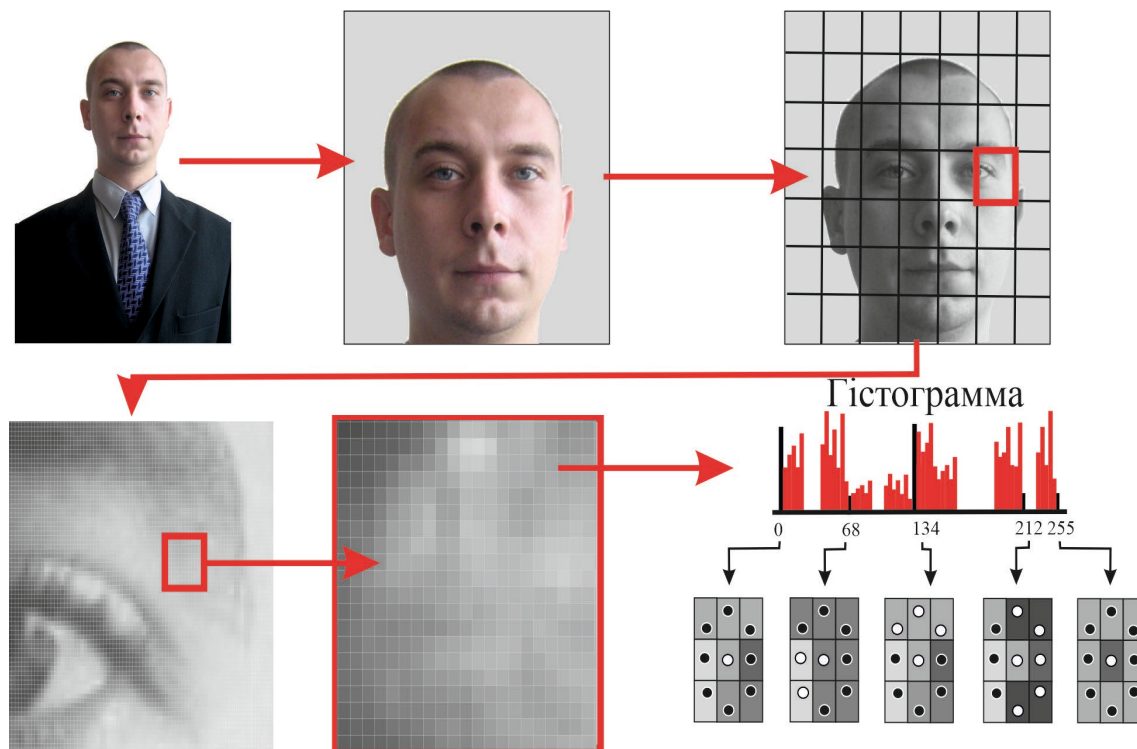


Рисунок 4 – Чотири кроки алгоритму Local Binary Patterns (вихідне зображення; сегментація зображення обличчя; розділене на області; гістограми областей окремо; загальна гістограма)

Таблиця 3 – Результати вимірів розмірів обличчя, мм

Розмір	Чоловіки (320)	Жінки (80)	Всього (400)
Ширина обличчя за лінією очей	130.2±9.1	121.1±9.1	128.4±10.1
Ширина обличчя за лінією губ	144.3±8.9	135.3±6.0	144.5±8.9
Довжина обличчя	121.1±8.4	115.2±5.8	119.8±7.8
Ширина обличчя за кутами нижньої щелепи	174.3±6.9	165.3±7.4	169.8±8.9

Беручи до уваги вимоги стандарту ISO 16900-1:2020 «Respiratory protective devices—Methods of test and test equipment – Part 1: Determination of inward leakage» до типорозмірів Шеффілдівського манекена голови (рис. 6), який використовується при визначенні коефіцієнта проникання фільтрувальних півмасок відповідно до даних табл. 5., можна встановити конкретний тип манекена.

Судячи з отриманих результатів розподілу кількості добровольців, які прийняли участь у дослідженнях, найбільша їх кількість (майже 50%) сконцентрована у комірках

6, 7 і 8, що дозволяє говорити про превалювання середнього/широкого типу обличчя. Тому для визначення коефіцієнта проникнення бажано використовувати саме такий манекен голови (табл. 5) або два манекени – середнього та середнього/широкого розмірів. На рис. 6 наведено кількість випробувачів, яких необхідно підібрати для проведення перевірки фільтрувальних півмасок.

Таблиця 4 – Розподіл антропометричних параметрів обличчя

№ дільниці параметричної таблиці	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кількість випробувачів, які потрапили у дільницю	9	16	21	31	34	57	81	66	51	34
Співвідношення досліджених людей, %	2,25	4	5,25	7,75	8,5	14,25	20,25	16,5	12,75	8,5

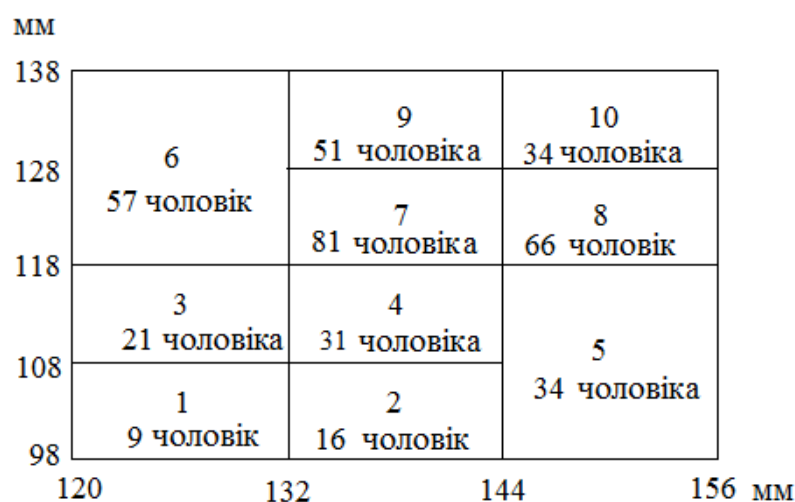


Рисунок 4 – Удосконалена параметрична таблиця з вказаною кількістю людей, які потрапили в певну дільницю за розмірами довжини і ширини обличчя

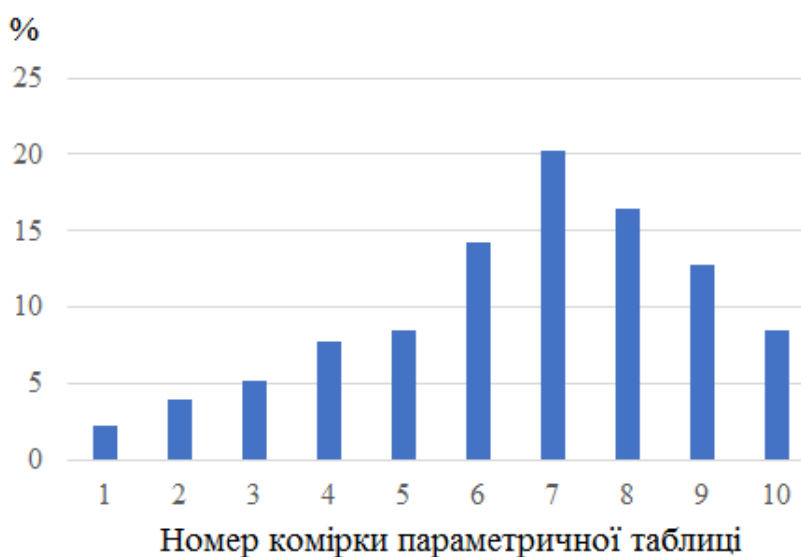


Рисунок 5 – Розподіл співвідношення кількості досліджених людей в комірках параметричної таблиці

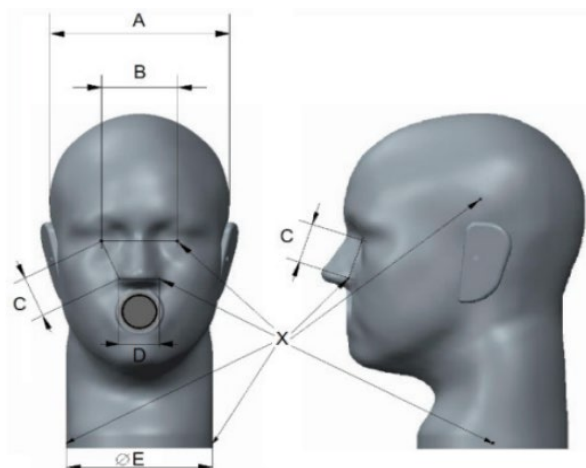


Рисунок 6 – Розміри Шеффілдівського манекена голови

Таблиця 5 – Розміри Шеффілдівського манекена голови

Типорозмір	A	B	C	D	E
малий, мм	144	59	36	32	115
малий/довгий, мм	152	65	39	39	121
середній, мм	152	64	37	36	121
середній/широкий, мм	153	63	43	35	125
великий, мм	161	68	40	42	138



Рисунок 7 – Розподіл випробувачів для перевірки коефіцієнта підсосу фільтрувальних респіраторів у параметричній таблиці

Обговорення результатів. Отримані результати розподілу кількості випробувачів для перевірки захисних властивостей респіраторів на добровольцях дозволяють охопити весь спектр антропометричних параметрів обличчя, які зустрічаються в нашій країні. Також встановлені розміри довжини і ширини обличчя дозволяють розрахувати периметр обтюратору півмаски, який забезпечить відповідність її конструкції розмірам обличчя (рис. 7,8).

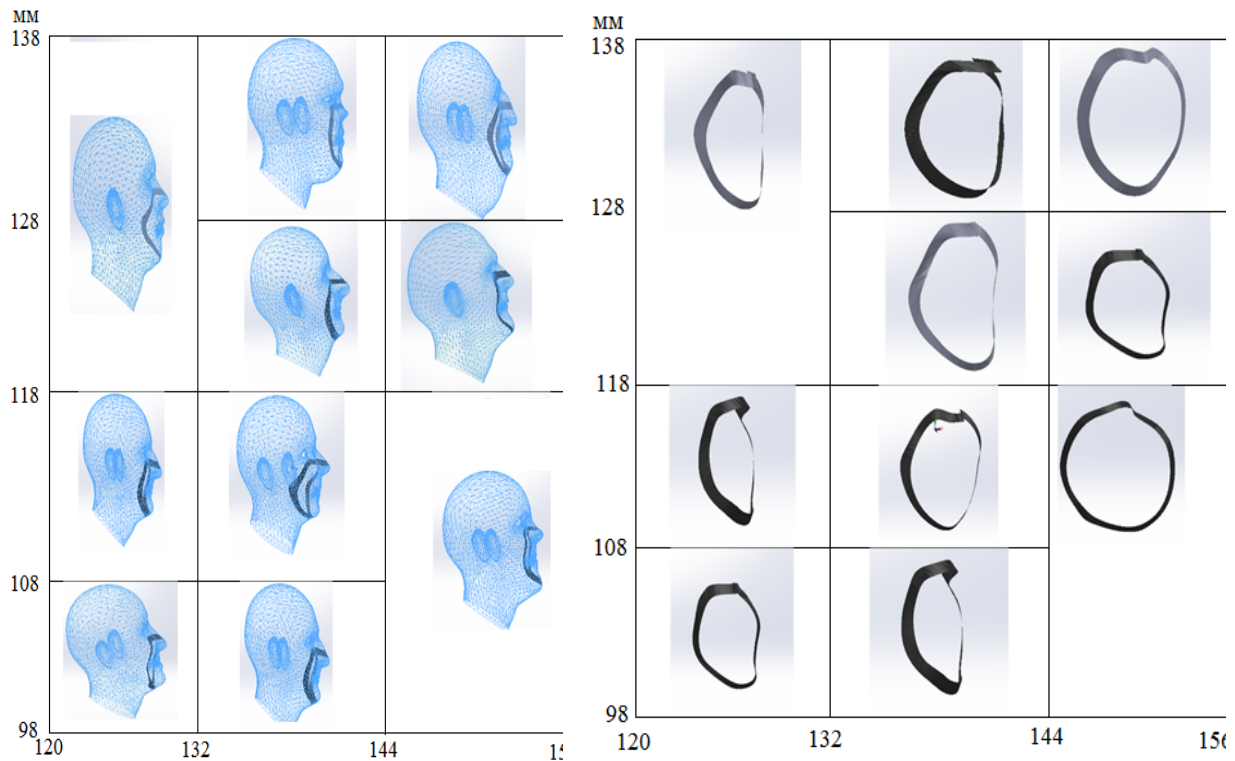


Рисунок 8 – Розрахунок периметру обтюратора півмасок для різних типів обличчя

Аналіз наведених даних показує, що зі збільшенням розміру ширини обличчя виникає необхідність нарощення фільтрувальної поверхні півмаски. Очевидно, для забезпечення надійного ізолювання органів дихання потрібно виготовити або декілька розмірів півмасок або можливість підганяти обтюратор відповідно до антропометричних параметрів. Цікаво, що на розмір периметру півмаски впливає ширина і висота перенісся. До речі саме ця ділянка є найбільш проблемною для забезпечення щільного прилягання обтюратора до лиця користувача респіратора.

Виготовлення декількох типорозмірів таких півмасок, що потребує подальших досліджень, оскільки це призведе до значних додаткових затрат виробника. Тому подальші дослідження повинні бути направлені на пошук раціональної конструкції півмаски зі зміною геометрією, щоб швидко пере налаштовуватись до різних типів обличчя.

Висновок. На підґрунті одержаних антропометричних даних щодо 400 типових користувачів фільтрувальних респіраторів – робітників Авдіївського коксохімічного заводу (АКХЗ) віком від 20 до 55 років визначено їх розподіл за довжиною і шириною обличчя, що дозволило підібрати для проведення лабораторних випробувань респіраторів з визначення коефіцієнту підсмоктування півмаски респіратора за смугою обтюрації та клапанної системи (за наявності) двадцять п'ять випробувачів, які розподілені відповідно до комірок удосконаленої параметричної таблиці. На основі встановленого антропометричного розподілу запропоновано підхід з визначення моделі Шеффілдівського манекену голови середньостатистичного українського робітника для визначення коефіцієнту проникнення через фільтрувальну поверхню/фільтр респіратора.

Список літератури

1. Nelson T.J., Colton C.E. The Effect of Inhalation Resistance on Facepiece Leakage. *AIHAJ*. 2000. Vol. 61, no. 1. P. 102–105. URL: [https://doi.org/10.1202/0002-8894\(2000\)061%3C0102:teoiro%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1202/0002-8894(2000)061%3C0102:teoiro%3E2.0.co;2) (date of access: 25.09.2022).
2. Kirillov V.F., Buchnev A.A., Chirkin A.V. [On individual protective means for workers' respiratory organs (review of literature)]. *Med Tr Prom Ekol*. 2013;(4):25-31. Russian. PMID: 24006621. <https://doi.org/10.1080/1529866008984522> (date of access: 25.09.2022).
3. Oestestad R. K., Dillion H.K., Perkins L.L. Distribution of Facesal Leak Sites on a Half-Mask Respirator and Their Association with Facial Dimensions. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1990. Vol. 51, no. 5. P. 285–290. URL: <https://doi.org/10.1080/15298669091369664> (date of access: 25.09.2022).
4. Janssen L., Weber R. The Effect of Pressure Drop on Respirator Facesal Leakage. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2005. Vol. 2, no. 7. P. 335–340. URL: <https://doi.org/10.1080/15459620590965068> (date of access: 25.09.2022).
5. Campbell D.L., Coffey C.C., Lenhart S.W. Respiratory Protection as a Function of Respirator Fitting Characteristics and Fit-Test Accuracy. *AIHAJ - American Industrial Hygiene Association*. 2001. Vol. 62, no. 1. P. 36–44. URL: <https://doi.org/10.1080/15298660108984607> (date of access: 25.09.2022).
6. Oestestad R.K., Elliott L.J., Beasley T.M. The Effect of Gender and Respirator Brand on the Association of Respirator Fit with Facial Dimensions. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, no. 12. P. 923–930. URL: <https://doi.org/10.1080/15459620701709619> (date of access: 25.09.2022).
7. Zhuang Z., Coffey C.C., Ann R.B. The Effect of Subject Characteristics and Respirator Features on Respirator Fit. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2005. Vol. 2, no. 12. P. 641–649. URL: <https://doi.org/10.1080/15459620500391668> (date of access: 25.09.2022).
8. Comparison of Five Methods for Fit-Testing N95 Filtering-Facepiece Respirators / C.C. Coffey et al. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*. 2002. Vol. 17, no. 10. P. 723–730. URL: <https://doi.org/10.1080/10473220290107002> (date of access: 25.09.2022).
9. Groce D. Three-dimensional facial parameters and principal component scores: Association with respirator fit. / D. Groce., S. Guffey, D.J. Viscusi//*Journal of the International Society for Respiratory Protection*. – 2010. - № 27(1). – P. 1–15.
10. Oestestad R.K., Perkins L.L. An assessment of critical anthropometric dimensions for predicting the fit of a half-mask respirator. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1992. Vol. 53, no. 10. P. 639–644. URL: <https://doi.org/10.1080/15298669291360283> (date of access: 25.09.2022).
11. Brochot C. Etat de l'art de la mesure de l'efficacité des appareils de protection respiratoire et description d'un nouveau banc de test des APR dédié aux nanoparticules/ Brochot C., Michielsen N., Chazelet S. Thomas D. et Bemer D // 25-eme Congrès Français sur les Aérosols. – Paris, - 2010. (13 -14 Janvier) - p. 128–132.
12. Zhuang Z., Bradtmiller B., Shaffer R.E. New Respirator Fit Test Panels Representing the Current U.S. Civilian Work Force. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2007. Vol. 4, no. 9. P. 647–659. URL: <https://doi.org/10.1080/15459620701497538> (date of access: 25.09.2022).

References

1. Nelson T.J., Colton C.E. (2000) The Effect of Inhalation Resistance on Facepiece Leakage. *AIHAJ*. Vol. 61, no. 1. P. 102–105. URL: [https://doi.org/10.1202/0002-8894\(2000\)061%3C0102:teoiro%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1202/0002-8894(2000)061%3C0102:teoiro%3E2.0.co;2) (date of access: 25.09.2022).
2. Kirillov V.F., Buchnev A.A., Chirkin A.V. (2013) [On individual protective means for workers' respiratory organs (review of literature)]. *Med Tr Prom Ekol*;(4):25-31. Russian. PMID: 24006621. <https://doi.org/10.1080/1529866008984522> (date of access: 25.09.2022).
3. Oestestad R.K., Dillion H.K., Perkins L.L. (1990) Distribution of Facesal Leak Sites on a Half-Mask Respirator and Their Association with Facial Dimensions. *American Industrial Hygiene Association Journal*. Vol. 51, no. 5. P. 285–290. URL: <https://doi.org/10.1080/15298669091369664> (date of access: 25.09.2022).
4. Janssen L., Weber R. (2005) The Effect of Pressure Drop on Respirator Facesal Leakage. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. Vol. 2, no. 7. P. 335–340. URL: <https://doi.org/10.1080/15459620590965068> (date of access: 25.09.2022).
5. Campbell D.L., Coffey C.C., Lenhart S.W. (2001) Respiratory Protection as a Function of Respirator Fitting Characteristics and Fit-Test Accuracy. *AIHAJ - American Industrial Hygiene Association*. Vol. 62, no. 1. P. 36–44. URL: <https://doi.org/10.1080/15298660108984607> (date of access: 25.09.2022).

6. Oestenstad R.K., Elliott L.J., Beasley T.M. (2007) The Effect of Gender and Respirator Brand on the Association of Respirator Fit with Facial Dimensions. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. Vol. 4, no. 12. P. 923–930. URL: <https://doi.org/10.1080/15459620701709619> (date of access: 25.09.2022).
7. Zhuang Z., Coffey C.C., Ann R.B. (2005) The Effect of Subject Characteristics and Respirator Features on Respirator Fit. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. Vol. 2, no. 12. P. 641–649. URL: <https://doi.org/10.1080/15459620500391668> (date of access: 25.09.2022).
8. Comparison of Five Methods for Fit-Testing N95 Filtering-Facepiece Respirators / C. C. Coffey et al. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*. 2002. Vol. 17, no. 10. P. 723–730. URL: <https://doi.org/10.1080/10473220290107002> (date of access: 25.09.2022).
9. Groce D. (2010) Three-dimensional facial parameters and principal component scores: Association with respirator fit. / D. Groce., S. Guffey, D.J. Viscusi // *Journal of the International Society for Respiratory Protection*. – № 27(1). – P. 1–15.
10. Oestenstad R.K., Perkins L.L. (1992) An assessment of critical anthropometric dimensions for predicting the fit of a half-mask respirator. *American Industrial Hygiene Association Journal*. Vol. 53, no. 10. P. 639–644. URL: <https://doi.org/10.1080/15298669291360283> (date of access: 25.09.2022).
11. Brochot C. (2010) Etat de l'art de la mesure de l'efficacité des appareils de protection respiratoire et description d'un nouveau banc de test des APR dédié aux nanoparticules / Brochot C., Michielsen N., Chazelet S., Thomas D., et. Bemmer D. // 25-eme Congrès Français sur les Aérosols. – Paris, (13 -14 Janvier) - p. 128–132.
12. Zhuang Z., Bradtmiller B., Shaffer R.E. (2007) New Respirator Fit Test Panels Representing the Current U.S. Civilian Work Force. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. Vol. 4, no. 9. P. 647–659. URL: <https://doi.org/10.1080/15459620701497538> (date of access: 25.09.2022).

Надійшла до редакції 26.09.2022

S. Cheberiyachko, V. Hridyayev, **A. Ennan**, Y. Cheberiyachko, N. Abramova, I. Knysch

SELECTION OF RESPIRATORS BASED ON THE RESULTS OF MEASURING THE ANTHROPOMETRICAL DIMENSIONS OF THE AVERAGE STATISTICAL WORKER OF AVDIIVKA COKE PLANT AND THE SHEFFIELD MANNEQUIN HEAD

Purpose. Determination of the anthropometric distribution of the average Ukrainian worker to increase the reliability of the calculation of the protection factor of respirators due to the improvement of the procedure for laboratory assessment of the penetration factor.

Methods. A comparison has been made of the method of selecting respirators based on the methods of mathematical statistics and statistical analysis to establish relationship between the anthropometric dimensions of the users' faces and the Sheffield mannequin of the head, in accordance with the ISO 16900-1:2020 standard "Respiratory protective devices - Methods of test and test equipment - Part 1: Determination of inward leakage" and the Technical Regulations.

Results. The procedure for determining the penetration factor of respirators from the selection of the appropriate type of the Sheffield mannequin and the evaluation of the suction coefficient has been improved with regard to the selection of the number of testers who would ensure the compliance of the design parameters of the respirators with the anthropometric parameters of the face of possible users. The determined anthropometric distribution of the average Ukrainian worker for adjusting the parameters (cell size and number of testers in the cells) of the known parametric table for the selection of testers, in relation to conducting a laboratory study to determine the suction coefficient of half-mask respirators by the obturation band or valve system (if available).

Scientific novelty. Improving the reliability of studies on the determination of the protection factor of personal respiratory protective devices (RPD) (filtering respirators) is an urgent task. However, in the domestic standards for determining the quality of RPD, there are no data on the anthropometric dimensions of the faces of Ukrainian workers, the Sheffield mannequin of the head, and the requirements for the faces of volunteer testers. The consequence of this is the discrepancy between the technical characteristics of the respirators declared by the developer and the actual ones obtained during their operation in production conditions.

Practical significance. On the basis of the obtained data regarding 400 typical users of RPD, workers of Avdiivka Coke and Chemical Plant (ACCP) aged 20 to 55 years, their distribution by length and width of faces has been revealed. According to the results of the research, in which twenty-five volunteers, selected according to ten parameters, took part, the anthropometric dimensions of the face of the average worker of the ACCP and the corresponding Sheffield mannequin of the head have been determined.

Keywords: filtering respirator, penetration factor, anthropometric dimensions of the face, parametric table.

Відомості про авторів

Чеберячко Сергій Івановіч – докт. техн. наук, професор, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", (проспект Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна), orcid.org/ 0000-0003-3281-7157. E-mail: sicheb@ukr.net

Гридяєв Володимир Васильович – аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", (проспект Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна), orcid.org/ 0000-0001-7767-4490 E-mail: Vladimir493@ukr.net

Еннан Алім Абдул-Амідович – докт. хім. наук, професор Директор Фізико-хімічний інститут захисту навколишнього середовища і людини МОН України та НАН України, (вул. Преображенська, 3, м. Одеса, 65082 Україна) orcid.org/0000-0003-4578-7858. E-mail: eksvar@ukr.net

Чеберячко Юрій Івановіч – докт. техн. наук, професор, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", (проспект Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна), orcid.org/ 0000-0001-7307-1553. E-mail: cheberiachkoyi@ukr.net

Абрамова Наталія Миколаївна – Завідувачка відділом «Теоретичні основи розробки засобів індивідуального захисту» Фізико-хімічний інститут захисту навколишнього середовища і людини МОН України та НАН України, (вул. Преображенська, 3, м. Одеса, 65082 Україна) orcid.org/0000-0003-4578-7858. E-mail: eksvar@ukr.net

Книш Іван Михайлович – аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", (проспект Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна), orcid.org/ 0000-0002-4064-2679. E-mail: krempromziz@ukr.net

Cheberiachko Serhii – Doctor of Technical Science (D.Sc.), Professor, the Department of Labour Protection and Civil Safety, National Technical University "Dnipro Polytechnic" (19, av. D. Yavornytskoho, Dnipro, 49005, Ukraine), orcid.org/0000-0003-3281-7157. E-mail: sicheb@ukr.net

Hrydiaiev Volodymyr – graduate student, the Department of Labour Protection and Civil Safety, National Technical University "Dnipro Polytechnic" (19, av. D. Yavornytskoho, Dnipro, 49005, Ukraine), orcid.org/ 0000-0001-7767-4490 E-mail: Vladimir493@ukr.net

Ennan Alim – Doctor of Technical Science (D.Sc.), Professor, Head of Physical-Chemical Institute for Environment and Human Physical-Chemical Institute for Environment and Human Protection (Preobrazhenska St., 3, Odesa, 65125, Ukraine), orcid.org/0000-0003-4578-7858 E-mail: eksvar@ukr.net

Cheberiachko Yurii – Doctor of Technical Science (D.Sc.), Professor, the Department of Labour Protection and Civil Safety, National Technical University "Dnipro Polytechnic" (19, av. D. Yavornytskoho, Dnipro, 49005, Ukraine), orcid.org/orcid.org/ 0000-0001-7307-1553. E-mail: cheberiachkoyi@ukr.net

Abramova Nataliia – Head of the Department of Theoretical bases of development of personal protective equipment, Physicochemical Institute of Environmental and Human Protection of the Ministry of Education and Science of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine (Preobrazhenska St., 3, Odesa, 65082, Ukraine) orcid.org/0000-0003- 4578-7858. E-mail: eksvar@ukr.net

Knysh Ivan – graduate student, Department of Labour Protection and Civil Safety, National Technical University "Dnipro Polytechnic" (19, av. D. Yavornytskoho, Dnipro, 49005, Ukraine), orcid.org/ 0000-0002-4064-2679. E-mail: krempromziz@ukr.net

УДК 351.074:614.02

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-228-238](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-228-238)**О.О. Яворська, Д.І. Радчук, А.В. Яворський, Д.О. Лантух, Є.І. Сосулев****ВПЛИВ ПАНДЕМІЇ COVID-19 НА БЕЗПЕКОВУ СТІЙКІСТЬ ПІДПРИЄМСТВ**

Мета. Удосконалити систему керування професійними ризиками для підвищення безпекової стійкості підприємства у надзвичайних ситуаціях.

Методика. Для вирішення поставленої задачі скористаємось теорією системної динаміки на основі якої, збудована динамічна модель Расмуссена, що описує «рух/дрейф» промислового підприємства до виникнення надзвичайної ситуації під дією трьох основних зовнішніх факторів: економічного, соціального та технологічного.

Результати. Запропоновано удосконалити систему керування професійними ризиками для моніторингу та запобігання виникненню захворювання на COVID-19, яка передбачає обґрунтування відповідних заходів у економічній, соціальній і технологічній сферах підприємства у відповідності до визначених можливостей і існуючих обмежень. Розглянуті два сценарії розвитку подій при настанні пандемії, окреслені сильні і слабкі сторони кожного з них та можливі наслідки для підприємства, які дозволили розробити алгоритми з оцінки ризиків і можливостей підприємств, які стикнулися з пандемією. Запропоновані рекомендації для посилення економічної стабільності підприємства та збільшення його безпекової стійкості.

Наукова новизна. Визначено вплив на безпекову стабільність появи пандемії, що дозволило встановити обмеження для зовнішніх факторів, які дозволяють зменшити ризик виникнення надзвичайної ситуації.

Практичне значення. Розроблені рекомендації щодо зменшення впливу пандемії на безпекову стійкість підприємства.

Ключові слова: ризик, можливість, COVID-19, стійкість, безпека.

Вступ. Світ швидко змінюється, тому потрібно вміти передбачити вплив новітніх технологій та інновацій, а особливо загроз, які пов'язані з ними для пошуку дієвих засобів і заходів захисту життя і здоров'я людини (працівника) на підприємстві. Всім відоме твердження, що людське життя є найбільшою цінністю в державі, що вимагає значних зусиль на кожному її ієрархічному щаблі впровадження відповідних заходів для зменшення негативних впливів від різноманітних природних/антропогенних ризиків. Звідси, важливим питанням, для кожного промислового підприємства, як одного з важливих елементів підтримки функціонування держави, є побудова дієвої системи управління безпекою праці та здоров'ям працівників, яка швидко, на місцевому рівні, буде реагувати на будь-які виклики чи загрози, що впливають на безпекову стійкість. Потреба в розробці такої системи була озвучена, ще Елєтер Ірене Дюпоном в далекому 19 сторіччі [1]. Саме сімейство Дюпонів одними з перших в світі задумались на безпекою, пропонуючи звертати увагу на три базових чинники для стабільного розвитку ефективного бізнесу: безпеку виробництва, якість продукції та фінансові витрати [1]. Скориставшись останніми науковими дослідженнями з оцінки впливу соціально-психологічних факторів на продуктивність праці, поклали безпечну поведінку працівника в основу промислової безпеки на підприємстві, що дозволило розробити одну з передових систем управління безпекою праці, яка актуальна, з певними доповненнями і сьогодення. При чому, весь світ про такий взаємозв'язок почне говорити тільки в середині 20-го сторіччя після розробки науковцем Генріхом свого трикутника пригод та наробок досліджень Береса Фредеріка Скіннера, які опубліковані в його книзі "Наука та поведінка людини" [2].

Яскравим прикладом необхідності побудови ефективної системи управління безпекою праці на промислових підприємствах є поява наслідків "неочікуваної" пандемії COVID-19. Вона, призвела до значних економічних втрат через захворювання, звільнення та зміну звичайного режиму роботи значної кількості працівників, що в

подальшому відобразилось й на зміні звичного способу життя; відпочинку; розриві комунікацій. Крім того, на підприємствах погіршився рівень контролю за виконанням робіт, з'явилися вимушені простой, що також підсилило протікання кризи [3]. Однак, були зафіксовані факти зворотного характеру, коли відбулось збільшення добробуту працівників через можливість швидкої перебудови виробничої діяльності, а головне, зменшення травматизму і рівня захворювання серед персоналу [4]. Звідси виникає цікава й актуальна задача з дослідження основних принципів процесу управління безпекою праці, які дозволили швидко пристосовуватись промисловим підприємствам до нових викликів та загроз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню впливу пандемії на різні аспекти діяльності промислових підприємств присвячено багато різноманітних наукових праць. Зокрема, вивчався вплив на появу нових трендів у глобальній економіці [5]. Науковці звернули увагу на бурхливий розвиток цифрових технологій, що є стратегічним пріоритетом для будь-якого бізнесу – як відповідь на виклики сьогодення. Також будь-які виклики – це перш за все нові можливості, на що звернули автори іншого дослідження, де описали основні причин фінансових втрат та окреслили основні шляхи їх подолання [6]. Однак, нажаль в представлений роботі не було розглянуто безпекові питання та їх роль у забезпеченні економічної стабільності промислового підприємства. Досить цікава робота була проведена авторським колективом Центру прикладних досліджень в якому, на основі глибинних інтерв'ю з власниками та топ-менеджерами українських компаній, було встановлено наслідки епідемії COVID-19 та карантинних заходів для провідних секторів економіки та надані рекомендації для підвищення стійкості компанії, які опинились у складних умовах [7]. На жаль питання безпеки висвітлені у наведеній праці досить поверхового. Здебільшого увага зверталась на кібербезпеку - під час онлайн зустрічей та переговорів між співробітниками, що є доволі проблематично, особливо під час прийняття швидких управлінських рішень. В роботі запропоновано проводити оцінку безпеки з огляду на явні ризики, але далі загального окреслення проблематики мова не пішла. Частково відповідь на поставлене питання надала Всесвітня організація охорони здоров'я, яка рекомендувала запровадити для стримування пандемії, соціальне дистанціювання, використання засобів індивідуального захисту, вакцинацію та інші профілактичні заходи [8]. В той же час, інформації щодо підтримки культури безпеки, яка є основою зменшення втрат в компанії через створення відповідного психологічного клімату, взаємодопомоги, зменшення стресового навантаження на жаль відсутня. Також, як один із заходів захисту від поширення вірусних захворювань застосовувалось призупинення різноманітних неважливих видів виробничої діяльності та робота невеликими групами [9]. Однак, наскільки дана практика є ефективною - не зрозуміло, оскільки існують дослідження, які говорять про збільшення травматизму під час пандемії через підвищення фізичного навантаження на працівників через скорочення груп [10]. Отже, з приведеного аналізу зроблено висновок, що питанням безпеки у контексті зменшення фінансових збитків підприємств, на жаль, приділяють недостатньо уваги, що потребує проведення відповідних досліджень для посилення стабільності розвитку підприємства.

Мета статті (постановка завдання). Удосконалити систему керування професійним ризиками для підвищення безпекової стійкості підприємства у надзвичайних ситуаціях.

Методи дослідження. Для вирішення поставленої задачі скористаємось теорією системної динаміки на основі якої збудована динамічна модель Расмуссена, що описує «рух/дрейф» промислового підприємства до виникнення надзвичайної ситуації під дією трьох основних зовнішніх факторів: економічного, соціального та технологічного.

Виклад основного матеріалу. Підприємство представлено «точкою стійкості», яка розміщена у просторі, який обмежено економічними (A), соціальними (B) та технологічними (C) межами (рис. 1). В основу моделі покладено причинно-наслідкові зв'язки між фінансовими, виробничими та людськими можливостями, які в сукупності дозволяють визначити критерії для розрахунку ризику виникнення надзвичайної ситуації, інциденту чи аварії. Крім того, модель дозволяє оцінити ефективність функціонування системи управління безпекою праці та здоров'ям працівників, як внутрішнього стабілізуючого фактору, який направлений на мінімізацію збитків від зовнішніх впливів на діяльність підприємства. При цьому настання «критичного стану» – перетину однієї з меж, відбувається через постійну зміну внутрішніх параметрів системи [11], що викликано помилками працівників, виходу зі строю обладнання та невідповідним виробничим середовищем. Звідси представимо функцію ризику у вигляді $R=f(X)$, де повний диференціал dR буде мати наступний вигляд:

$$dR = \left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \right) dx_1 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_{i1}} \right) dx_{i1} + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \right) dx_n + \frac{\partial R}{\partial t} dt, \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n;$$

де X – параметри системи.

З урахуванням збитків Z_i підприємства від дії параметрів, які визначають рівень ризику, рівняння (1) можна представити у вигляді:

$$R(t) = f(X, X(Z), Z, t) \quad (2)$$

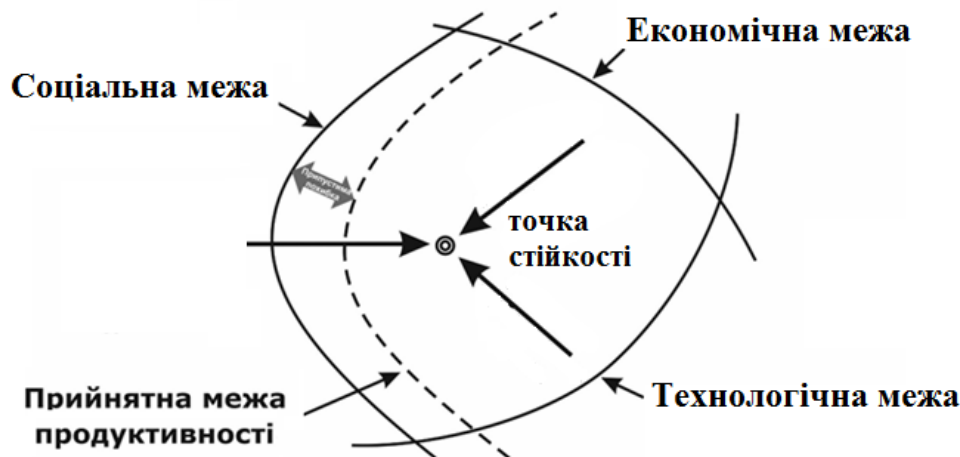


Рисунок 1 – Динамічна модель Расмуссена

Динамічна модель Расмуссена пояснює причини виникнення надзвичайної ситуації через зміщення точки стійкості, яка характеризує соціально-технічний стан промислового підприємства в конкретний момент часу, де X (Z) – параметри системи, які визначають рівень ризику в системі, які потребують фінансових і матеріальних витрат на його зниження; Z – фінансові і матеріальні витрати на управління ризиком.

Так вираз (2) буде мати вигляд для dR :

$$\square dR = \sum_1^n \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} \right) dx_i + \sum_1^m \left(\frac{\partial R}{\partial x_j} \frac{\partial X}{\partial Z_j} \right) dZ_j + \sum_1^l \left(\frac{\partial R}{\partial Z_k} \right) dZ_k + \frac{\partial R}{\partial t} dt, \quad (3)$$

$$i=1,2, \dots, n; j=1,2 \dots, m; k=1,2, \dots, l$$

Коефіцієнт $\frac{\partial R}{\partial Z_k}$ – визначає ефективність застосування фінансових і матеріальних ресурсів, які можуть бути направлені на реалізацію різних запобіжних заходів з управління ризиками в конкретній системі. При цьому умовою для зниження ризику буде вираз:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} \right) \partial x_i + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial R}{\partial x_j} \frac{\partial x}{\partial z_j} \right) \partial z_j + \sum_{k=1}^l \left(\frac{\partial R}{\partial z_k} \right) \partial z_k \gg \frac{\partial R}{\partial t} dt, \quad (4)$$

$$i=1,2, \dots, n; j=1,2 \dots, m; k=1,2, \dots, l \quad \square$$

В даній моделі величину ризику представимо як добуток ймовірності настання небезпечної ситуації P і важкості наслідків від небезпечної ситуації U , що визначаються параметрами, як складовими системи: поточним технологічним станом та процесами управління, так і зовнішнім впливом, які пов'язані з потоками енергії та інформації.

На першому етапі представимо зміну безпекового стану виробничого підприємства на основі принципів системної динаміки під впливом зовнішніх причинно-наслідкових механізмів, які виникають через різні процеси в навколишньому середовищі (рис. 2).

Рахуємо, що бажана робоча точка, яка характеризує відповідний рівень безпеки на підприємстві та дозволяє забезпечити стабільність – знаходиться в середині визначеної області. Однак, через посилення впливу одного з представлених градієнтів: економічного, технологічного чи безпекового, вона буде рухатись у бік однієї із зазначених меж. Точка стійкості, за уявленням Расмуссена, постійно рухається поки не буде знайдено баланс між зовнішніми викликами і внутрішніми можливостями підприємства.

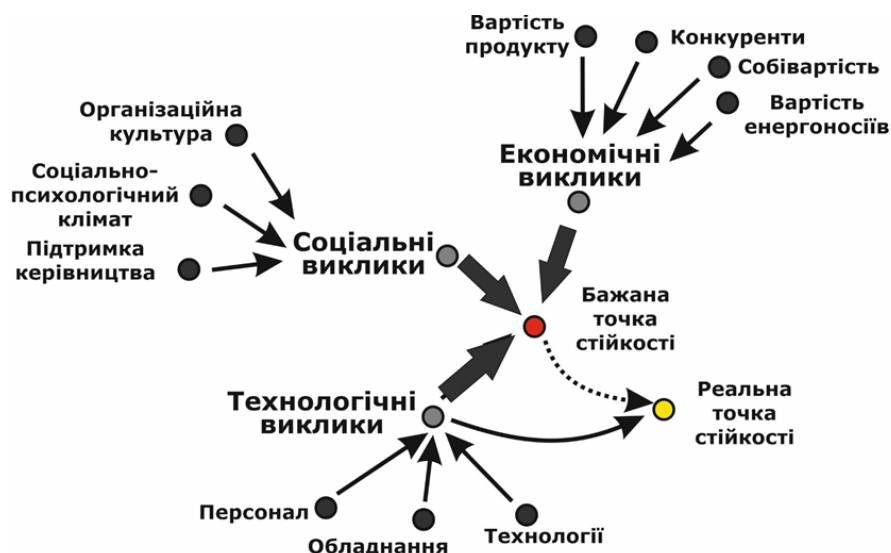


Рисунок 2 – Динамічна модель зміни безпекового стану підприємства

Під час виникнення пандемії на «точку стійкості» значно посилиться дія безпекового градієнту (табл. 1), що викликані карантинними обмеженнями (протиепідемічні заходи, вакцинація, обмеження кількості працівників, застосування

засобів індивідуального захисту та санітайзерів, тощо), а також технологічний – через необхідність перебудови системи взаємодії між співробітниками (дистанціювання, формування невеликих груп, збільшення часових просторів та інше). Все вище описане вплине на розрив певних технологічних і логістичних ланцюгів, що змінить технологію виробництва. Також відбудуться зміни у функціональних можливостях через необхідність реорганізації корпоративної культури взаємодії між працівниками, необхідності перебудови на дистанційний формат. З іншого боку, може виникнути зупинка підприємства на певний період, що відобразиться на економічних показниках, які погіршаться, також необхідністю є фінансова підтримка працівників, особливо, які захворіли.

Таблиця 1 – Оцінка ризику захворювання персоналу COVID-19 на робочому місці

Небезпека	Хто може постраждати?	Ймовірність події	Серйозність наслідків	Ризик	Контрольні заходи
Інфікування COVID-19	Персонал, відвідувачі офісу, підрядники, допоміжний персонал промислових об'єктів.	Висока ймовірність передачі вірусу повітряно-крапельним шляхом у закритих приміщеннях.	Серйозне захворювання органів дихання, погане самопочуття різного ступеня важкості, можлива госпіталізація або смерть. Підвищена тривожність та стрес.	Неприпустимий	Обмеження доступу, бар'єри, маркування, дезінфекція рук та поверхонь, дистанція, провітрювання, вакцинація, запровадження маскового режиму

За *першим сценарієм* – відбувається зростання травматизму працівників під час виконання професійної діяльності через зміну умов звичного способу життя та роботи; розрив комунікацій з керівництвом; відсутність постійного контролю за рівнем безпеки; вимушені простой виробництва; економія фінансування на заходи з безпеки через кризові явища; збільшення уваги на захист від COVID-19; збільшення стресового навантаження та ін. Можна сказати, що вірусна пандемія COVID-19 не принесла чогось кардинально нового в безпеку праці, але загострила існуючі проблеми, які пов'язані з неналежним фінансуванням, формальним виконанням інструкцій з безпеки, небажанню працівників змінювати звичний підхід до виконання виробничих завдань. Так, працівники і раніше відволікались під час виробничого процесу; робили помилки, які призводили до простоїв в роботі; було недофінансування заходів з безпеки праці; послаблювався контроль за станом охорони праці. Однак пандемія звела все вищеперераховане одночасно в одну точку і звісно наслідком стало збільшення травматизму. Для аналізу розвитку негативних подій пропонується удосконалений алгоритм аналізу ризиків (рис. 3), який відрізняється від відомих раніше, а саме врахуванням впливу несприятливих подій від COVID-19 і негативних наслідків за усіма трьома зазначеними факторами.

З іншого боку існує *другий сценарій*, який характеризується посиленням безпекових позицій на промисловому підприємстві за рахунок: всебічного моніторингу за рівнем здоров'я та контролю за власною безпекою під час виконання працівником

виробничих процесів; формуванням невеликих груп працівників, здатних вирішувати поставлені виробничі завдання; розвиток і швидке запровадження нових цифрових технологій у всіх сферах діяльності промислового підприємства; оперативне прийняття управлінських рішень; запровадження дистанційного навчання; використання часових просторів – як часу, для відпочинку та усвідомлення нових можливостей.

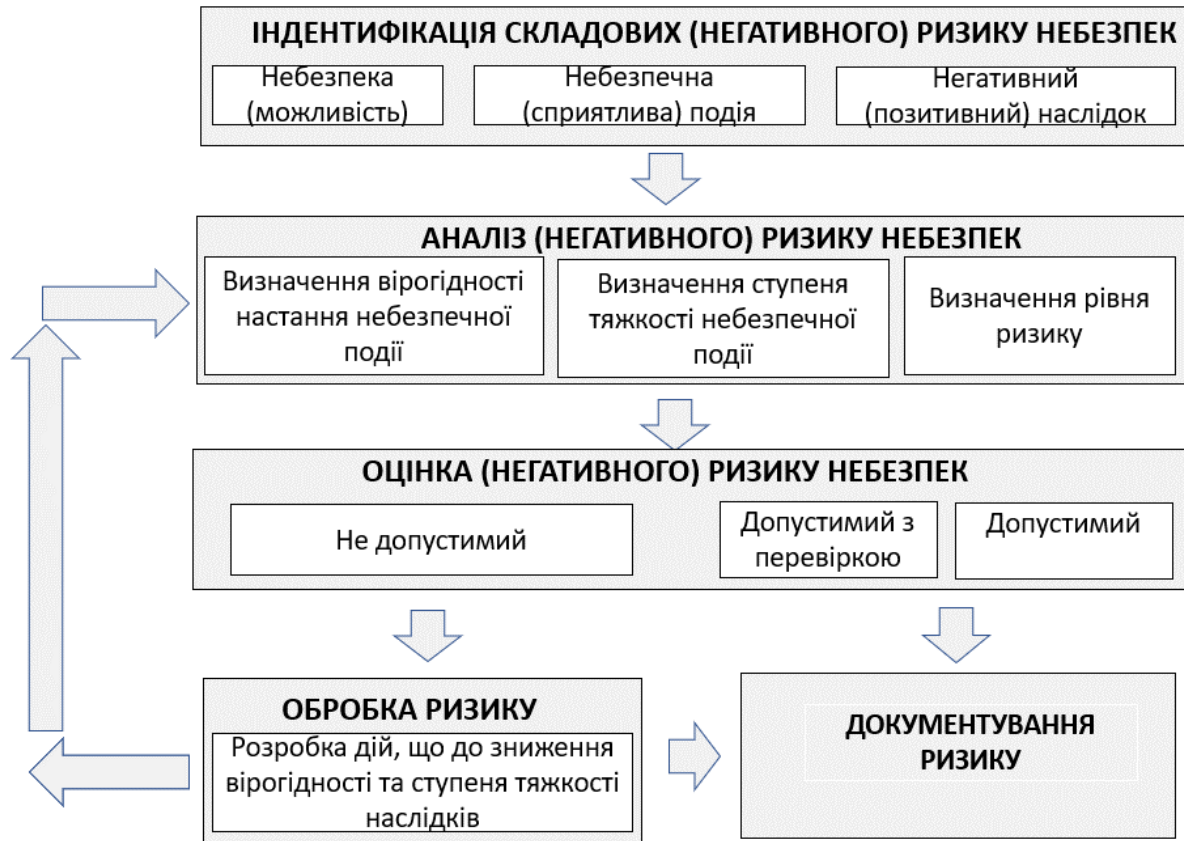


Рисунок 3 – Процес керування (негативними) ризиками небезпек

Насамперед, величину ризику визначаємо завдяки виділенню спеціальних зон на основі залежності ступеня тяжкості від вірогідності настання небажаної події (рис. 4).

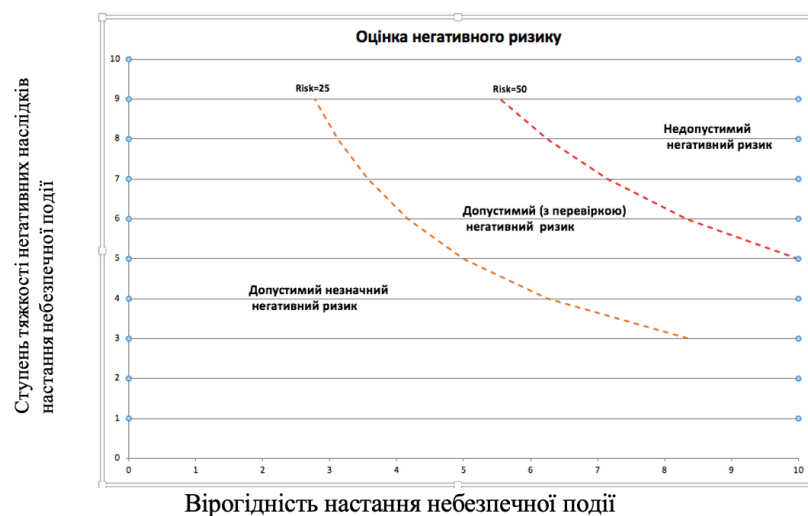


Рисунок 4 – Графічне представлення оцінки (негативного) ризику небезпек

Це дозволило запропонувати новий удосконалений алгоритм керування ризиками, який передбачає вплив пандемії на зовнішні фактори, що визначають відповідні межі (рис. 5).



Рисунок 5 – Процес керування можливостями, які зменшують негативний вплив від COVID-19

Як, бачимо з рис. 4 маємо в системі управління можливості, які мають певну ймовірність переходу в сприятливу подію в результаті чого ми будемо мати певні позитивні наслідки. Позачерговим завданням є збільшити вірогідність настання сприятливої події та позитивних наслідків, і як результат – покращити позитивний ризик.

Головною рисою, яка об'єднує більшість успішних промислових підприємств у всьому світі, що дозволило пережити кризу – є побудова чесних відношень з працівниками на основі відкритості та довіри. Для цього на деяких промислових підприємствах запроваджувались постійні зустрічі з працівниками, де обговорювалися проблеми та ризики, які пов'язані з пандемією. На інших підприємствах, керівництво намагалось почути співробітників через постійний діалог. Деякі підприємства мінімізували дистанцію для налагодження комунікацій. Загалом для всіх було характерно піклування про добробут робітника. Так, "National Institute for Occupational Safety & Health" ("NIOSH", USA) в цьому році опублікував рекомендації для підвищення стійкості промислових підприємств на основі аналізу безпеки працівників. Зокрема, менеджментом промислового підприємства зверталася особлива увага на: оцінку роботи та досвід; політику заходів з безпеки праці та культури на робочому місці; фізичне середовище робочого місця та безпечний внутрішній виробничий клімат; стан здоров'я та рівень фінансового забезпечення сім'ї працівника. Вивчення цих

питань допоможе роботодавцям проводити моніторинг змін у добробуті працівників у зв'язку з економічними умовами, суспільними тенденціями або зміною державної чи організаційної політики для прийняття відповідних рішень.

Обговорення результатів. Проаналізувавши наведені сценарії розвитку ситуації щодо управління ризиками - важливим завданням є визначення безпечних меж в зонах, за якими буде рухатися підприємство. Найбільш доречним запобіжним заходом у даному випадку є інженерний контроль за розповсюдженням небезпек, який дозволяє зменшити контакти працівників один з одним, тим самим розірвати ланцюг передачі COVID-19. До заходів можна віднести: різноманітні захисні екрани, системи вентиляції з фільтруванням повітря, системи очищення та дезінфекції повітря тощо (ультрафіолетові лампи).

Наступним важливим елементом захисту персоналу є забезпечення ефективної роботи системи штучної вентиляції. Найбільш ефективною рахується комбінована вентиляція – з повітрообміном знизу-вверх. В даному випадку чисте повітря, потрапляючи в приміщення повністю витісняє забруднене, зменшуючи концентрацію небезпечних вірусів та аерозолів. Ефективність даної схеми неодноразово доведена експериментальними дослідженнями при розповсюдженні вірусних захворювань в приміщенні, що пояснюється як низькою інерційністю аерозолів, так і потужними тепловими конвекційними потоками. Нажаль, під час використання інших схем повітрообміну відбувається перемішування потоків повітря, що призводить до збільшення кількості інфікованих. Інша складова безпеки систем вентиляції, на яку необхідно постійно звертати увагу – це ефективність очищення повітря, що забезпечується використанням якісних фільтрів та періодичною їх заміною. Найбільш доцільним варіантом є - фільтри *HEPA* (*High Efficiency Particulate Air*). Вони характеризуються високим коефіцієнтом захисту, який дорівнює 99,95% для частинок діаметром 0,3 мкм. В якості альтернативи можна розглянути також електростатичні фільтри *ESP* (*Electrostatic Filters*). Хоча захисна ефективність у них нижча, ніж у фільтрах *HEPA* і складає близько 70 % все ж таки вони характеризуються значною пропускною здатністю і низьким опором повітряного потоку.

Інженерні заходи доречно поєднувати з адміністративними, які в повній мірі наведені в рекомендаціях ВООЗ, а саме:

- розробка і розміщення інформаційних плакатів, які вказують на небезпеку вірусної хвороби, шляхів розповсюдження, способів захисту (гігієни рук, використання ЗІЗ, змінний одяг та інше), а також заохочення працівників залишатись вдома у випадку появи ознак хвороби;

- забезпечення працівників спеціальними дезінфікуючими засобами, які розміщені поблизу робочих місць та постійним інформуванням про необхідність гігієни руки;

- розташування одноразових серветок біля місць, які часто використовуються (наприклад: дверні ручки, клавіатури, пульти дистанційного керування), щоб працівники могли їх протирати перед кожним використанням;

- надання співробітникам засобів індивідуального захисту, та спеціальних контейнерів для їх утилізації у разі необхідності;

- організація перевірок та виявлення ще на початку у працівників ознак захворювання (легкий кашель, підвищення температури тіла), які повинні бути відправлені до дому;

- розробка гнучкого графіку роботи співробітників, щоб мінімізувати їх скупчення в одному місці;

- передбачати (без дискримінації) обмеження спілкування та знаходження у місцях скупчення працівників для яких захворювання складає найбільш високий ризик,

а саме наявність в них діабету, серцевих та легеневих захворювань; також у зоні ризику перебувають працівники похилого віку.

Висновок. 1. Запропоновано підхід щодо удосконалення системи управління безпекою праці і здоров'ям працівників за рахунок додавання процедури керування ризиків щодо захворювання на COVID-19, яка передбачає обґрунтування відповідних заходів у економічній, соціальній і технологічній сферах підприємства у відповідності до визначених можливостей і обмежень.

2. Розглянуті *два сценарії* розвитку подій при настанні пандемії, окреслені сильні та слабкі сторони, кожного з них та можливі наслідки для підприємства, які дозволили розробити алгоритми з оцінки ризиків і можливостей підприємств, що зіткнулися з пандемією.

3. Запропоновано рекомендації для посилення економічної стабільності підприємства та збільшення безпекової стійкості при пандемії, що дозволить встановити обмеження для зовнішніх факторів, які дозволяють уникнути виникнення надзвичайної ситуації.

4. Встановлено, що до зменшення травматизму призвело швидке переорієнтування компаній на роботу в невеликих робочих групах, соціальне дистанціювання, підтримка добробуту працівників, відвертий діалог на всіх рівнях управління компанією.

Список літератури

1. Giudici, R., Lancioni, A., Gay, H. *et al.* (2021). Impact of the COVID-19 outbreak on severe trauma trends and healthcare system reassessment in Lombardia, Italy: an analysis from the regional trauma registry. *World Journal of Emergency Surgery*, 16, 39. <https://doi.org/10.1186/s13017-021-00383-y>.
2. Chiba, H., Lewis, M., Benjamin, E.R., Jakob, D.A., Liasidis, P., Wong, M.D., *et al.* (2021). "Safer at Home": the effect of the Covid-19 lockdown on epidemiology, resource utilization and outcomes at a large Urban Trauma Center. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 90, 708-713. <https://doi.org/10.1097/TA.0000000000003061>.
3. Waseem, S., Nayar, S., Hull, P., Carrothers, A., Rawal, J., Chou, D., *et al.* (2021). The global burden of trauma during the COVID-19 pandemic: a scoping review. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 12, 200-207. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2020.11.005>.
4. Huang, C., Wang, Y., Li, X., Ren, L., Zhao, J., Hu, Y., *et al.* (2020). Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *The Lancet*, 395, 497-506. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30183-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30183-5).
5. Дергачова, В.В., Голук, В.Я. (2020). Сучасні тренди розвитку інновацій у вимірі глобальної економіки. І Міжнародна науково-практична конференція «Бізнес, інновації, менеджмент: проблеми та перспективи» / Секція 2. Менеджмент міжнародного бізнесу в умовах глобалізації, 30-31.03.2021, м. Київ, Україна, С. 112-113.
6. Водянка, Л.Д., Тодорюк, С.І., Тодоріко, І.М. (2021). Вплив пандемії COVID-19 на стан ринку праці в Україні та світі. *Економіка та держава*, 10, 74-79. <https://doi.org/10.32702/2306-6806.2021.10.74>.
7. Давимука, О., Денков, Д., Каракуц, А., Щедрін, Ю. Наслідки епідемії COVID-19 та карантинних заходів для провідних секторів економіки України. Дослідження за результатами глибинних інтерв'ю з власниками та топ-менеджерами українських компаній. – Київ - Харків: Видавець О.А. Мірошніченко, 2020. - 188 с. ISBN 978-617-7618-49-1.
8. WHO. World Health Organization. *WHO Director-General's Opening Remarks at the Media Briefing on COVID-19-11 March 2020*. (2020). Available online at: www.who.int/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19-11-march-2020.
9. Gielen, A.C., Bachman, G., Badaki-Makun, O. *et al.* (2020). National survey of home injuries during the time of COVID-19: who is at risk? *Injury Epidemiology*, 7, 63. <https://doi.org/10.1186/s40621-020-00291-w>.
10. Hakeem, F.F., Alshahrani, S.M., Ghobain, M.A., Albabtain, I., Aldibasi, O., Alghnam, S. (2021) The Impact of COVID-19 Lockdown on Injuries in Saudi Arabia: Results From a Level-I Trauma Center. *Front. Public Health*, 9, 704294. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.704294>.
11. Ladyman, J., James, L., Karoline, W. (2013). What Is A Complex System? *European Journal for Philosophy of Science*, 3(1), 33-67. <https://doi.org/10.1007/s13194-012-0056-8>.

References

1. Giudici, R., Lancioni, A., Gay, H. *et al.* (2021). Impact of the COVID-19 outbreak on severe trauma trends and healthcare system reassessment in Lombardia, Italy: an analysis from the regional trauma registry. *World Journal of Emergency Surgery*, 16, 39. <https://doi.org/10.1186/s13017-021-00383-y>.
2. Chiba, H., Lewis, M., Benjamin, E.R., Jakob, D.A., Liasidis, P., Wong, M.D., *et al.* (2021). "Safer at Home": the effect of the Covid-19 lockdown on epidemiology, resource utilization and outcomes at a large Urban Trauma Center. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 90, 708-713. <https://doi.org/10.1097/TA.0000000000003061>.
3. Waseem, S., Nayar, S., Hull, P., Carrothers, A., Rawal, J., Chou, D., *et al.* (2021). The global burden of trauma during the COVID-19 pandemic: a scoping review. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 12, 200-207. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2020.11.005>.
4. Huang, C., Wang, Y., Li, X., Ren, L., Zhao, J., Hu, Y., *et al.* (2020). Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *The Lancet*, 395, 497-506. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30183-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30183-5).
5. Dergacheva, V.V., Golyuk, V.Ya. (2020). Modern trends in the development of innovations in the dimension of the global economy. 1st International Scientific and Practical Conference "Business, Innovations, Management: Problems and Prospects" / Section 2. Management of international business in conditions of globalization, 30-31.03.2021, Kyiv, Ukraine, pp. 112-113.
6. Vodianka, L.D., Todoruk, S.I., Todoriko, I.M. (2021). Impact of the COVID-19 pandemic on the state of the labor market in Ukraine and the world. *Economy and the State*, 10, 74-79. <https://doi.org/10.32702/2306-6806.2021.10.74>.
7. Davymuka, O., Denkov, D., Karakuts, A. Shchedrin, Yu. Consequences of the COVID-19 epidemic and quarantine measures for the leading sectors of the economy of Ukraine. Research based on the results of in-depth interviews with owners and top managers of Ukrainian companies. – Kyiv - Kharkiv: Publisher O.A. Miroshnychenko, 2020. - 188 p. ISBN 978-617-7618-49-1.
8. WHO. World Health Organization. *WHO Director-General's Opening Remarks at the Media Briefing on COVID-19-11 March 2020*. (2020). Available online at: www.who.int/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19—11-march-2020.
9. Gielen, A.C., Bachman, G., Badaki-Makun, O. *et al.* (2020). National survey of home injuries during the time of COVID-19: who is at risk? *Injury Epidemiology*, 7, 63. <https://doi.org/10.1186/s40621-020-00291-w>.
10. Hakeem, F.F., Alshahrani, S.M., Ghobain, M.A., Albabtain, I., Aldibasi, O. Alghnam, S. (2021) The Impact of COVID-19 Lockdown on Injuries in Saudi Arabia: Results From a Level-I Trauma Center. *Front. Public Health*, 9, 704294. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.704294>.
11. Ladyman, J., James, L., Karoline, W. (2013). What Is A Complex System? *European Journal for Philosophy of Science*, 3(1), 33-67. <https://doi.org/10.1007/s13194-012-0056-8>.

Надійшла до редакції 25.10.2022

O. Yavorska, D. Radchuk, A. Yavorskyi, D. Lantukh, Ye. Sosuliev

IMPACT OF COVID-19 PANDEMIC ON THE SECURITY STABILITY OF ENTERPRISES

Purpose. To improve the occupational risk management system to increase the security stability of the enterprise in emergency situations.

Methodology. The theory of system dynamics on the basis of which a dynamic Rasmussen model is built, describing the "movement/drift" of an industrial enterprise before an emergency occurs under the influence of three main external factors: economic, social and technological.

Research results. It has been proposed to improve the occupational risk management system for monitoring and preventing the occurrence of COVID-19, which provides for the justification of appropriate measures in the economic, social and technological spheres of the enterprise in accordance with the identified opportunities and existing constraints. Two scenarios for the development of events in the conditions of pandemic have been considered, the strengths and weaknesses of each of them and possible consequences for the enterprise have been outlined, which allowed to develop the algorithms for assessing the risks and opportunities of enterprises facing the pandemic. Recommendations to strengthen the economic stability of the enterprise and increase the stability of its security have been made.

Scientific novelty. The impact on the security stability of the pandemic has been determined, which made it possible to set the limits for external factors that reduce the risk of emergency.

Practical significance. Recommendations have been developed to reduce the impact of the pandemic on the security stability of the enterprise.

Keywords: risk, opportunity, COVID-19, sustainability, security.

Відомості про авторів

Яворська Олена Олександрівна, кандидат технічних наук, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки Національний технічний університет „Дніпровська політехніка“, м. Дніпро, Україна; yavorska.o.o@nmu.one

Радчук Дмитро Ігорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки Національний технічний університет „Дніпровська політехніка“, м. Дніпро, Україна; radchuk.d.i@nmu.one

Яворський Андрій Васильович, кандидат технічних наук, доцент кафедри гірничої інженерії та освіти, Національний технічний університет „Дніпровська політехніка“, м. Дніпро, Україна; yavorskyandrey@gmail.com

Лантух Дмитро Олександрович, аспірант, асистент кафедри охорони праці та цивільної безпеки Національний технічний університет „Дніпровська політехніка“, м. Дніпро, Україна; lantukh.dmy.o@nmu.one

Сосулев Єгор Ігорович, аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки Національний технічний університет „Дніпровська політехніка“, м. Дніпро, Україна; sosuliev.ye.i@nmu.one

Yavorska Olena, Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Labor Safety and Civil Security, Dnipro University of Technology; yavorska.o.o@nmu.one

Radchuk Dmytro, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Labor Safety and Civil Security, Dnipro University of Technology; radchuk.d.i@nmu.one

Yavorskyi Andrii, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mining Engineering and Education, Dnipro University of Technology; yavorskyandrey@gmail.com

Lantukh Dmytro, Postgraduate student, Assistant Professor, Department of Labor Safety and Civil Security, Dnipro University of Technology; lantukh.dmy.o@nmu.one

Sosuliev Yehor, Postgraduate student, Department of Labor Safety and Civil Security, Dnipro University of Technology; sosuliev.ye.i@nmu.one

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**Науковий вісник
Донецького національного технічного університету**

1(8)-2(9)'2022

(українською, англійською мовами)

Технічний редактор *А.В. Петренко*

Формат 60x84/8. Ум. друк. арк. 16,6.
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