ТЕХНІЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2021-4-92-26>

УДК 622.817(571.17)

Крупка Я.А.

Одеський науково-дослідний інститут судових експертиз

Костенко Т.В.

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

Національного університету цивільного захисту України

Зав'ялова О.Л.

Донецький національний технічний університет

ЛОКАЛІЗАЦІЯ ТА ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ПАРОГАЗОВИМИ СУМІШАМИ У ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ

Анотація. Мета статті – розвиток і вдосконалення тактики ліквідації та ізоляції розвинутих пожеж у вибухонебезпечних дільницях з інертизацією рудничної атмосфери для запобігання вибухів газопилових сумішей, що дозволить підвищити ефективність і безпеку гірничорятувальних робіт, 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. Наукова новизна роботи полягає у розв'язанні науково-прикладної задачі розвитку і вдосконалення тактики ліквідації та ізоляції розвинутих пожеж у вибухонебезпечних дільницях з інертизацією рудничної атмосфери, для запобігання вибухів газопилових сумішей, що дозволить підвищити ефективність та безпеку гірничорятувальних робіт з ліквідації наслідків цих аварій, зменшити економічні збитки підприємств. Рішення аналітичної задачі визначення конкретного обсягу подачі парогазової суміші генераторами інертних газів безпосередньо в осередок пожежі дозволить правильно оцінити газову обстановку в ньому і прийняти доцільне і ефективне оперативне рішення на ліквідацію аварії. Розвиток і вдосконалення тактики ліквідації та ізоляції розвинутих пожеж у вибухонебезпечних дільницях з інертизацією рудничної атмосфери, для запобігання вибухів газопилових сумішей, дозволить підвищити ефективність та безпеку гірничорятувальних робіт з 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, в виїмкових полях, що інтенсивно відпрацьовуються, великих аварійних збитків, які пов'язані із простоями лав або несвоечасною підготовкою фронту очисних робіт.

Ключові слова: аварія, вибух, вугільна шахта, газопилова суміш, гірничі рятувальники, інертизація, парогазова суміш, пожежа, теплоперенос.

Krupka Yaroslav

Odessa Research Institute of Forensic Examinations

Kostenko Tetiana

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl

Heroes of National University of Civil Defense of Ukraine

Zavialova Olena

Donetsk National Technical University

LOCALIZATION AND FIRE EXTINGUISHING BY STEAM GAS MIXTURES IN COAL MINES

Summary. The purpose of the article is to develop and improve tactics of liquidation and isolation of developed fires in explosive areas with inertization of the mine atmosphere to prevent explosions of gas-dust mixtures, which will increase the efficiency and safety of mining operations, reduce economic losses. The methodological basis of research is the general laws and categories of the theory of knowledge, in particular, the provisions of materialist dialectics, which contributed to the understanding of the object, subject, purpose and objectives of research in the context of interdependence of achievements and needs of practice. Methods of formal logic (analysis, synthesis, deduction, induction, analogy, abstraction) made it possible to better understand the content of the studied issues. 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 scientific novelty of the work is to solve the scientific and applied problem of development and improvement of tactics of liquidation and isolation of developed fires in explosive areas with inertization of the mine atmosphere, to prevent explosions of gas-dust mixtures, which will increase the efficiency and safety of rescue operations. economic losses of enterprises. The solution of the analytical problem of determining the specific volume of steam-gas mixture supply by inert gas generators

directly to the fire center will allow to correctly assess the gas situation in it and make an appropriate and effective operational decision to eliminate the accident. Development and improvement of tactics of liquidation and isolation of developed fires in explosive areas with inertization of the mine atmosphere, to prevent explosions of gas-dust mixtures, which will increase the efficiency and safety of rescue operations to eliminate the consequences of these accidents, reduce economic losses mechanisms, equipment, mine workings and coal reserves prepared for excavation, in intensive excavation fields, large emergency losses associated with lava downtime or untimely preparation of the treatment front.

Keywords: accident, explosion, coal mine, gas-dust mixture, mountain rescuers, inertization, steam-gas mixture, fire, heat transfer.

Постановка проблеми. Пожежі на вугільних шахтах, будучи одними з найбільш небезпечних видів підземних аварій, можуть істотно впливати на нормальний режим роботи підприємств і приводити до важких наслідків економічного та соціального характеру. Підземні пожежі викликають серйозні порушення технологічного процесу, що обумовлюють значні збитки підприємств у вигляді втрат від скорочення видобутку вугілля, від витрат на локалізацію та їх гасіння. Підземні пожежі ліквідується активним способом на початкові стадії їх виникнення. Але, розвинуті пожежі неможливо активно локалізувати і ліквідувати, тому, як правило, використовується спосіб ліквідації аварії методом ізоляції пожежної дільниці [1].

На сучасному етапі розвитку гірничорятувальної науки перед вченими стоїть задача вдосконалити та розвинути тактику ліквідації та ізоляції розвинутих пожеж у вибухонебезпечних дільницях з інертизацією рудничної атмосфери, з метою запобігання вибухів газопилових сумішей, що дозволить підвищити ефективність і безпеку гірничорятувальних робіт, зменшити економічні збитки підприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Істотний внесок у розвиток теорії встановлення умов утворення вибухобезпечного середовища в ізолюваних пожежних дільницях, а також створення способів і технічних засобів ведення гірничорятувальних робіт внесли Балтайтис В. Я., Грядущий Б. А., Доценко В. Ф., Дузь Л. Є., Зрелый М. Д., Костенко В. К., Крупка А. А., Макаренко В. Л., Маркович Ю. М., Привалов М. Г., 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., Осипова С. М. та ін. [2].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Основними причинами розвитку і ускладнень екзогенних пожеж є: несвоєчасне виявлення та початок гасіння, пізній виклик гірничорятувальних підрозділів, відсутність або недостатня кількість засобів первинного пожежогасіння, несправність засобів автоматичного пожежогасіння, недостатній тиск і витрата води в пожежно-зрошувальному трубопроводі, сильна задимленість та висока температура рудничного повітря, порушення кріплення та обвалення порід у виробках, утворення та вибухи вибухонебезпечних концентрацій газопилових сумішей. На ліквідацію ендогенних пожеж, на додаток до причин розвитку і ускладнення екзогенних пожеж впливає: важкодоступність осередків пожежі, великий обсяг робіт з проведення пошукових виробок, буріння свердловин і подачі

інертних матеріалів, тривалий час зведення вибухостійких перемичок тощо. Але питаннями дослідження цих явищ, розвитку та вдосконалення тактики ліквідації та ізоляції розвинутих пожеж у вибухонебезпечних дільницях з інертизацією рудничної атмосфери для запобігання вибухів газопилових сумішей, в гірничих виробках вугільних шахт, в останні роки, практично вчені не займалися. Тому дані знання потребують розвитку, вдосконалення та оновлення.

Формулювання цілей статті. Мета статті – розвиток і вдосконалення тактики ліквідації та ізоляції розвинутих пожеж у вибухонебезпечних дільницях з інертизацією рудничної атмосфери для запобігання вибухів газопилових сумішей, що дозволить підвищити ефективність і безпеку гірничорятувальних робіт, 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 взаємобумовленості 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. При ізоляції виїмкових дільниць з розвинутими пожежами, з метою підвищення ефективності і безпеки гірничорятувальних робіт, для створення вибухобезпечного середовища в гірничих виробках застосовують інертні гази: парогазову суміш, азот та двооксид вуглецю. Для виключення можливості вибуху газопилових сумішей вміст кисню в атмосфері аварійної дільниці ($C_{\text{дл}}$) не повинен перевищувати 10 %, для пригнічення полум'яного горіння – 8 %, для припинення тління – 2 %. Вибухобезпечну атмосферу в аварійній дільниці створюють шляхом заміни повітря, що надходить на дільницю, інертним газом з низьким вмістом кисню з метою створення вибухобезпечного середовища у всьому обсязі виробок аварійної дільниці. Для цього дільницю оконтурюють ізолюючими вибухостійкими перемичками (гіпсовими або бетонними) з отворами (технологічними трубами) для забезпечення провітрювання аварійної дільниці та подачі

Таблиця 1

Технічні характеристики генераторів інертних газів

Характеристики	Тип генератора			
	ГІГ-1500	ГІГ-4	ГІГ-250	STEAMEXFIRE-1000
Подача, м ³ /хв	900-1500	340	250-300	600-720
Вміст кисню в суміші, %	3	3	3	3
Напір, КПа	12	12	8	2,5
Температура парогазової суміші, °С	80-90	80-90	80-90	85-90
Витрата палива, л/год	1560 – 4000	1040	430 – 520	1000-1200
Витрата води, м ³ /год	50,4	27	14	10
Маса, кг	1500	600	250	600

інертних газів [3]. При гасінні підземних пожеж у вугільних шахтах для запобігання вибухів газопилових сумішей, гасіння метану, зниження інтенсивності горіння різних матеріалів і охолодження розігрітого гірничого масиву використовується парогазова суміш, що отримується генераторами інертного газу в результаті згорання рідкого вуглеводневого палива і подальшого охолодження його продуктів горіння диспергуємою водою. Технічні характеристики газогенераторів інертних газів, які стоять на ознащенні Державної воєнізованої гірничорятувальної служби України у вугільній промисловості, приведені в табл. 1.

Одна з типових схем ізоляції вибухонебезпечних пожежних дільниць приведена на рис. 1.

Подачу парогазової суміші починають при відкритих вентиляційних отворах в перемичці з боку вихідного струменя повітря, і в перемичці через яку буде проводитися подача парогазової суміші. Якщо кількість інертного газу, що подається генератором (Q_{in}), перевищує мінімальну кількість повітря, яку необхідно подавати на аварійну дільницю за газовим фактором (Q_{min}), то після виходу генератора на необхідний режим закривають вентиляційний отвір в ізоляційній перемичці, яка встановлена з боку поступаючого струменю повітря.

Одночасна подача парогазової суміші та повітря через отвори повинна тривати до моменту створення в дільниці вибухобезпечної атмосфери ($C_{дл} < 10\%$).

Коли парогазова суміш, яка має початкову температуру 80...90 °С і вміст 40...60 % водяної пари в стані насичення, рухається в гірничих виробках, знижується температура потоку за рахунок теплообміну з породним масивом, що призводить до конденсації пари з одночасним виділенням тепла. Це призводить до зменшення витрат парогазової суміші по довжині виробки. Представляє практичний інтерес визначення конкретного обсягу подачі суміші безпосередньо в зону горіння, що дозволить оцінити газову обстановку в ній [4; 5].

Щоб розрахувати витрати парогазової суміші в необхідній точці виробки до зони горіння, досить мати інформацію про температуру газу. Для цього необхідно розглянути процес теплопереносу в рухомому газовому потоці.

Розподіл температури газу по довжині виробки можна отримати в результаті рішення наступного диференціального рівняння в частинних похідних

$$C_p(t)\rho(t)\left(\frac{\partial t(x,t)}{\partial \tau} + vt\frac{\partial t(x,t)}{\partial x}\right) = \lambda(t)\frac{\partial^2 t(x,t)}{\partial x^2} + I \quad (1)$$

Рис. 1. Типова схема інертизації пожежної дільниці генератором інертних газів:
1 – генератор інертних газів; 2 – пульт керування; 3 – вибухостійка перемичка;
4 – газопровід; 5 – вагони з паливом

з крайовими умовами

$$t(x, 0) = t_0; \quad (2)$$

$$t(0, \tau) = t_n; \quad (3)$$

$$t(\infty, \tau) = t_0, \quad (4)$$

де t – температура парогазової суміші, К; x – просторова координата, м; τ – тимчасова координата, м; I – теплове стікання (кількість тепла, що віддається одиницею обсягу газу в одиницю часу, Дж/(кг с):

$$I = I_1 + I_2;$$

I_1 – теплове стікання в результаті теплообміну газового потоку зі стінками виробки:

$$I_1 = K_\tau [t(x, \tau) - t_0] \frac{P}{S};$$

K_τ – коефіцієнт нестационарного теплообміну, Вт/(м² К); P , S – периметр і поперечний переріз гірничої виробки відповідно, м, м²; I_2 – теплове стікання в результаті конденсації пари

$$I_2 = \frac{q_{\text{нк}}(t)r_k}{S_x}$$

де, $q_{\text{нк}}(t)$ – витрати пару на конденсацію, кг/с

$$q_{\text{нк}}(t) = q_2 [m_0 - m_{\text{ин}}(t)]$$

де q_2 – витрата парогазової суміші, кг/с; m_0 – частка пару в суміші на виході з генератора або в будь-якому початковому перерізі; $m_{\text{ин}}(t)$ – частка пару в насиченому повітрі при атмосферному тиску.

Залежність змісту пару від температури можна представити у вигляді лінійної залежності [6]

$$m_{\text{ин}}(t) = A + Bt(x, \tau),$$

де r_k – теплота конденсації водяного пару, Дж/кг; $C_p(t)$ – теплоємність суміші, Дж/(кг К); $\rho(t)$ – щільність суміші, кг/м³; $\lambda(t)$ – коефіцієнт теплопровідності суміші, Вт/(м К); $v(t)$ – швидкість руху суміші, м/с; t_0 – температура газу в гірничій виробці до подачі інертного суміші, що дорівнює температурі порід до пожежі, К; t_n – температура суміші на виході з генератора, К; A , B – коефіцієнти пропорційності.

Рівняння (1) нелінійне. Для його лінеаризації приймемо такі припущення:

теплофізичні параметри вважатимемо незалежними від температури і враховуємо їх середні значення;

змінні по довжині виробки витрати суміші вважатимемо постійними і розглядаємо їх середнє значення таким чином, щоб при постійній складовій витрат сухих газів інша складова, витрати водяного пару, здійснювалася в заданому інтервалі зміни температури. Швидкість руху газової суміші в рівнянні (1) має бути подана як незалежна від температури, що відповідає середній витраті;

позитивне теплове стікання, що виникає при конденсації водяного пару, залежить від закономірності зміни вмісту насиченого пару від температури і носить в загальному вигляді статичний характер. Ця залежність у вузькому діапазоні температури суміші може бути представлена у вигляді лінійної.

З урахуванням наведеного, диференціальне рівняння переносу тепла може бути представлено у вигляді

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \theta \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} - v \frac{\partial t}{\partial x} - \frac{K_\tau P}{SC_p \rho} [t(x, \tau) - t_0] + \frac{q_2 r_k}{SC_p \rho L} [N - Bt(x, \tau)] \quad (5)$$

де $N = m_0 - A$;

$$\frac{K_\tau P}{SC_p \rho} = c; \quad \frac{q_2 r_k}{SC_p \rho L} = D,$$

Робимо заміну $\theta(x, \tau) = t(x, \tau) - t_0$, тоді рівняння (5) приймає вид

$$\frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta(x, \tau)}{\partial x^2} - v \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial x} - (C + DB)\theta(x, \tau) + DN, \quad (6)$$

де t_0 – початкова температура, К; таким чином $t_0 = t(x, 0)$; L – довжина ділянки гірничої виробки, м.

Крайові умови до рівняння (6) записуємо у вигляді

$$\theta(x, 0) = 0, \quad (7)$$

$$\theta(0, \tau) = \theta_n, \quad (8)$$

$$\theta(\infty, \tau) = 0. \quad (9)$$

Застосувавши до крайової задачі (6) – (9) перетворення Лапласа, отримаємо в просторі зображень

$$a \frac{dU(x, S)}{dx^2} - v \frac{dU(x, S)}{dx} - SU(x, S) + \theta(x, 0) - (C + DB)U(x, S) + \frac{DN}{S} = 0. \quad (10)$$

$$U(x, S) \rightarrow \theta(x, \tau).$$

З урахуванням початкової умови (7) рівняння (10) має вигляд

$$\frac{d^2 U(x, S)}{dx^2} - \frac{vdu(x, S)}{adx} - \frac{(S + C + DB)}{a} U(x, S) = -\frac{DN}{S} \quad (11)$$

Граничні умови для рівняння (11) отримаємо з (8) та (9)

$$U(0, S) = \frac{\theta_n}{S}, \quad (12)$$

$$U(\infty, S) = 0. \quad (13)$$

З огляду на те, що рівняння (11) неоднорідне, спочатку шукаємо спільне рішення однорідного рівняння у вигляді

$$U_1(x, S) = C_1 \exp(r_1 x) + C_2 \exp(r_2 x). \quad (14)$$

Для лівої частини рівняння (11) характеристичне рівняння має вигляд

$$r^2 - \frac{v}{a} r - \frac{S + K}{a} = 0, \quad (15)$$

Корні якого

$$r_{1,2} = \frac{v}{2a} \pm \sqrt{\left(\frac{v}{2a}\right)^2 + \frac{S + K}{a}}, \quad (16)$$

де $K = C + DB$,

тоді

$$U_1(x, S) = C_1 \exp \left[\left(\frac{v}{2a} + \sqrt{\left(\frac{v}{2a}\right)^2 + \frac{S + K}{a}} \right) x \right] + C_2 \exp \left[\left(\frac{v}{2a} - \sqrt{\left(\frac{v}{2a}\right)^2 + \frac{S + K}{a}} \right) x \right]. \quad (17)$$

Частинне рішення неоднорідного рівняння отримаємо у вигляді

$$U_2(x, S) = \frac{DNa}{S(S + K)}.$$

Тоді загальне рішення неоднорідного рівняння має вигляд

$$U(x, S) = C_1 \exp \left[\left(\frac{v}{2a} + \sqrt{\left(\frac{v}{2a}\right)^2 + \frac{S + K}{a}} \right) x \right] + C_2 \exp \left[\left(\frac{v}{2a} - \sqrt{\left(\frac{v}{2a}\right)^2 + \frac{S + K}{a}} \right) x \right] + \frac{DNa}{S(S + K)} \quad (18)$$

Виходячи з обмеженості температури на нескінченності, підставивши рішення (18) в граничну умову (12), отримаємо

$$C_2 = \frac{\theta_n}{S} - \frac{DNa}{S(S+K)}. \quad (19)$$

Остаточно в просторі зображень маємо

$$U(x, S) = \left[\frac{\theta_n}{S} - \frac{DNa}{S(S+K)} \right] e^{\frac{vx}{2a}} e^{-\frac{x}{\sqrt{a}} \sqrt{S+B}} + \frac{DNa}{S(S+K)}. \quad (20)$$

$$t(x, \tau) - t_0 = \frac{(t_n - t_0)}{2} e^{\frac{vx}{2a}} \left[e^{-x \sqrt{\frac{b}{a}}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \sqrt{b\tau}\right) + e^{x \sqrt{\frac{b}{a}}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \sqrt{b\tau}\right) \right] - DNa \int_0^\tau e^{-k(\tau-\theta)} \frac{e^{\frac{vx}{2a}}}{2} \times \left[e^{-x \sqrt{\frac{b}{a}}} \operatorname{erfc}\left(\frac{2}{2\sqrt{a\theta}} - \sqrt{b\theta}\right) + e^{x \sqrt{\frac{b}{a}}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{-2\sqrt{a\theta}} + \sqrt{b\theta}\right) \right] d\theta + \frac{DNa}{K} (1 - e^{-K\tau}), \quad (21)$$

$$\text{де } b = \frac{v^2}{4a} + K.$$

У тому випадку, коли процес теплопереносу стаціонарний, необхідно розглядати звичайне неоднорідне диференціальне рівняння

$$\theta''(x) - \frac{v}{a} \theta'(x) - \frac{K}{a} \theta(x) + \frac{DNa}{a} = 0 \quad (22)$$

З граничними умовами

$$\theta(0) = \theta_n;$$

$$\theta(\infty) = 0,$$

спільне рішення, якого шукаємо як суму загального рішення однорідного рівняння і частинного рішення неоднорідного.

Для однорідного рівняння характеристичне рівняння має вигляд

$$r^2 - \frac{v}{a} r - \frac{K}{a} = 0.$$

З урахуванням умови обмеженості на нескінченності отримаємо загальне рішення однорідного рівняння

$$\theta_1(x) = C \exp \left[\left(\frac{v}{2a} - \sqrt{\left(\frac{v}{2a} \right)^2 + \frac{K}{a}} \right) x \right]. \quad (23)$$

Частинне рішення неоднорідного рівняння отримаємо у вигляді

$$\theta_2(x) = \frac{DN}{K}. \quad (24)$$

Загальне рішення неоднорідного рівняння отримаємо у вигляді

$$\theta(x) = \theta_1(x) + \theta_2(x) = C \exp \left[\left(\frac{v}{2a} - \sqrt{\left(\frac{v}{2a} \right)^2 + \frac{K}{a}} \right) x \right] + \frac{DN}{K}. \quad (25)$$

Підставляючи рівняння (25) в граничну умову (8), отримаємо значення постійної, з урахуванням якої рішення стаціонарної крайової задачі остаточно має вигляд

$$t = t_0 + (t_n - t_0) e^M + \frac{DN}{K} (1 - e^M), \quad (26)$$

$$\text{де } M = x \left(\frac{v}{2a} - \sqrt{\left(\frac{v}{2a} \right)^2 + \frac{K}{a}} \right).$$

Рішення поставленого завдання істотно спрощується, якщо знехтувати перенесенням тепла турбулентною дифузією. Тоді рівняння (22) можна представити у вигляді

$$\theta'(x) + \frac{K}{v} \theta(x) = \frac{DN}{v}, \quad (27)$$

Використовуючи операційні відносини [7]

$$\frac{1}{S} e^{-\alpha \sqrt{S+B}} \rightarrow \frac{1}{2} \left[e^{-\alpha \sqrt{b}} \operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{r}} - \sqrt{br}\right) + e^{\alpha \sqrt{b}} \operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{r}} + \sqrt{br}\right) \right];$$

$$\frac{1}{S+K} \rightarrow e^{-K\tau}$$

і застосовуючи згортання функцій, отримуємо в просторі оригіналів рішення крайової задачі

загальне рішення якого наступне

$$t = t_0 + (t_n - t_0) e^{-\frac{Kx}{v}} + \frac{DN}{K} (1 - e^{-\frac{Kx}{v}}). \quad (28)$$

Залежності (26) і (28) мають одну і ту ж структуру, перша з них описує перенесення тепла за рахунок турбулентної дифузії і конвекції, а друга – тільки конвекції. У кожній з цих залежностей другий член правої частини враховує тепловіддачу парогазової суміші стінками виробки, а третій – нагрівання суміші за рахунок тепла, що виділяється при конденсації пару [8].

Наукова новизна роботи полягає у розв'язанні науково-прикладної задачі розвитку і вдосконалення тактики ліквідації та ізоляції розвинутих пожеж у вибухонебезпечних дільницях з інертизацією рудничної атмосфери, для запобігання вибухів газопилових сумішей, що дозволить підвищити ефективність та безпеку гірничорятувальних робіт з 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, в виїмкових полях, що інтенсивно відпрацьовуються, великих аварійних збитків, які пов'язані із простоями лав або несвоєчасною підготовкою фронту очисних робіт.

Висновки і пропозиції. Рішення аналітичної задачі визначення конкретного обсягу подачі парогазової суміші генераторами інертних газів, безпосередньо в осередок пожежі, дозволить правильно оцінити газову обстановку в ньому і прийняти доцільне і ефективне оперативне рішення на ліквідацію аварії.

Розвиток і вдосконалення тактики ліквідації та ізоляції розвинутих пожеж у вибухонебезпечних дільницях з інертизацією рудничної атмосфери, для запобігання вибухів газопилових сумішей, дозволить підвищити ефективність та безпеку гірничорятувальних робіт з 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, в виїмкових полях, що інтенсивно відпрацьовуються, великих аварійних збитків, які пов'язані із простоями лав або несвоєчасною підготовкою фронту очисних робіт.

Список літератури:

1. Долженков А. Ф., Негрей Т. А. Анализ основных направлений создания безопасных условий труда подземных рабочих угольных шахт. *Вісті Донецького гірничого інституту* : Всеукраїнський науково-технічний журнал. Вип. 1(36)–2(37). Красноармійськ : ДВНЗ «ДонНТУ», 2015. С. 123–129.
2. 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.
3. Зав'ялова О. Л., Костенко В. К., Крупка А. А., Дузь Л. Є., Крالیук М. О. Тактика ліквідації наслідків вибухів газопилових сумішей у гірничих виробках вугільних шахт. *Науковий вісник ДонНТУ*. 2020. № 1(2)–2(3),
4. Лыков А. В. Тепломассообмен. Справочник. Москва : Энергия, 1972. 560 с.
5. Ковалишин В. В., Кирилів Я. Б., Бойко Т. В. Динаміка газопопинних потоків в замкнутому об'ємі каналу під час гасіння пожежі. *Пожезна безпека*. 2009. № 15. С. 16–24.
6. Диткин В. А., Прудников А. П. Интегральные преобразования и операционное исчисление. 1961. 542 с.
7. Себиси Т., Бредшоу П. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы. Москва : Мир, 1987. 590 с.
8. Маркович Ю. М., Крупка А. А. Аналитическое исследование процесса разгазирования подземных выработок шахт. Донецк: НИИГД, 1993, 9 с. Деп. в ГНТБ України 07.02.94, № 238 – УК 94.

References:

1. Dolzhenkov, A. F. & Negrey, T. A. (2015) Study of work safety of underground workers coal mines [Analiz osnovnykh napravleniy sozdaniya bezopasnykh usloviy truda podzemnykh rabochikh ugol'nykh shakht]. *Visti Donets'koho hirnychoho instytutu: Vseukrayins'kyi naukovo-tekhnichnyy zhurnal*, no. 1(36)–2(37), pp. 123–129. (in Russian)
2. Zavyalova, O. L. & Kostenko, V. K. (2017) Mechanism of development of coal dust explosions in the network of mine workings [Mekhanizm rozvytku vybukhiv vuhil'noho pylu v merezhi hirnychkykh vyrobok shakht]. *Heotekhnichna mekhanika: mizhvid. zb. nauk. prats'*, no. 135, pp. 125–136. (in Ukrainian)
3. Zavyalova, O. L., Kostenko, V. K., Krupka, A. A., Duz, L. E. & Kraliuk, M. O. (2020) Tactics of liquidation of consequences of explosions of gas-dust mixtures in mining workings of coal mines [Taktyka likvidatsiyi naslidkiv vybukhiv hazopylovykh sumishey u hirnychkykh vyrobkakh vuhil'nykh shakht]. *Naukovyy visnyk DonNTU*, № 1(2)–2(3). (in Ukrainian)
4. Lykov, A. V. (1972) Heat and mass transfer. Directory [Teplomassoobmen. Spravochnik]. Moscow: Energiya, 560.
5. Kovalyshyn, V. V., Kyryliv, Ya. B. & Boyko, T. V. (2009) Dynamics of gas-foam flows in a closed volume of a channel during fire extinguishing [Dynamika hazovo-pinnykh potokiv v zamknutomu ob'yemi kanalu pid chas hasinnya pozhezhi]. *Pozhezhna bezpeka*, no. 15, pp. 16–24. (in Ukrainian)
6. Ditkin, V. A. & Prudnikov, A. P. (1961) Integral transformations and operational calculus [Integral'nyye preobrazovaniya i operatsionnoye ischisleniye], 542 p. (in Russian)
7. Sebisi, T. & Bredshou, P. (1987) Convective heat transfer. Physical foundations and computational methods [Konvektivnyy teploobmen. Fizicheskiye osnovy i vychislitel'nyye metody]. Moscow: Mir, 590 p. (in Russian)
7. Markovich, Yu. M. & Krupka, A. A. (1993) Analytical study of the degassing process of underground mine workings [Analiticheskoye issledovaniye protsessa razgazirovaniya podzemnykh vyrabotok shakht]. Donetsk: NIIGD. Dep. v GNTB Ukrainy 07.02.94, № 238 – UK 94. (in Russian)