DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2021-5-93-32>

УДК 622.817(571.17)

Крупка Я.А.

Одеський науково-дослідний інститут судових експертиз

Зав'ялова О.Л.

Донецький національний технічний університет

Костенко Т.В.

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

Національного університету цивільного захисту України

ЛІКВІДАЦІЯ НАСЛІДКІВ ВИБУХІВ МЕТАНОПИЛОПОВІТРЯНИХ СУМІШЕЙ, УСКЛАДНЕНИХ ПОЖЕЖАМИ

Анотація. Метою статті є вдосконалення тактики ліквідації наслідків вибухів газопилових сумішей, ускладнених екзогенними пожежами, в гірничих виробках вугільних шахт, що дозволить своєчасно і в повній мірі забезпечити порятунок застряглих людей, підвищити безпеку роботи гірничих рятувальників при ліквідації наслідків цих аварій, зменшити економічні збитки підприємств. Наукова новизна роботи полягає у розв'язанні науково-прикладної задачі вдосконалення тактики (технології) ліквідації наслідків вибухів газопилових сумішей, ускладнених екзогенними пожежами, в гірничих виробках вугільних шахт, що дозволить своєчасно і в повній мірі забезпечити порятунок застряглих людей, підвищити безпеку роботи гірничих рятувальників при ліквідації наслідків цих аварій, зменшити економічні збитки підприємств, які пов'язані із втратою техніки, гірничих виробок і запасів вугілля, що підготовлені до виїмки, в виїмкових полях, що інтенсивно відпрацьовуються, великих аварійних збитків, які пов'язані із простоями лав або несвоєчасною підготовкою фронту очисних робіт.

Ключові слова: аварія, вибух; газопилова суміш, гірничі рятувальники, пожежа, вугільна шахта.

Krupka Yaroslav

Odessa Research Institute of Forensic Examinations

Zavialova Olena

Donetsk National Technical University

Kostenko Tetiana

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl

Heroes of National University of Civil Defense of Ukraine

ELIMINATION OF THE CONSEQUENCES OF EXPLOSIONS OF METHANO-DUST AIR MIXTURES COMPLICATED BY FIRE

Summary. The purpose of the article is to improve the tactics of liquidation of explosions of gas-dust mixtures complicated by exogenous fires in the mine workings of coal mines, which will allow timely and full rescue of trapped people, increase safety of rescuers in the aftermath of these accidents, reduce economic costs. During the research, to solve the tasks, the complex used general and special methods, in particular: methods of induction (at the stage of collecting, systematizing and processing information for research) and deduction (in the process of theoretical understanding of the problem), system-analytical, comparative analyzes, method of analysis of definitions, etc. The practical significance of the obtained results is to create new ways to localize and eliminate the consequences of explosions of gas-dust mixtures complicated by exogenous fires in the mine workings of coal mines, which will timely and fully ensure the rescue of trapped people, increase safety of rescue workers, reduce economic losses of enterprises. The scientific novelty of the work is to solve the scientific and applied problem of improving tactics (technology) to eliminate the consequences of explosions of gas-dust mixtures complicated by exogenous fires in the mine workings of coal mines, which will timely and fully ensure the rescue of trapped people. in the aftermath of these accidents, reduce the economic losses of enterprises associated with the loss of equipment, mine workings and coal reserves prepared for excavation, in the excavation fields, intensively worked out, large emergency losses associated with lava downtime or untimely preparation of the front of treatment works. It is established that in the elimination of the consequences of explosions of gas-dust mixtures complicated by exogenous fires in the mine workings of coal mines, safe and efficient localization of fire, as well as cooling of fire gases can be carried out by creating a "explosion" of collapsed rocks emergency production. The dynamics of cooling of fire gases in the "rock" plug is described by a mathematical model of the process of movement of heated air in a porous medium in two-dimensional and one-dimensional formulation. Improving tactics to eliminate the consequences of explosions of gas-dust mixtures complicated by exogenous fires in the mine workings of coal mines will allow timely and full rescue of trapped people, increase the safety of rescuers in the aftermath of these accidents, reduce economic losses. machines, mechanisms, equipment, mine workings and coal reserves prepared for excavation, in excavation fields that are intensively worked out, large emergency losses associated with lava downtime or untimely preparation of the front of treatment works. To numerically solve the obtained system of differential equations and determine the parameters of the zone of the rock plug in the products it is necessary to continue the experimental study of the porosity of the plug material, as well as to develop an algorithm and PC calculation program for these parameters.

Keywords: accident, explosion; gas-dust mixture, mountain rescuers, fire, coal mine.

Постановка проблеми. На вугільних шахтах проводять роботи підвищеної небезпеки (вибухонебезпечні, пожежно-небезпечні, небезпечні за обваленнями виробок та гірничих порід, раптовими проривами рудникових газів, вугілля, порід, води тощо). Ці роботи проходять в умовах непередбаченості, раптової зміни гірничо-геологічних умов або природних сил, при недотриманні вимог нормативно-правових актів з охорони праці з боку персоналу підприємств та можуть спричинити тяжкі наслідки, які супроводжуються численними жертвами та матеріальними збитками. З переходом гірничих робіт вугільних шахт на глибокі горизонти зростає негативний вплив підвищених гірничого тиску, температури вміщаючих порід, газорясності та інших факторів [1].

Одними з найбільш небезпечних видів аварій є вибухи газопилових сумішей (далі – вибухи) в гірничих виробках вугільних шахт. При вибухах в підземних умовах вугільних шахт виникають такі вражаючі фактори: фронт повітряної ударної хвилі (рухома по гірничій виробці зона миттєвої зміни (збільшення) тиску, щільності і температури середовища); високотемпературний фронт полум'я (рухома по гірничій виробці зона хімічної реакції і нагрітих газів); отруйні та шкідливі продукти горіння (CO , CO_2 , CH_4 , N_2 , H_2S тощо), недостатня кількість кисню у повітрі робочої зони, що призводить до численних людських жертв, значних матеріальних збитків для підприємств. Найбільш небезпечними є вибухи, ускладнені екзогенними пожежами. При ліквідації цих пожеж є загроза повторних вибухів, обрушення кріплення гірничих виробок. Тому перед вченими стоїть задача вдосконалення тактики ліквідації наслідків вибухів, ускладнених пожежами, в гірничих виробках вугільних шахт, що дозволить своєчасно і в повній мірі підвищити безпеку гірничих рятувальників при ліквідації наслідків цих аварій, зменшити економічні збитки підприємств [2; 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фундаментальні дослідження в галузі фізики і механіки вибуху представлені в роботах Баракова А. А., Ландау Л. Д., Зельдовича Я. Б., Християновича С. А., Садовського М. А. та ін. та послужили основою створення теорії формування, поширення і локалізації вибухів метанопило-повітряних сумішей у вугільних шахтах. Істотний внесок у розвиток цієї теорії, встановлення умов утворення вибухонебезпечного середовища, а також створення способів і технічних засобів ведення гірничорятувальних робіт внесли Балтайтис В. Я., Бусигін К. К., Бобров А. І., Грядущий Б. А., Доценко В. Ф., Зрелий М. Д., Макаренко В. Л., Маркович Ю. М., Скочинський А. А., Соболев Г. Г., Чарков В. П., Чеховських О. М. та ін. Подальший розвиток питання вибухопридушення та ліквідації пожеж у вугільних шахтах отримали у роботах Болбата І. Ю., Грекова С. П., Гусара Г. А., Зінченко І. М., Кудінова Ю. В., Морева О. М., Осипова С. М. та ін. [4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Основними причинами розвитку і ускладнень вибухів є порушення кріплення та обвалення порід у рудничних виробках, порушення вентиляційних споруд і режи-

му провітрювання аварійних ділянок, повторні вибухи, виникнення екзогенних пожеж, заха-ращення виробок машинами та механізмами, устаткуванням, елементами кріплення, породою тощо. Але питаннями дослідження цих явищ, розвитку тактики ліквідації наслідків вибухів газопилових сумішей, ускладнених екзогенними пожежами, в гірничих виробках вугільних шахт, в останні роки, практично вчені не займалися. Тому дані знання потребують оновлення.

Формулювання цілей статті. Мета статті – вдосконалення тактики ліквідації наслідків вибухів газопилових сумішей, ускладнених екзогенними пожежами, в гірничих виробках вугільних шахт, що дозволить своєчасно і в повній мірі забезпечити порятунок застраждалих людей, підвищити безпеку роботи гірничих рятувальників при ліквідації наслідків цих аварій, зменшити економічні збитки підприємств.

Методологічною основою досліджень роботи є загальні закони та категорії теорії пізнання, зокрема, положення матеріалістичної діалектики, які сприяли розумінню об'єкта, предмета, мети і завдань дослідження у контексті взаємообумовленості здобутків і потреб практики. Методи формальної логіки (аналіз, синтез, дедукція, індукція, аналогія, абстрагування) надали змогу детальніше усвідомити зміст досліджуваних питань роботи. Під час проведення досліджень, для розв'язання поставлених задач, в комплексі застосовувалися загальнонаукові та спеціальні методи, зокрема: методи індукції (на етапі збору, систематизації і обробки інформації для проведення досліджень) та дедукції (у процесі теоретичного осмислення проблеми), системно-аналітичний, порівняльний аналізи, метод аналізу визначень тощо.

Виклад основного матеріалу дослідження. Ліквідації наслідків вибухів газопилових сумішей, ускладнених екзогенними пожежами, в гірничих виробках вугільних шахт, пов'язана з небезпекою для гірничих рятувальників, великими трудовитратами гірничорятувальних частин та економічними збитками для підприємств.

Для локалізації екзогенних пожеж на вихідному струмені повітря, як правило, використовуються завіса з водорозпушенням. Нами пропонується принципово нове рішення. На шляху руху пожежі пропонується утворювати породну пробку методом вибухового обрушення дезінтегрованого гірничого масиву.

При відпрацюванні пологих пластів з керуванням покрівлі повною руйнацією, замість ізолюючих перемичок, що локалізують пожежу у виробленому просторі, можна використовувати обрушені породи [5]. Вирішивши завдання фільтрації і теплопередачі підземних газів [6], можна визначити необхідний обсяг зруйнованих порід і максимальні розміри шматків, які забезпечують найбільш інтенсивне охолодження пожежних газів. Розроблено розрахункові методи прогнозування дроблення порід вибухівкою і визначення максимального розміру шматків при її відбійці [7...9]. Встановлена функціональна залежність між гранулометричним складом підірваного матеріалу і відстанню між свердловинами та їх діаметром.

Домогтися створення породної пробки можна й іншим шляхом – руйнуванням кріплення

гірничій виробки. Після установки на вузлах аркового кріплення накладних зарядів з кумулятивним ефектом досягається їх руйнування. Кількість секцій, що підлягають руйнуванню, визначається розрахунками, виходячи з необхідного обсягу зруйнованої породи.

Математична модель придушення негативних факторів, що виникають при пожежах, повинна відповісти на питання:

які повинні бути розміри області в породах покрівлі виробки, в яку закладається вибухівка, щоб шматки зруйнованого масиву заповнили нижчерозташований обсяг виробки і саму порушену область?

яка повинна бути довжина штучно створеної у виробці пористого середовища, щоб знизити до безпечних значень величину швидкості руху повітря у виробках та його температуру?

З огляду на симетричність конфігурації перпендикулярного перетину підземних виробок щодо площини ZOX (рис. 1) фізичні параметри завдання усереднюються по ширині виробки.

На рис. 1 заштрихований перетин А в площині області, яку підривають, відповідної перетину ОВСД, яке повинно бути заповнене пористим середовищем. Для цього необхідно виконання умови:

$$m = \frac{h_1}{h_1 + h_2}, \quad (1)$$

де m – пористість обрушеного штучного масиву; h_1 – висота виробки, м; h_2 – висота об'єкта, який обрушується, в покрівлі виробки, м.

Пористість m обрушеного штучного масиву залежить від міцності порід, розташування шпурів і кількості вибухівки в кожному з них.

Цей параметр, як і середній розмір шматків породи, необхідно визначити в експериментальних дослідженнях. Висоту об'єкта, який обрушується, в покрівлі виробки знаходимо, використовуючи формулу (2):

$$h_2 = \frac{h_1(1-m)}{m}. \quad (2)$$

Обчислення цього параметра безпосередньо залежить від результатів експериментів по визначенню пористості m .

Другий з визначених в даних дослідженнях параметрів – це довжина штучно створеної у виробці пористого середовища. Вона відповідає довжині сторони ВС заштрихованої області А (рис. 1) і позначена через a .

Розрахунок величини a пов'язаний з визначенням динаміки швидкості фільтрації повітря і його температури в пористому середовищі. Нагріте під час пожежі повітря на великій швидкості проникає в пористе середовище. При цьому величина a вибирається такою, щоб на виході з пористого середовища температура і швидкість повітря мала бути безпечною для людей по ходу вентиляційного струменя, або значення швидкості повітря і його температури на виході з пористого середовища не могли сприяти рецидиву пожежі, повторного вибуху газопилової суміші на аварійній дільниці.

Розглянемо дослідження процесу руху нагрітого повітря в пористому середовищі. Щоб вивчити рух у виробці нагрітого при пожежі повітря, необхідно для області АВСД (рис. 2) скласти рівняння фільтрації повітря, стану, нерозривності

Рис. 1. Вибір системи координат для вирішення завдання руху нагрітого рудничного повітря через штучне пористе середовище

Рис. 2. Схема пористого середовища, штучно створеного в гірничій виробці

та енергії. Спільне рішення цих рівнянь дозволить визначити такі параметри, як швидкість руху повітря, його тиск, щільність і температуру. При високих температурах повітря на вході в пористе середовище і швидкому прогріванні пористого середовища необхідно в систему рівнянь ввести рівняння для визначення зміни температури шматків породи, обрушеної під час вибуху. Однак попередні дослідження [10] показали, що пористе середовище дуже інертне по відношенню до прогріву шматків породи гарячим повітрям, і таке рівняння вводити не потрібно.

Спочатку вищевказані рівняння випишемо для двовимірної області ОВСД (рис. 2). Якщо в контрольних розрахунках параметрів цієї математичної моделі виявиться, що величина $BC = a$ набагато більше висоти виробки $OB = h_2$, то систему диференціальних рівнянь можна істотно спростити, переходячи до одновимірної моделі.

У двовимірній постановці система диференціальних рівнянь, що описує рух нагрітого повітря в обрушених у виробці штучним вибухом породах, має такий вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{g V_x}{K_\phi}; \\ \frac{\partial V_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{g V_z}{K_a} - g; \\ m \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (V_x \rho)}{\partial x} + \frac{\partial (V_z \rho)}{\partial z} = 0; \\ \rho = \frac{P}{RT}; \\ \rho_n C_n \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \operatorname{divgrad} T - \rho C_p \operatorname{div}(TV) - \frac{K \tau}{h_1 + h_2} (T - T_n), \end{cases} \quad (3)$$

де V_x, V_z – складові швидкості фільтрації повітря, м/с; x, z – просторові координати (рис. 1, 2), м; P – тиск повітря, Па; ρ – щільність повітря, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; K_ϕ – коефіцієнт фільтрації, м/с; T – температура повітря, К; ρ_n – щільність заваленої породи, кг/м³; C_n – питома теплоємність порід, Дж/(кгК); R – газова постійна, Дж/(кгК); λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(мК); C_p – питома теплоємність повітря, Дж/(кгК); t – час, с; $\vec{V}$ – вектор швидкості повітря, м/с; K_τ – коефіцієнт нестационарного теплообміну порід з фільтруємим повітрям, Дж/(м²сК); T_n – температура шматків породи пористого середовища, К.

Система диференціальних рівнянь (3) настільки складна, що отримати аналітичне рішення цієї системи практично неможливо. Тому для отримання чисельного рішення систему рівнянь (3) необхідно перевести в кінцево-різницьку схему, отримати алгоритм розрахунку функцій V_x, V_z, ρ, P та T і скласти програму розрахунку на ЕОМ даних параметрів за вказаним алгоритмом.

Система диференціальних рівнянь (3) складена на підставі досліджень процесів руху повітря в пористих середовищах, наведених в роботах [11...13]. Обумовлені в системі рівнянь параметри V_x, V_z, ρ, P та T є функціями часу і просторових координат. Для спрощення викладок аргументи в написанні функцій не виписані.

Для замикання системи диференціальних рівнянь (3) її необхідно доповнити граничними по контуру АМВСND і початковими умовами. При цьому потрібно виходити з умов такої фізичної моделі, в якій контур МВСN і OD непроникні. Позначимо його через G_1 . Відрізки OM і ND – проникні. Позначимо їх відповідно G_2 і G_3 .

Відповідно до введених обмежень на властивості контуру ОМВСND, граничні і початкові умови мають такий вигляд:

$$\begin{cases} V_x|_{G_2} = V_0; V_z|_{G_2} = 0; T|_{G_2} = T_0; P|_{G_2} = P_n; \\ \rho|_{G_2} = \rho_n; \\ \left. \frac{\partial V_x}{\partial n} \right|_{G_1} = \left. \frac{\partial V_z}{\partial n} \right|_{G_1} = 0; T|_{G_1} = T_n; \left. \frac{\partial P}{\partial n} \right|_{G_1} = 0; \\ \rho|_{G_1} = \frac{P}{RT}|_{G_1}; \\ V_x|_{G_3} = V_1; V_z|_{G_3} = 0; T|_{G_3} = T_k; P|_{G_3} = P_{\text{норм}} + \alpha; \\ \rho|_{G_3} = \frac{P}{RT}|_{G_3}. \end{cases} \quad (4)$$

В області ОМВСND $V_x|_{t=0} = V_z|_{t=0} = 0; P|_{t=0} = P_{\text{норм}}; T|_{t=0} = T_n$,

де V_0 – швидкість руху нагрітого повітря, м/с; $T_{\text{оч}}$ – температура нагрітого при пожежі в виробці повітря, К; P_n – тиск фронту нагрітого повітря, Па; ρ_n – щільність нагрітого повітря перед заслоном у вигляді пористого середовища, Па; n – нормаль до контуру G_1 ; V_1 – швидкість повітря на виході з пористого середовища, м/с; T_k – температура повітря на виході з пористого середовища, К; $P_{\text{норм}} + \alpha$ – тиск повітря, допустимий Правилами безпеки для шахтних виробок, Па.

Як вже було сказано раніше, при розрахованому значенні можна істотно спростити систему рівнянь (3), перейшовши в цьому випадку до одновимірної моделі. При цьому система диференціальних рівнянь (3) переписеться в наступному вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{g V_x}{K_\phi}; \\ m \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial (V_x \rho)}{\partial x}; \\ \rho = \frac{P}{RT}; \\ \rho C_n \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{K_\tau}{h_1 + h_2} (T - T_n). \end{cases} \quad (5)$$

Рішення системи рівнянь (5), що отримується чисельними методами, відноситься до відрізка OD виробки, заповненої шматками обрушеної при штучному вибуху породи. Система рівнянь (5) замикається, якщо її доповнити початковими умовами на відрізку OD і граничними умовами в точках O і D (лінія по осі OX на рис. 2). Граничні і початкові умови (4) спрощуються і приймають такий вигляд:

$$\begin{aligned} Vx|_{x=a} = V_1; T|_{x=a} = T_k; P|_{x=a} = P_{норм} + \alpha; \rho|_{x=a} = \frac{P}{RT} \\ Vx|_{x=0} = V_0; T|_{x=0} = T_{оч}; P|_{x=0} = P_n; \rho|_{x=0} = \rho_n \end{aligned} \quad (6)$$

По відрізку OD

$$Vx|_{t=0} = 0; T|_{t=0} = T_n; P|_{t=0} = P_{норм}; \rho|_{t=0} = \frac{P}{RT}|_{t=0}.$$

Проводячи аналітичні дослідження можливості застосування у вугільних шахтах направлено вибуху для гасіння та локалізації пожеж у виробках, приходимо до наступних висновків:

локалізація пожежі та охолодження пожежних газів можлива шляхом створення пробки обрушення пород зони непружних деформацій покрівлі виробки;

обрушення пород дезінтегрованого гірничого масиву слід проводити за рахунок руйнування елементів кріплення гірничих виробок;

динаміка охолодження пожежних газів в породній пробці описується математичною моделлю процесу руху нагрітого повітря в пористому середовищі в двовимірній і одновимірній постановці;

для чисельного рішення отриманої системи диференціальних рівнянь і визначення параметрів зони породної пробки у виробках необхідно продовжити експериментальне дослідження пористості матеріалу пробки, а також розробити алгоритм і програму розрахунку на ЕОМ цих параметрів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в створенні нових способів локалізації та ліквідації наслідків вибухів газопилових сумішей, ускладнених екзогенними пожежами, в гірничих виробках вугільних шахт, що дозволить своєчасно і в повній мірі забезпечити порятунк застряглих людей, підвищити безпеку роботи гірничих рятувальників при ліквідації наслідків цих аварій, зменшити економічні збитки підприємств.

Наукова новизна роботи полягає у розв'язанні науково-прикладної задачі вдосконалення так-

тики (технології) ліквідації наслідків вибухів газопилових сумішей, ускладнених екзогенними пожежами, в гірничих виробках вугільних шахт, що дозволить своєчасно і в повній мірі забезпечити порятунок застряглих людей, підвищити безпеку роботи гірничих рятувальників при ліквідації наслідків цих аварій, зменшити економічні збитки підприємств, які пов'язані із втратою техніки, гірничих виробок і запасів вугілля, що підготовлені до виїмки, у виїмкових полях, що інтенсивно відпрацьовуються, великих аварійних збитків, які пов'язані із простоями лав або несвоечасною підготовкою фронту очисних робіт.

Висновки і пропозиції. Встановлено, що при ліквідації наслідків вибухів газопилових сумішей, ускладнених екзогенними пожежами, в гірничих виробках вугільних шахт, безпечно і ефективно локалізацію пожежі, а також охолодження пожежних газів можна проводити шляхом створення за рахунок енергії направлено вибуху «пробки» з обрушених пород зони непружних деформацій покрівлі аварійної виробки. Динаміка охолодження пожежних газів в «породній» пробці описується математичною моделлю процесу руху нагрітого повітря в пористому середовищі в двовимірній і одновимірній постановці.

Вдосконалення тактики ліквідації наслідків вибухів газопилових сумішей, ускладнених екзогенними пожежами, в гірничих виробках вугільних шахт, дозволить своєчасно і в повній мірі забезпечити порятунок застряглих людей, підвищити безпеку роботи гірничих рятувальників при ліквідації наслідків цих аварій, зменшити економічні збитки підприємств, які пов'язані із втратою машин, механізмів, обладнання, гірничих виробок і запасів вугілля, що підготовлені до виїмки, у виїмкових полях, що інтенсивно відпрацьовуються, великих аварійних збитків, які пов'язані із простоями лав або несвоечасною підготовкою фронту очисних робіт.

Для чисельного рішення отриманої системи диференціальних рівнянь динаміки охолодження пожежних газів в породній пробці і визначення параметрів зони породної пробки у виробках, необхідно продовжити експериментальне дослідження пористості матеріалів порід пробки, а також розробити алгоритм і програму розрахунку на ЕОМ цих параметрів.

Список літератури:

1. Долженков А.Ф., Негрей Т.А. Анализ основных направлений создания безопасных условий труда подземных рабочих угольных шахт. *Вісник Донецького гірничого інституту* : Всеукраїнський науково-технічний журнал. Вип. 1(36)–2(37). Красноармійськ : ДВНЗ «ДонНТУ», 2015. С. 123–129.
2. Santosh Kumar Ray, Niroj Kumar Mohalik, Asfar Mobin Khan, Debashish Mishra, Nikhil Kumar Varma, Jai Krishna Pandey, Pradeep Kumar Singh (2020) CFD modeling to study the effect of particle size on dispersion in 20l explosion chamber: An overview. *International Journal of Mining Science and Technology*. Volume 30. Issue 3. Pp. 321–327.
3. Зав'ялова О.Л., Костенко В.К. Механізм розвитку вибухів вугільного пилу в мережі гірничих виробок шахт. *Геотехнічна механіка* : міжвід. зб. наук. праць. ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України. Дніпро, 2017. Вип. 135. С. 52–63.
4. Зав'ялова О.Л., Костенко В.К., Крупка А.А., Дузь Л.С., Кралюк М.О. Тактика ліквідації наслідків вибухів газопилових сумішей у гірничих виробках вугільних шахт. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2020. № 1(2)–2(3).
5. Левашев А.Л. и др. Локализирующие свойства обрушенных пород при пожарах в выработанном пространстве. *Разработка месторождений полезных ископаемых* : Респ. межведом. науч.-техн. сб. Киев, 1991. С. 89–92.
6. Ляшко И.И., Велико-Иваненко И.М., Мистецкий Г.Б. Метод мажорантных областей в теории фильтрации. Киев : Наукова думка, 1974. 200 с.
7. Ефремов Э.И., Петренко В.Д., Пастухов А.И. Прогнозирование дробления горного массива взрывом. Киев : Наукова думка, 1990. 120 с.

8. Переяславский Л.Г. Некоторые аспекты разрушения твердых тел под действием динамических нагрузок. *Совершенствование и развитие буровзрывных работ на флюсовых карьерах*. Киев, 1978. С. 26–32.
9. Определение максимального размера кусков при взрывной отбойке. Горное дело: РЖ : ВИНТИ. 1978. № 3.
10. Альтман Е.И., Большаков И.Л., Кожелупенко Ю.Д. Гідрогазодинаміка. Одеса, 2008. 350 с.
11. Веселовский В. С. и др. Самовозгорание промышленных материалов. Москва : Наука, 1964. 261 с.
12. Саранчук В.И., Баев Х.А. Теоретические основы самовозгорания угля. Москва : Недра, 1976. 156 с.
13. Глузберг Е.И. Теоретические основы прогноза и профилактики шахтных пожаров. Москва : Недра, 1986. 150 с.

References:

1. Dolzhenkov A.F., Negrey T.A. (2015) Analiz osnovnykh napravleniy sozdaniya bezopasnykh usloviy truda podzemnykh rabochikh ugol'nykh shakht [Study of work safety of underground workers coal mines]. *Visti Donets'koho hirnychoho instytutu: Vseukrayins'kyi naukovo-tekhnichnyy zhurnal*, no. 1(36)–2(37), pp. 123–129. (in Russian)
2. Santosh Kumar Ray, Niroj Kumar Mohalik, Asfar Mobin Khan, Debashish Mishra, Nikhil Kumar Varma, Jai Krishna Pandey, Pradeep Kumar Singh (2020) CFD modeling to study the effect of particle size on dispersion in 20l explosion chamber: An overview. *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 30, issue 3, pp. 321–327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.04.005>
3. Zavyalova O.L., Kostenko V.K. (2017) Mekhanizm rozvytku vybukhiv vuhil'noho pylu v merezhi hirnychkykh vyrobok shakht [Mechanism of development of coal dust explosions in the network of mine workings]. *Heotekhnichna mekhanika: mizhvid. zb. nauk. prats'*, no. 135, pp. 125–136. (in Ukrainian)
4. Zavyalova O.L., Kostenko V.K., Krupka A.A., Duz L.E., Kraliuk M.O. (2020) Taktyka likvidatsiyi naslidkiv vybukhiv hazoplyovykh sumishey u hirnychkykh vyrobkakh vuhil'nykh shakht [Tactics of liquidation of consequences of explosions of gas-dust mixtures in mining workings of coal mines]. *Naukovyy visnyk DonNTU*, no. 1(2)–2(3). (in Ukrainian)
5. Levashev A.L. et al. (1991) Lokalizuyushchiye svoystva obrushennykh porod pri pozharakh v vyrabotannom prostranstve [Localizing properties of collapsed rocks in case of fires in mined-out space]. *Razrabotka mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh: Resp. mezhvedom. nauch.-tekhn. sb.* Kyiv, pp. 89–92. (in Russian)
6. Lyashko I.I., Veliko-Ivanenko I.M., Mystetskiy G.B. (1974) Metod mazhorantnykh oblastey v teorii fil'tratsii [Method of majorant domains in filtration theory]. Kyiv: Naukova Dumka, 200 p. (in Russian)
7. Efremov E.I., Petrenko V.D., Pastukhov A.I. (1990) Prognozirovaniye drobleniya gornogo massiva vzryvom [Prediction of rock mass crushing by explosion]. Kyiv: Naukova Dumka, 120 p. (in Russian)
8. Pereyaslavsky L.G. (1978) Nekotoryye aspekty razrusheniya tverdykh tel pod deystviyem dinamicheskikh nagruzok [Some aspects of the destruction of solids under the action of dynamic load]. *Sovershenstvovaniye i razvitiye burovzryvnykh rabot na flyusovykh kar'yerakh*. Kyiv, pp. 26–32. (in Russian)
9. Opredeleyeniye maksimal'nogo razmera kuskov pri vzryvnoy otboyye (1978) [Determination of the maximum size of pieces during explosive breaking]. Mining: RZh: VINITI, no. 3. (in Russian)
10. Altman E.I., Bolshakov I.L., Kozhelupenko Yu.D. (2008) Hidrohaзodynamika [Gidrogazodynamika]. Odessa, 350 p. (in Ukrainian)
11. Veselovsky V.S. et al. (1964) Samovozgoraniye promyshlennykh materialov [Spontaneous combustion of industrial materials]. Moskva: Nauka, 261 p. (in Russian)
12. Saranchuk V.I., Baev Kh.A. (1976) Teoreticheskiye osnovy samovozgoraniya uglya [Theoretical foundations of spontaneous combustion of coal]. Moskva: Nedra, 156 p. (in Russian)
13. Gluzberg E.I. (1986) Teoreticheskiye osnovy prognoza i profilaktiki shakhtnykh pozharov [Theoretical foundations of forecasting and prevention of mine fires]. Moskva: Nedra, 150 p. (in Russian)