

Розділ 1. Фізика вугілля і гірничих порід

УДК 622.841:622.833.5:622.281.74 <https://doi.org/10.37101/ftpgp24.01.001>

**ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ САМОНАГРІВАННЯ
РУДНИЧНОЇ АТМОСФЕРИ, ЩО МІСТИТЬ МЕТАН**

Е.П. Фельдман^{1*}, Н.О. Калугіна¹, О.О. Віннік¹

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

*Відповідальний автор: e-mail: edward.feldman.40@gmail.com

**CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL
OF SELF-HEATING OF A MINING ATMOSPHERE
CONTAINING METHANE**

E.P. Feldman^{1*}, N.O. Kalugina¹, O.O. Vinnik¹

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: edward.feldman.40@gmail.com

ABSTRACT

Purpose. Selection of parameters and construction of a mathematical model for studying the temperature regime in a mine working filled with methane-air mixture.

Methods. The methods of thermodynamics and chemical kinetics were used in the work.

Findings. As a result of the research, a mathematical model of the self-heating of a mine atmosphere containing methane was constructed, taking into account the evolution of its concentration in a mine working.

Originality. A physico-mathematical model has been built that makes it possible to investigate the dependence of temperature changes in a mine working on the chemical and kinetic parameters of the gases filling it, and also to take into account the interaction of the mine atmosphere with the walls of the working.

Practical implications. The results obtained can be useful for research on describing the temperature regime process in a mine working under appropriate external conditions and within a certain range of changes in the main thermophysical parameters of coals and rocks containing it, and can be used to predict fire hazard at great depths.

Keywords: mine atmosphere, self-heating, methane, fire

1. ВСТУП

Вугільні шахти відносяться до підприємств із підвищеною небезпекою праці. Не в останню чергу це обумовлено виділенням метану, сорбованого у вугіллі, який виділяється при його видобутку тривалий час.

В умовах складної взаємодії природних, технічних і організаційних факторів при певних обставинах можуть виникнути погрозливі стани під час роботи гірничодобувного підприємства, а якщо їх не ліквідувати, то і аварійні ситуації.

За останні роки серед загальної кількості аварій на шахтах України виділяються підземні пожежі [1]. Їхня небезпека дуже велика – продукти горіння розносяться вентиляційним струменем по гірничих виробках і можуть призвести до отруєння людей шкідливими газами; у шахтах, небезпечних за газом та пилом, можуть виникати вибухи і робітники можуть бути травмовані вибуховою хвилею. Підземні пожежі, крім загибелі людей, приносять великі руйнування, виводячи з ладу ділянки, а іноді й цілі шахти.

Розроблено чималу кількість нормативних документів для забезпечення безаварійної експлуатації технологічного обладнання, дотримання правил пожежної безпеки. Однак для запобігання надзвичайним ситуаціям, для боротьби з пожежами та вибухами потрібно вдосконалення діючих норм, що вимагає розширення системи наукових уявлень про механізми виникнення та розвитку процесів, а також фізико-хімічних аспектів горіння та вибуху в умовах діючих шахт

Способи активного впливу на вибухонебезпечні області та осередки горіння повинні спиратися на глибоке розуміння складних газодинамічних і тепломасообмінних процесів, що відбуваються в гірничих виробках та вироблених просторах.

Для опису руху метану у виробках, зазвичай, рівняння газодинаміки засновані на припущенні про постійність ентропії газу (ізоентропійна течія). Однак, в дійсності, необхідно враховувати як надходження тепла у газову суміш метан-кисень-азот за рахунок хімічної реакції між метаном і киснем, так і тепловідвід через стінки виробки за рахунок теплопередачі та конвекції. Таким чином, актуальною задачею є дослідження методами математичної фізики системи рівнянь газодинаміки з урахуванням окислення і горіння метану у виробці, при відсутності умови ізоентропійності. Це дозволить наблизитися до оцінки ролі окремих параметрів (концентрації метану і кисню, вихідної температури, коефіцієнта тепловіддачі в стінки виробки, геометрії виробки) в розв'язанні та перебігу пожеж в гірничих виробках.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглянемо гірничу виробку з периметром поперечного перерізу L , м.

Будемо вважати, що виробка заповнена метано-повітряною сумішшю, яка має концентрацію метану c , що вимірюється у відносних одиницях.

Будемо вивчати зміну температурного режиму з часом у гірничій виробці з початковою концентрацією метану c_0 . Вважаємо, що хімічна реакція взаємодії метану з киснем – реакція першого порядку, тож

$$\frac{dc}{dt} = -k(T)c(t) \quad (1)$$

де T – абсолютна температура, $k(T)$ – константа швидкості хімічної реакції горіння метану в повітрі (метан «плюс» кисень) розмірності, що критично сильно залежить від температури.

Реакція відбувається з виділенням тепла. Кількість тепла, що виділяється при спалюванні 1 м^3 метану, позначимо через q (тобто при з'єднанні метану з киснем повітря), Дж/м^3 ; тоді швидкість локальної зміни температури суміші за рахунок хімічної реакції в системі метан-кисень становить $-\frac{q}{C_v} \frac{dc}{dt}$. Знак мінус означає, що температура підвищується при зменшенні кількості метану; C_v – питома теплоємність повітря при постійному об'ємі розмірності $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Систему рівнянь для дослідження температури $T(t)$ рудничної атмосфери і концентрації метану $c(t)$ складемо у наступному вигляді:

$$\begin{cases} \frac{dT(t)}{dt} = \frac{qk(T)c(t)}{C_v} - \frac{\alpha[T(t) - T_0]}{C_v L}, \\ \frac{dc(t)}{dt} = k(T)c(t), \end{cases} \quad (2)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі з рудничної атмосфери (повітря) у стінки виробки, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К} \cdot \text{с})$; $k(T)$ – константа швидкості хімічної реакції горіння метану в повітрі (метану з киснем), $1/\text{с}$; T_0 – температура стінок виробки.

Початкові умови до цієї системи додамо у наступному вигляді:

$$c(0) = c_0, \quad (4)$$

$$T(0) = T_1. \quad (5)$$

Початкові умови означають, що в початковий момент часу концентрація метану в початковий момент часу вздовж виробки однорідна і дорівнює c_0 , а вихідна температура атмосфери дорівнює T_1 , причому $T_1 \geq T_0$.

3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Вирішення задачі, яку описує побудована модель потребує обговорення параметрів, що входять до її складу.

Процеси взаємодії метану з киснем повітря добре вивчені [2]. При невисоких температурах ($T \approx 500\text{--}700 \text{ К}$) між метаном і киснем може відбуватися повільна реакція – окислення. Це екзотермічна реакція (відбувається з виділенням тепла). Однак швидкість виділення тепла в такій суміші, що реагує, недостатня для підтримки температури реакції ($500\text{--}700 \text{ К}$). Якщо ж цю систему (суміш метану з киснем) нагріти до дуже високої температури ($>1000 \text{ К}$), то в ній виникне якісно інша реакція окислення – реакція горіння, яка протікає з великою швидкістю, окислення йде відразу до кінця (утворюються продукти

повного окислення), тому виділяється максимальна кількість тепла, і швидкість тепловиділення забезпечує підтримку в системі високої температури.

Інтенсивне тепловиділення та утворення нових хімічних речовин призводить до появи великих просторових неоднорідностей – температурних та концентраційних полів з високими градієнтами температури та концентрацій. Ці неоднорідності викликають потужні фізичні процеси тепло- та масопереносу.

Теплота спалювання метану за нормальних умов, за довідковими джерелами, нижча – 35880 кДж/м³, вища – 39820 кДж/м³.

Стандартні значення питомої теплоємності сухого повітря (при 300 К, 27°C) – 1,007 кДж/(кг·К) [3], вологого (100% вологості) – 1,030 кДж/(кг·К). Питома теплоємність повітря зростає зі зростанням його температури. Проте залежність масової теплоємності повітря від температури не лінійна. В інтервалі від -50 до 120°C її величина практично не змінюється – в цих умовах середня теплоємність повітря дорівнює 1010 Дж/(кг·град). Значний вплив температура починає чинити зі значення 130°C. Так, при нагріванні з 0 до 1200°C теплоємність повітря збільшується лише в 1,2 рази – з 1005 до 1210 Дж/(кг·град). Зауважимо, що об'ємна теплоємність може бути отримана із масової шляхом множення на $\rho_0 = 1,293$ кг/м³ – густину повітря за нормальних фізичних умов.

Коефіцієнт тепловіддачі в шахтних умовах може змінюватись у широкому діапазоні та залежить від швидкості руху повітря, діаметра виробки і шорсткості стінок.

Коефіцієнт тепловіддачі з рудничної атмосфери (повітря) у стінки виробки може бути визначеним згідно емпіричної залежності Нуссельта. Для гірничих виробок з гладкими стінками за відсутності випаровування води з їхньої поверхні коефіцієнт тепловіддачі дорівнює (Вт/(м²·К)) [4]

$$\alpha = 3,337 \frac{v^{0,8}}{D^{0,2}},$$

де v – швидкість руху повітря, D – діаметр виробки.

Збільшення коефіцієнта тепловіддачі від шорсткості виробок та шахтного кріплення може бути враховано безрозмірним коефіцієнтом шорсткості, значення якого для різних типів кріплення коливаються не більше 1 – 3,5.

Константа швидкості хімічної реакції метану і кисню (метану і повітря) може бути записана у формі Арреніуса:

$$k(T) = \frac{1}{t} e^{-\frac{E}{T}},$$

де t – константа розмірності часу; E – енергія активації хімічної реакції; T – температура в енергетичних одиницях.

Аналіз експериментальних даних показав, що константа швидкості хімічної реакції буде змінюватися в залежності від складу рудничної атмосфери та її температури.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Рішення другого рівняння нашої системи має вигляд:

$$c(t) = c_0 e^{-\int_0^t k(T(t))dt}.$$

Так що рівняння для температури виглядатиме так:

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{qc_0 k(T(t)) e^{-\int_0^t k(T(t))dt}}{C_v} - \frac{\alpha [T(t) - T_0]}{C_v L}$$

з початковою умовою $T(0)=T_1$.

В основному нас буде цікавити залежність тимчасового ходу зміни температури від вихідної концентрації метану c_0 , початкової температури T_1 .

Введемо безрозмірний час τ , так що

$$t = \tau \frac{C_v L}{\alpha}.$$

Тоді наше рівняння запишеться так:

$$\frac{dT(\tau)}{d\tau} = \frac{qLk(T(\tau))c_0 e^{-\frac{C_v L}{\alpha} \int_0^\tau k(T(\tau))d\tau}}{\alpha} - [T(\tau) - T_0].$$

Якщо ввести максимально можливу температуру $T_m = \frac{q}{c_v}$, то рівняння запишеться так:

$$\frac{dT(\tau)}{d\tau} = \frac{C_v L}{\alpha} T_m c_0 k(T(\tau)) e^{-\frac{C_v L}{\alpha} \int_0^\tau k(T(\tau))d\tau} - [T(\tau) - T_0].$$

Для розрахунку значень рівняння необхідно використовувати параметр розмірності часу $\frac{C_v L}{\alpha}$, температуру T , концентрацію c_0 , а також залежність $k(T)$ (розмірності зворотного часу). Якщо $k(T)$ підпорядковується закону Арреніуса, то для знерозмірювання $k(T)$ слід помножити його на t .

Енергія активації E повинна бути виражена в Кельвінах, для чого необхідно використовувати константу Больцмана (коефіцієнт переводу з Джоулей в Кельвіни).

5. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Таким чином, реалізовано перший етап вивчення процесу самонагрівання метано-повітряної суміші у гірничій виробці – побудована фізико-математична модель, яка дозволить розрахувати значення і побудувати графік функції

$T(\tau)$ для різних значень параметру $\frac{c_v L}{\alpha}$, початкової температури T і концентрації метану c_0 .

Параметр $\frac{c_v L}{\alpha}$ (розмірності часу) можна оцінити, виходячи з літературних даних з питомої теплоємності повітря і коефіцієнта тепловіддачі з повітря у стінки виробки, а також по геометрії виробки.

Для визначення T_m необхідно знати теплоту реакції горіння метану; c_0 – параметр, що варіюється в межах 0,01 – 0,2. Для $k(T)$ можливо використовувати як формулу Арреніуса, так і релевантні спрощувальні припущення.

Попередній розгляд рівняння показує, що максимальний приріст температури повітря не може перевищувати величину $T_m c_0 = \frac{q}{c_v} c_0$.

Якісний аналіз показує, що шуканий графік матиме вигляд, який представлено на рис.1.

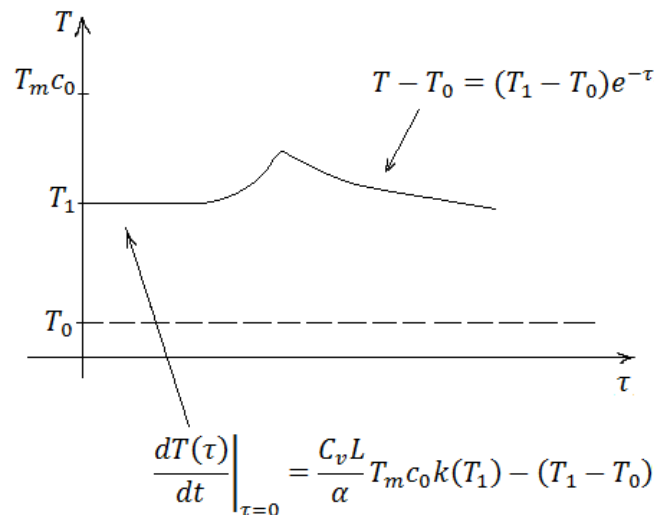


Рисунок 1. Схематична залежність зміни з часом температури у гірничій виробці, що містить метан

6. ВИСНОВКИ

Побудована математична модель самонагрівання рудничної атмосфери у гірничих виробках, що містять метан.

Параметри, задіяні у моделюванні – питома теплоємність повітря, теплота спалювання метану, коефіцієнт тепловіддачі з рудничної атмосфери (повітря) у стінки виробки визначаються за експериментальними даними. Швидкість «вигорання» метану $k(T)$ моделюється за законом Арреніуса, має розмірність зворотного часу і цей час критично сильно (експоненційно) залежить від температури.

Попередні розрахунки показують, що повітря у виробці може розігріватися до кількох сотень градусів. Це супроводжується усамітненою хвилею температури і, відповідно густини рудничної атмосфери, а також небезпечним градієнтом тиску.

Розрахунки критичної газодинаміки суміші метану і кисню в гірничих виробках на основі поняття про неізоентропійну течію дозволить виявити, якою буде роль концентрації метану у виробці та теплопередача від газів до стінок виробки в проходження фронту горіння метану, що дозволить надійніше обґрунтувати протипожежні заходи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Пожары в горных выработках. Изоляция аварийных участков.* (2021). Булат А.Ф., Минеев С.П., Смоланов С.Н., Беликов И.Б. Харьков, 730 с.
2. Щетинков Е.С. (1965) *Физика горения газов.* М.: Наука, 739 с.
3. CRC Handbook of Chemistry and Physics/ D. R. Lide (Ed.). (2009). *CRC Press; Taylor and Francis*, (90th edition), 6-17.
4. Кузин В.А. (2014). *Кондиционирование рудничного воздуха: учеб. Пособие.* В.А. Кузин, С.А. Алексеенко, И.А. Шайхлисламова; под общ. ред. В.А. Кузина; М-во образования и науки Украины, Гос.высшее учебное заведение «Нац. горный ун-т», Днепропетровск: НГУ, 367 с.

REFERENCES

1. *Pozhary v gornyh vyrabotkakh. Izolciya avarijnyh uchastkov.* (2021). Bulat A.F., Mineev S.P., Smolanov S.N., Belikov I.B. Har'kov, 730 s.
2. Shhetinkov E.S. (1965) *Fizika gorenija gazov.* M.: Nauka, 739 s.
3. CRC Handbook of Chemistry and Physics/ D. R. Lide (Ed.). (2009). *CRC Press; Taylor and Francis*, (90th edition), 6-17.
4. Kuzin V.A. (2014). *Kondicionirovanie rudnichnogo vozduha: ucheb. Posobie.* V.A. Kuzin, S.A. Alekseenko, I.A. Shajhliislamova; pod obshh. red. V.A. Kuzina; M-vo obrazovaniya i nauki Ukrainy, Gos.vysshee uchebnoe zavedenie «Nac. gornyj un-t», Dnepropetrovsk: NGU, 367 s.

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Вибір параметрів і побудова математичної моделі для дослідження температурного режиму в гірничій виробці, яка заповнена метано-повітряною сумішшю.

Методика. У роботі використані методи термодинаміки і хімічної кінетики.

Результати. В результаті досліджень побудована математична модель самонагрівання рудничної атмосфери, яка містить метан з урахуванням еволюції його концентрації у гірничій виробці.

Наукова новизна. Побудована фізико-математична модель, яка дозволяє дослідити залежність зміни температури у гірничій виробці від хіміко-кінетичних параметрів газів, що її заповнюють, а також врахувати взаємодію рудничної атмосфери зі стінками виробки.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути корисні для досліджень з опису процесу температурного режиму в гірничій виробці при відповідних зовнішніх умовах і на певному інтервалі зміни основних теплофізичних параметрів вугілля і порід, що його вміщують, і можуть бути використані для прогнозу пожежонебезпеки на великих глибинах.

Ключові слова: руднична атмосфера, самонагрівання, метан, пожежа

ABOUT AUTHORS

Feldman Eduard, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, State Scientific Worker, 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

Kalugina Nadiia, Doctor of Engineering Sciences, Scientific Secretary of the 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: kalugina_n_a@ukr.net

Vinnik Olena, 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: lena_vinnik@ukr.net