

УДК 622.822.22:536.24

<https://doi.org/10.37101/ftpgv25.01.003>

КІНЕТИКА САМОНАГРІВАННЯ ТА САМОЗАЙМАННЯ ВУГЛЕПОРІДНИХ ВІДВАЛІВ

Л.І. Стефанович^{1*}, Е.П. Фельдман¹

¹Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна

*Відповідальний автор: e-mail: liste2591@gmail.com

KINETICS OF SELF-HEATING AND SPONTANEOUS COMBUSTION OF COAL DUMPS

L.I. Stefanovich^{1*}, E.P. Feldman¹

¹Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

*Corresponding author: e-mail: liste2591@gmail.com

ABSTRACT

Purpose. Studying the kinetics of self-heating and spontaneous combustion of coal dumps under conditions of free access of oxygen inside the dump, as well as elucidating the influence of the process of burning out the coal component of the dump on its temperature regime.

Methods. The work uses methods of physical and chemical kinetics, as well as methods of numerical solution of the system of evolutionary equations.

Findings. A mathematical model of the self-heating of a coal shaft was built, which makes it possible to obtain the dependence of the dump average temperature on time. The multi-stage thermal regime of the dump was revealed. The temperature threshold for the occurrence of the self-ignition stage of the dump is theoretically estimated, which correlates with known experimental results.

Originality. The physical and mathematical model of the process constructed in the work shows that, regardless of the initial content of the coal component (in the range of values from 5% to 7%), the process of evolution of the average temperature of the dump can be divided into 3 different stages, namely: the first stage is associated with slow self-heating the dump to a certain critical temperature, the second stage occurs after the critical temperature is exceeded and is of a sharp (explosive) nature, corresponding to the spontaneous self-combustion of the dump. And finally, after the coal component of the dump burns out, the third stage of extremely slow cooling of the dump begins, which can last for years.

Practical implications. The results obtained in the work can be useful for assessing the temperature conditions of coal dumps, depending on the initial content of the coal component. They can be used to predict the fire hazard of mine dumps.

Keywords: coal dump, self-heating, self-combustion, burnout of the dump coal component

1. ВСТУП

Відомо, що вуглепородні відвали шахт мають негативний вплив на навколишнє середовище, основними факторами якого є порушення ландшафту земної поверхні, зміна гідрогеологічного режиму прилеглих територій, хімічна та радіологічна токсикація ґрунтів та вод, пилове та газове забруднення атмосфери.

Під час розробки вугільних родовищ підземним способом на поверхню із шахт щорічно видається 200-250 млн. т гірської породи. При відкритому способі розробки після збагачення видається 150 млн. т гірської породи, яка відсипається в породні відвали різних форм і розмірів. Загальна кількість відвалів по всій Україні становить понад 1500 одиниць. Породні відвали займають значну частину площі, яка могла б використовуватися для сільськогосподарських робіт та промислового та житлового будівництва.

Склад гірської маси відвалів містить значну кількість горючих речовин та вугілля, що призводить до виникнення вогнищ самозаймання. Це в першу чергу негативно впливає на навколишнє середовище. Питання самонагрівання вуглепородних відвалів порушувалися у низці теоретичних робіт [1, 2]. Зокрема, у статті [1] розглянуто процес осередкового самозаймання пожежонебезпечних довільних органічних матеріалів зернистого характеру з використанням методів дослідження теплообміну накопичення вугілля з навколишнім середовищем у накопиченні їх часток різного розміру, у тому числі шахтної породи. У роботі [2] розглянуто конкретний чисельний метод розв'язання задачі про осередкове самонагрівання шахтної породи. Однак залишається низка нез'ясованих питань, наприклад, як відбуватиметься процес самонагрівання у разі вільного доступу повітря всередину відвалу, але обмеженого вмісту горючої компоненти у складі шахтної породи відвалу.

Розглядаючи явище самонагрівання вуглепородних відвалів (ВПВ) та його перехід у самозаймання як взаємодію процесів теплоутворення та тепловіддачі, фільтрації повітря крізь породу, а також дифузії кисню та продуктів окиснення в газовому середовищі, що стикається з породою, ми будемо відволікатися від хімічної сторони явища, тобто від процесу окиснення, що викликає теплоутворення. При такому підході матеріал вуглепородного відвалу розглядається як середовище, що має певні теплофізичні та фільтраційні властивості, з позитивними джерелами теплоти та негативними джерелами (стоками) тепла. Теплопередача у пористому та сипучому середовищі, якою є порода, здійснюється як за рахунок теплопровідності власне породної речовини, так і за рахунок конвективного та променистого теплообміну між стінками пор.

Метою цієї роботи буде розгляд кінетики самонагрівання та самозаймання вуглепородних відвалів за умов вільного доступу кисню всередину відвалу з атмосферного повітря. При цьому, зокрема, ставиться завдання з'ясувати, як впливатиме вигорання вугільної компоненти відвалу на самонагрівання вуглепородного відвалу в цілому.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

При побудові математичної моделі процесу самонагрівання вуглепородного відвалу (ВПВ) заради простоти будемо розглядати відвал у вигляді шару шахтної породи завтовшки h , що насипаний безпосередньо на ґрунт (рис. 1), верхня поверхня якого омивається атмосферним повітрям і вдень прогрівається сонячним випромінюванням. При цьому ми будемо використовувати деякі припущення, що спрощують розгляд проблеми, а саме

1. Вуглепородний відвал є просторово-однорідним середовищем, що має середню густину ρ та об'ємну теплоємність C_V .

2. У початковий момент часу температура всередині вуглепородного відвалу дорівнює температурі навколишнього середовища T_0 .

3. Для простоти ми нехтуватимемо неоднорідністю розподілу температури за глибиною вуглепородного відвалу.

4. Оскільки процес самонагрівання відбувається при дуже незначних витратах кисню, то зменшення концентрації кисню всередині відвалу в процесі проходження реакції окиснення вугілля ми не враховуватимемо.

Причиною самонагрівання та можливого самозаймання вуглепородних відвалів є виділення тепла внаслідок хімічної реакції окиснення речовини відвалу (переважно частинок вугілля). Кількість тепла q_c , що виділяється в результаті реакції окиснення 1 м^3 вугілля, є не що інше, як тепловий ефект реакції, який на практиці вимірюють у розрахунку на одиницю об'єму вугілля, тобто у $\text{Дж}/\text{м}^3$. Як показують калометричні експерименти [3], у низькотемпературній області, коли температура не перевищує 100°C , тепловий ефект реакції окиснення вугілля q_c складає приблизно $12.7 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{м}^3$.

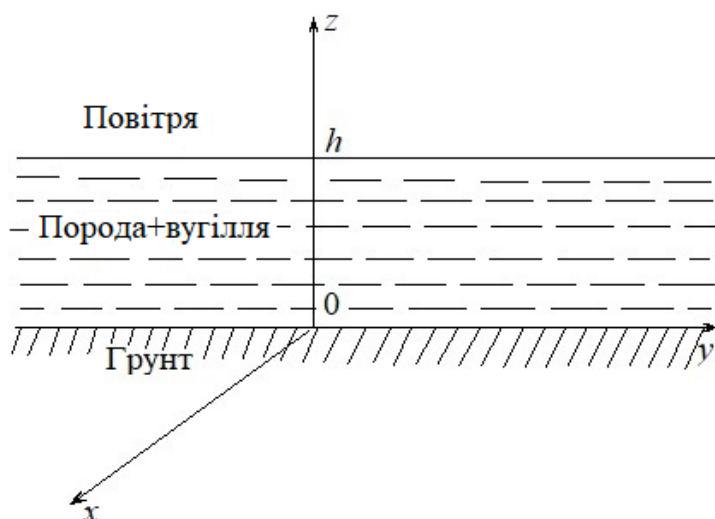


Рисунок 1. Геометрія проблеми. Тут h – товщина вуглепородного відвалу. У площині xOy відвал передбачається нескінченно протяжним

Слід зазначити, що саме цей температурний діапазон є особливо актуальним у плані виникнення ендегенного займання відвалів шахтних порід. У

діапазоні температур, що розглядається, кисень, реагує тільки з вуглецем, що міститься у частинках вугілля, але не реагує з іншими компонентами вуглепородної суміші. Припускаємо, що частинки вугілля рівномірно розподілені серед речовини ВПВ і до них є вільний доступ кисню повітря.

3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Відомо [3], що об'ємна частка вугілля n , що міститься в породному відвалі, зазвичай становить від 5% до 7%. Тоді для розрахунку кількості тепла, що виділяється в одиниці об'єму вуглепородної маси, необхідно знати «об'ємну концентрацію» вугілля $n = v_c / V_o$, у ВПВ, де v_c – об'єм вугільної складової, V_o – повний об'єм всього ВПВ. Розглянемо граничний випадок низькотемпературного окиснення вугілля, що міститься у вуглепородній суміші. Тоді процес самонагрівання відбувається за незначних витрат кисню, тобто, зменшення концентрації кисню всередині відвалу в процесі проходження реакції окиснення можна знехтувати. Отже, повна кількість тепла, що виділяється у 1 м^3 вуглепородної маси за рахунок хімічної реакції окиснення вугільних частинок, що містяться у ВПВ, можна подати у вигляді

$$Q_{ch} = q_c n. \quad (1)$$

Для побудови теорії самонагрівання вуглепородного відвалу важливо знати швидкість тепловиділення за рахунок окиснення вугільної компоненти відвалу киснем повітря dQ_{ch}/dt , яка у нашому випадку визначається швидкістю зміни «об'ємної концентрації» вугілля у вуглепородному відвалі, тобто величиною dn/dt

$$\frac{dQ_{ch}}{dt} = -q_c \frac{dn}{dt}. \quad (2)$$

Для цього потрібно знати порядок хімічної реакції сполуки кисню з вуглецем. Лабораторні дослідження показують [4], що тут маємо справу з хімічною реакцією першого порядку, коли швидкість реакції прямо пропорційна першому ступеню об'ємної частки вугілля у ВПВ, тобто

$$\frac{dn}{dt} = -\kappa [T(t)] n. \quad (3)$$

Коефіцієнт пропорційності κ (с^{-1}) називають константою швидкості сорбції. Відзначимо, що рівняння (2) досить добре «працює» у діапазоні температур, що розглядається, від 20°C до 100°C [3, 4]. Слід сказати, що швидкість сорбції сама по собі нелінійним чином залежить від температури, а саме

$$\kappa[T(t)] = \kappa_0 \exp\left[-\frac{E_a}{RT(t)}\right]. \quad (4)$$

Тут R – універсальна газова постійна, $R = 8.31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; E_a – енергія активації окиснення вугілля на повітрі ($\text{Дж}/\text{моль}$). Тоді з урахуванням (3) та (4) рівняння (2) набуває вигляду

$$\frac{dQ_{ch}}{dt} = -q_c \frac{dn}{dt} = q_c n \kappa_0 \exp\left[-\frac{E_a}{RT(t)}\right]. \quad (5)$$

Зважаючи на те, що верхня поверхня ВПВ отримує тепло від сонячного випромінювання, середній потік якого влітку вдень $J_{sr} \approx 600 \text{ Вт}/\text{м}^2$, до правої частини рівняння (5) слід додати вираз J_{sr}/h . Однак, враховуючи, що у нічний час $J_{sr} = 0$, а взимку потік тепла значно знижується ми беремо у якості середнього потоку величину $\bar{J}_{sr} \approx 6 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Слід також врахувати виток тепла до атмосфери з верхньої поверхні відвалу та виток тепла у ґрунт з його підшови. З урахуванням того, що, згідно із законом Ньютона-Ріхмана потік тепла пропорційний різниці температур, отримуємо, що до рівняння (5) слід додати з негативним знаком ще 2 доданки $\alpha_1(T - T_0)/h$, та $\alpha_2(T - T_0)/h$. В результаті, для швидкості зміни кількості тепла у 1 м^3 ВПВ отримуємо рівняння

$$\frac{dQ}{dt} = q_c n \kappa_0 \exp\left[-\frac{E_a}{RT(t)}\right] + \bar{J}_{sr}/h - \alpha_1(T - T_0)/h - \alpha_2(T - T_0)/h, \quad (6)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі вуглепородний відвал – повітря та аналогічно на нижній границі, але, у загальному випадку, з іншим коефіцієнтом тепловіддачі α_2 – вуглепородний відвал – ґрунт; $T_0 = 300 \text{ К}$ – температура навколишнього середовища. Відповідно, для швидкості зміни температури ВПВ з об'ємним вмістом вугільної компоненти n_i з урахуванням усіх джерел та стоків отримуємо рівняння

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{q_c n_i \kappa_0}{C_v} \exp\left[-\frac{E_a}{RT(t)}\right] - \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)(T - T_0)}{C_v h} + \frac{\bar{J}_{sr}}{C_v h}. \quad (7)$$

Тут C_v – об'ємна теплоємність вуглепородного матеріалу. Оскільки об'ємний вміст вугільної компоненти у конкретному ВПВ, сам залежить від часу $n_i = n_i(t)$, то рівняння (7) потрібно вирішувати спільно з рівнянням (3), яке з урахуванням (4) можна подати у вигляді

$$\frac{dn_i}{dt} = -\kappa_0 \exp\left[-\frac{E_a}{RT(t)}\right] \cdot n_i. \quad (8)$$

Рівняння (7) та (8) слід доповнити початковими умовами

$$T(z, t)|_{t=0} = T_0, \text{ при } (0 < z < h). \quad n_i(t)|_{t=0} = \{0.05; 0.06; 0.07\}. \quad (9)$$

Зважаючи на складний характер правих частин рівнянь (7) і (8), у процесі їх розв'язання будемо використовувати чисельні методи. Для цього, перш за все, необхідно визначити числові значення всіх параметрів, що входять до цих рівнянь. З експериментів відомо [5], що константа швидкості сорбції реакції окислення вугілля κ_0 змінюється у діапазоні значень $0.15 \div 0.9 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$; енергія ж активації окиснення вугілля, згідно [5], визначається величиною $E_a = 47.4 \text{ кДж/моль}$. Як впливає з [6], середня об'ємна теплоємність C_V вуглепородної маси має значення $1400 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$. Коефіцієнт тепловіддачі залежить від розмірів частинок вуглепородної суміші. Так для частинок розміром 0.01 м коефіцієнт тепловіддачі від породи у повітря α_1 , згідно [1, 7], складає $3.6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Виходячи зі значень коефіцієнтів тепловіддачі від вугілля до пород $\alpha_{y-n} = 0.46 \div 0.47 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, наведеним у [1], апроксимуємо значення коефіцієнта тепловіддачі α_2 , від вуглепородної маси до ґрунту величиною $\alpha_2 \approx 0.4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Для подальших розрахунків зручно ввести безрозмірний час $\tau = \kappa_0 t$ та безрозмірну температуру, що залежить від часу $\theta(\tau) = T(\tau)/T_0$. Тоді рівняння (7) набуває вигляду

$$\frac{d\theta_i}{d\tau} = \eta n_i(\tau) \exp\left[-\bar{E}_a/\theta_i(\tau)\right] - \beta(\theta_i(\tau) - 1) + \gamma \quad (10)$$

з початковими умовами

$$\theta_i(\tau)|_{\tau=0} = 1, \quad n_i = \{0.05; 0.06; 0.07\}. \quad (11)$$

У рівнянні (10) введені такі безрозмірні параметри:

$$\bar{E}_a = \frac{E_a}{RT_0}, \quad \eta = \frac{q_c}{\rho C T_0}, \quad \beta = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\rho h C T_0 \kappa_0}, \quad \gamma = \frac{\bar{J}_{sr}}{\rho h C T_0 \kappa_0}. \quad (12)$$

Рівняння (8) після знерозмірювання набуває вигляду

$$\frac{dn_i}{d\tau} = -\exp\left[-\frac{\bar{E}_a}{\theta_i(\tau)}\right] \cdot n_i. \quad (13)$$

Тут \bar{E}_a – безрозмірна енергія активації окиснення вугілля. Зважаючи на те, що величини n_i самі залежать від часу, то для знаходження безрозмірної температури відвалу ми повинні розв’язувати систему рівнянь, що складається з рівнянь (10) та (13). Зважаючи на складний характер правих частин цих рівнянь, проведемо чисельне рішення цієї системи. Використовуючи співвідношення (12), попередньо знайдемо чисельні значення всіх безрозмірних параметрів рівнянь (10) та (13). Розглянемо три випадки, коли початковий відсотковий зміст n_i вугільної компоненти у відвалі складає 5%, 6%, 7% відповідно. Тоді для безрозмірних параметрів (12) отримуємо значення

$$\bar{E}_a = 19.0; \eta = 30.2; n_{0i} = \{0.05, 0.06, 0.07\}; \beta = 6.3 \cdot 10^{-8}; \gamma = 9.5 \cdot 10^{-8}. \quad (14)$$

Отже, ми маємо вирішити наступну систему еволюційних рівнянь, у якій функціями, які підлягають знаходженню, є залежності $\theta_i = \theta_i(\tau)$ та $n_i = n_i(\tau)$

$$\begin{cases} n_i(\tau) = n_{0i} \exp\left\{-\int_0^\tau \exp[-19.0/\theta_i(\tau)] d\tau\right\}, \\ \frac{d\theta_i}{d\tau} = 30.2 \cdot n_i(\tau) \cdot \exp[-19.0/\theta_i(\tau)] - 6.3 \cdot 10^{-8} \cdot (\theta_i(\tau) - 1) + 9.5 \cdot 10^{-8}. \end{cases} \quad (15)$$

з початковими умовами виду (11). Зважаючи на складний характер правих частин системи рівнянь (15) для чисельного вирішення цієї системи скористаємося пакетом програм MatLab.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Отже, в результаті розв’язання системи рівнянь (15) було отримано еволюційні криві залежності середньої температури відвалу в одиницях T_0 , (рис. 2), які показують, що, незалежно від початкового вмісту вугільної компоненти, кінетику еволюції середньої температури відвалу можна чітко розділити на 3 різні стадії. Перша (повільна) стадія у всіх розглянутих випадках відповідає процесу самонагрівання вуглепородної маси. Далі після перевищення деякої критичної температури настає друга стадія, коли процес зростання температури набуває різкого (вибухового) характеру, що можна інтерпретувати як самозаймання паливної маси відвалу. І нарешті, якщо порівняти криві на рис. 2 із кривими на рис. 3, то легко помітити, що третя стадія еволюції температури відвалу починається саме в той момент, коли повністю вигоріє вугільна компонента вуглепородної маси. На цій стадії в результаті процесів передачі тепла в навколишнє середовище відбувається повільне охолодження вуглепородного відвалу, тобто температура відвалу поступово знижується до первісної температури T_0 .

5. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для аналізу процесів, що відбуваються у ВПВ, зручно окремо розглянути кінетику процесу самонагрівання та самозаймання відвалу для кожного з трьох випадків, які відрізняються різним вмістом горючої (вугільної) компоненти. Для більш ясного розуміння процесу самонагрівання ВПВ потрібно перетворити час на зручніші одиниці. Тоді ми побачимо, що у разі вихідного вмісту у відвалі вугільної компоненти на рівні 5% перша стадія самонагрівання ВПВ триває приблизно 2×10^7 с, що відповідає 7.7 місяця. Друга стадія різкого підвищення температури (горіння відвалу) триває 5.5×10^6 с, або приблизно 2.1 місяці. І лише через 9.8 місяця починається третя стадія охолодження вуглепородного відвалу, яка може тривати роками.

У разі початкового вмісту у відвалі вугільної компоненти на рівні 6% перша стадія самонагрівання ВПВ триває приблизно 2.2×10^7 с, що відповідає 8.5 місяців. Друга стадія різкого підвищення температури (горіння відвалу) триває 3.0×10^6 с, або приблизно 1.2 місяці. І лише через 9.7 місяця починається третя стадія охолодження вуглепородного відвалу, яка може тривати роками.

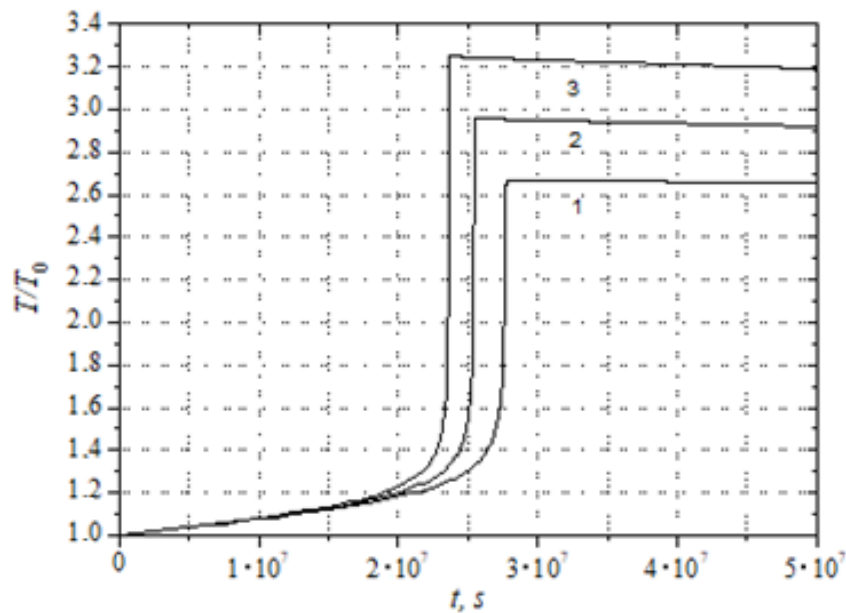


Рисунок 2. Криві 1 - 3 описують еволюцію з часом безрозмірної температури відвалу як функцію часу для концентрацій вугілля у вуглепородній суміші 5%, 6%, 7% відповідно. По осі абсцис наведено час у секундах.

І, нарешті, у разі вихідного вмісту у відвалі вугільної компоненти на рівні 7% перша стадія самонагрівання ВПВ триває приблизно 1.8×10^7 с, що відповідає 6.9 місяця. Друга стадія різкого підвищення температури (горіння відвалу) триває 5.0×10^6 с, або приблизно 1.9 місяця. І лише через 8.8 місяця починається третя стадія охолодження вуглепородного відвалу, яка може тривати роками.

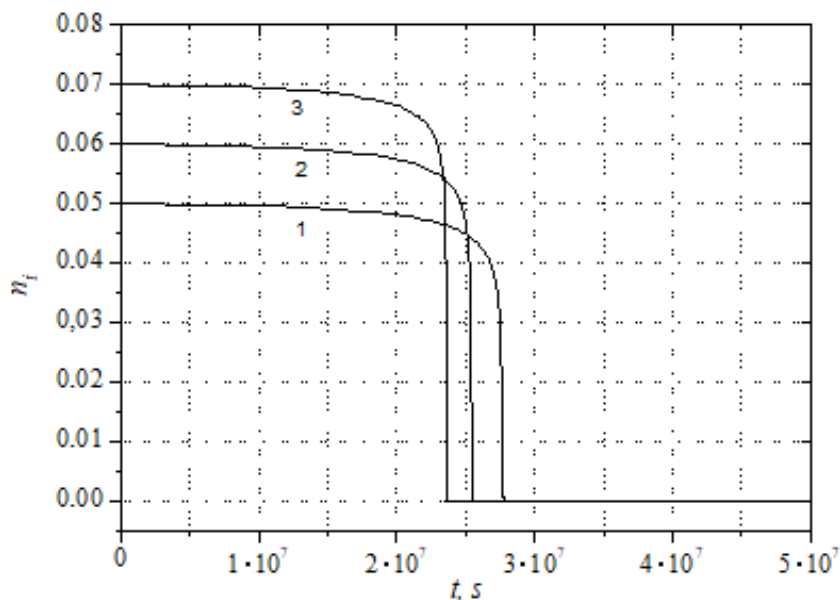


Рисунок 3. Зміна вмісту вугільної компоненти у вуглепородному відвалі у відносних одиницях. На осі абсцис наведено час у секундах

6. ВИСНОВКИ

Розвинена вище теорія самонагрівання та самозаймання вуглепородних відвалів, незважаючи на її наближений характер показує, що процес підвищення температури вуглепородних відвалів внаслідок окиснення в атмосфері повітря має універсальний характер, незалежно від вмісту вугільної компоненти в інтервалі 5% – 7%. Він складається з двох основних стадій: перша стадія відповідає повільному самонагріванню ВПВ, друга швидша стадія пов'язана з різким підвищенням температури відвалу в результаті самозаймання вуглепородної маси. Виявилось, що чим більша початкова концентрація вугільної компоненти у відвалі, тим швидше протікає процес його самонагрівання та самозаймання. Встановлена нами теоретично критична температура самозаймання шахтної породи приблизно відповідає $80 - 90^{\circ}\text{C}$, що якісно узгоджується з відомими експериментами [8], згідно з якими для кам'яного вугілля критичною точкою температури самозаймання є температура $60 - 70^{\circ}\text{C}$ в залежності від марки вугілля.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Греков С.П., Орликова В.П. (2015). Особенности теплоотдачи при очаговом самонагревании органических материалов. *Уголь Украины*, (6), 40-43.
2. Зинченко И.Н., Пашковский О.П., Глушенко К.В. (2017). Численный метод решения задачи об очаговом самонагревании шахтной породы. *Материалы XII Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах»*, 1-14.
3. Веселовский В.С., Виноградова Л.П., Орлеанская Г.Л. (1987) *Физические основы самовозгорания угля и руд*. М.: Наука, 197 с.
4. Веселовский В.С. (1964) *Самовозгорание промышленных материалов* М.: Недра, 247 с.

5. Греков С.П., Пашковский П.С., Орликова В.П. (2014) Тепловой эффект окисления углей и эндогенная пожароопасность. *Уголь Украины*. (10), 46-50.
6. Бабаев В.В., Будымка В.Ф., Домбровский М.А., Сергеева Т.А. (1987) *Термофизические свойства горных пород*. М.: Недра, 156 с.
7. Щербань А.Н., Кремнев О.А. (1951) *Исследование коэффициентов теплоотдачи в моделях горных выработок*. К.: Изд. АН УССР, 77 с.
8. Пашковский П.С., Греков С.П., Орликова В.П. (2016) Критические параметры самовозгорания угля. *Уголь Украины* (1), 23-27.

REFERENCES

1. Grekov S.P., Orlykova V.P. (2015). Osobennosti teplootdachi pry ochagovom samonagrevanii organycheskykh materyalov. *Ugol' Ukrainy*, (6), 40-43.
2. Zynchenko I.N., Pashkovsyj O.P., Glushenko K.V. (2017). Chislennyi metod resheniya zadachy ob ochagovom samonagrevanii shakhtnoj porody. *Materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii "Bezopasnost' zhyznedeiatel'nosti predpryatiy v promyshlennno razvytykh regionakh"*, 1-14.
3. Veselovskiy V.S., Vynogradova L.P., Orleanskaya G.L. (1987). *Fyzycheskiye osnovy samovozgoraniya uglia i rud*. М.: Nauka, 197 s.
4. Veselovskiy V.S. (1964). *Samovozgoraniye promyshlennykh materyalov*. М.: Nedra, 247 s.
5. Grekov S.P., Pashkovsyj P.S., Orlykova V.P. (2014) Teplovoj effect okysleniya uglej i endogennaya pozharoopasnost'. *Ugol' Ukrainy*, (10), 46-50.
6. Babajev V.V., Budymka V.F., Dombrovskij M.A., Sergejeva T.A. (1987). *Термофизические свойства горных пород*. М.: Недра, 156 с.
7. Shcherban' A.N., Kremnev O.A. (1951) Issledovaniya koeffitsijentov teplootdachi v modeliakh gornykh vyrabotok. К.: Izd. AN USSR, 77 с.
8. Pashkovskiy O.P., Grekov S.P., Orlykova V.P. (2016) Krytycheskiye parametry samonagrevaniya uglia. *Ugol' Ukrainy*, (1), 23-27.

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Вивчення кінетики самонагрівання та самозаймання вуглепородних відвалів в умовах вільного доступу кисню всередину відвалу, а також з'ясування впливу процесу вигорання вугільної компоненти відвалу на його температурний режим.

Методика. У роботі використані методи фізичної та хімічної кінетики, а також методи чисельного рішення системи еволюційних рівнянь.

Результати. Побудовано математичну модель самонагрівання вуглепородного відвалу, яка дає можливість отримати залежність середньої температури відвалу від часу. Виявлено багатостадійність теплового режиму відвалу. Теоретично оцінено температурний поріг виникнення стадії самозаймання відвалу, який корелює з відомими експериментальними результатами.

Наукова новизна. Побудована в роботі фізико-математична модель процесу показує, що незалежно від початкового вмісту вугільної компоненти (у діапазоні значень від 5% до 7%), процес еволюції середньої температури відвалу можна розділити на 3 різні стадії, а саме: перша стадія пов'язана з повільним самонагріванням відвалу до деякої критичної температури, друга стадія настає після перевищення критичної температури і носить різкий (вибу-

ховий) характер, що відповідає самозайманню відвалу. І, нарешті, після вигорання вугільної компоненти відвалу настає третя стадія надзвичайно повільного остигання відвалу, яка може тривати роками.

Практична значимість. Результати, які отримані в роботі, можуть бути корисними для оцінки температурних режимів вуглепородних відвалів, залежно від вихідного вмісту вугільної компоненти. Вони можуть бути використані для прогнозу пожежонебезпечності відвалів шахтних порід.

Ключові слова: вуглепородний відвал, самонагрівання, самозаймання, вигорання вугільної складової відвалу.

ABOUT AUTHORS

Stefanovich Leonid, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director of the Branch for Scientific Work, Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 15 Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: listef2591@gmail.com

Feldman Edward, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher, Department of Physics of Coal and Rock, Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 15 Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: edward.feldman.40@gmail.com