

by heated objects into the environment; criterion equation describing the accumulated heat rejection process under forced convection. We have designed the mathematical model of formalized description of the process of heat transfer into the surrounding dust-methane-air medium by moving cloud of frictional sparks.

Findings. We have obtained the dependencies for determining the amount of accumulated heat and heat transferred by a friction particle to into the surrounding methane-air medium, and calculation of the time spent on heat transfer into the combustible mixture, allowing taking into account the induction properties of methane-air medium.

Originality. We have developed and theoretically substantiated the formal mathematical model describing the process of heat transfer into the surrounding methane-air medium by the moving cloud of frictional sparks formed as a result of interaction of the cutting tool of the working body of the shearer with gas-saturated rock. It differs from

the existing as it takes into account the induction properties of methane-air medium and allows determining of the range of dangerous levels of thermal parameters capable for the combustible mixture ignition.

Practical value. We have determined the effective measures and means to prevent explosions methane-air mixtures. We have suggested the criterion of methane ignition safety. It allows evaluating the effect of frictional sparking on the ignition of dust-methane-air mixture and determining the level of danger during the gas-saturated rock destruction by cutting tool of the working body of the combine.

Keywords: *friction particle, heat flow, methane-air medium, dust-methane-air mixture inflammation, cutting tool*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.Є. Колесником. Дата надходження рукопису 02.04.13.

УДК 528.8.042: 622.26: 622241.6

К.С. Єлезов

Державний вищий навчальний заклад „Криворізький національний університет“, м. Кривий Ріг, Україна, e-mail: Elezov_K@ukr.net

МАТЕМАТИЧНИЙ МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ОСІДАННЯ ПИЛУ У ВИРОБЦІ

K.S. Yelezov

State Higher Educational Institution “National Technical University”, Kryvyi Rih, Ukraine, e-mail Elezov_K@ukr.net

THE MATHEMATICAL METHOD OF THE DUST DEPOSITION RESEARCH IN AN EXCAVATION

Мета. Визначення швидкості осідання пилу у виробці з урахуванням розміру часток і виду пилу.

Методика. Використання теоретичних та експериментальних методів, зокрема, аналізу існуючих методів вивчення об'єкта, математичного моделювання, апробації у промислових умовах.

Результати. Розроблена методика визначення швидкості осідання пилу з урахуванням часу, положення та зарядженості часток. Встановлена залежність ефективності ослаблення лазерного променя частками пилу з гематитових руд, залістистих кварцитів від розміру цих часток. Розраховано час після проведення вибуху, при якому концентрація пилових часток у виробленому просторі не впливає на проходження лазерного променя. Це забезпечить проведення достовірних замірів камери.

Наукова новизна. Наукова новизна запропонованого методу дослідження швидкості осідання пилових часток полягає в математичному моделюванні поведінки пилових часток незначних розмірів, частина з яких рухається вгору, а частина – вниз, з урахуванням щільності часток, що дозволяє визначити швидкість їх руху. На основі цього вперше встановлено час, за якого точність системи оперативного сканування не залежить від концентрації пилу у виробленому просторі після масового вибуху.

Практична значимість. Створення методу дослідження, що дозволяє вирахувати час, після якого більшість часток осідає й залишаються частки, які дають однакову кількість розсіяного „вперед“ і „назад“ світла. Їх вплив на проходження лазерного променя буде незначним. Необхідне вимірювання для визначення параметрів очисної камери, що проводять за допомогою лазерних далекомірів, потрібно проводити по закінченню не менше, ніж 24 години після вибуху. У цьому випадку внесок частинок у світовий потік, що проходить, буде мінімальним, і помилка у вимірах буде мінімальною.

Ключові слова: *пилові частки, концентрація, швидкість осідання, час осідання*

Постановка проблеми. При сучасних системах розробки рудних покладів камерними системами для

умов шахт Кривбасу актуальною задачею є визначення параметрів очисної камери, що проводять за допомогою лазерних далекомірів. Щоб уникнути по-

хибок вимірювання, необхідно знати швидкість і час осідання пилових часток.

Аналіз поставленої проблеми. Вибір правильного методу визначення вироблених просторів для конкретних умов виробництва досить швидко та об'єктивно розв'яже такі задачі, як: визначення контурів і глибини пустоти (прив'язка та оконтурювання підземних пустот); визначення форм і розмірів (товщі) ціликів між підземними пустотами та уступами кар'єру; контроль за станом (змінюючи форми й розміри) пустоти у процесі ведення повторних гірничих робіт; оцінка об'ємів пустот з метою їх локалізації, контроль за ступенем локалізації; співвідношення умов місцезнаходження пустот з денною поверхнею (на планах і розрізах) з метою попередження раптового утворення воронки на денній поверхні.

Для визначення форми та розмірів пустот автором запропоновано використання системи оперативного сканування, до якої пред'являється умова наявності відкритого очисного простору, що утворюється в результаті відбійки віялами глибоких свердловин. Проаналізувавши сучасні системи розробки, що використовуються на підприємствах Криворіжжя, можна зробити висновок, що застосування системи доцільно для підповерхово-камерних та поверхово-камерних систем розробки.

Для вимірювання параметрів пустоти системою оперативного сканування використовують існуючі свердловини глибокого буріння, які залишають після відбійки руди, що мають вихід у порожнину. При цьому лазерний далекомір обладнують модульною штангою, яку виконують з можливістю регулювання її довжини від устя свердловини до її контакту з пустотою. При використанні лазерного далекоміра виникає питання точності зйомки з урахуванням проходження лазером виробленого простору.

Виділення невирішеної проблеми. Питанням визначення підземних пустот займалися багато науково-дослідних інститутів та установ, таких як НДГРІ, ІГД „Ім. Скочинського“, ДонУГІ, НГУ, ІГТМ ім. Полякова та ін. У науковій літературі велика кількість робіт присвячена методикам визначення підземних просторів. Це роботи Анцибора В.Я., Вілчула Ю.Г., Горбатікова А.В., Горобців А.А., Грузинського Н.П., Зубова В.М., Зуйкова І.В., Казікаєва Д.М., Козаковського Д.А., Ларіна Н.О., Назаренка В.О., Оглобліна Д.Н., Руднева Л.Н., Сидоренка В.Д., Сазонова В.А., Федоренка П.Й., Цариковського В.В., Чистякова Є.П., Шеховцева Г.А. та інших.

Важливим елементом управління геомеханічним станом надр є контроль відповідності фактичних розмірів очисного простору їх проектним значенням. Складність такого контролю полягає в тому, що всі елементи очисного простору є недоступними для проведення вимірювальних робіт. Тому дуже цікавим є метод зйомки очисних камер професорами Криворізького національного університету А.А. Азаряном і С.О. Поповим [1], які пропонують систему дистанційного сканування й визначення їх дійсних розмірів „Геоскан-1“. Дана система включає лазерний далекомір, систему позиціону-

вання далекоміра; систему управління позиціонуванням далекоміра; кишеньковий персональний комп'ютер (КПК), що дозволяє формувати тривимірні комп'ютерні графічні моделі пустот на підставі вимірювання відстаней від точки установки далекоміра в камері (без виходу до камери людини) до стінки пустоти при заданих кутах позиціонування далекоміра. При цьому можна з високою точністю встановити конфігурацію стінок камер і відхилення розмірів камер від проектних, крім того, за наслідками сканування, автоматично розраховується об'єм камери.

Недоліком вище означеного методу є зйомка з однієї точки стояння. Автором запропонована система оперативного сканування [2] для визначення параметрів виробленого простору з різних точок за рахунок використання віяла свердловин. Економічність методу полягає в тому, що не потрібне спеціальне буріння свердловин, використовуються свердловини глибокого буріння, що залишилися в результаті відбійки рудного масиву й мають контакт з виробленим простором. Доцільність використання лазерного далекоміру підтверджується нижченаведеними виразами.

Особливість системи оперативного сканування полягає в тому, що отримання достовірних даних про дійсні розміри вимірюваної пустоти проводиться за рахунок можливості точної прив'язки координат точки встановлення далекоміра у свердловині до системи координат шахтної маркшейдерської мережі. При цьому повністю виключається необхідність знаходження людини в небезпечній зоні. Система оперативного сканування включає наступні елементи: лазерний далекомір „Leica D8 BT“; телескопічну штангу для позиціонування далекоміра; портативний комп'ютер (ПК). Поставлена задача досягається за рахунок розміщення лазерного далекоміра у свердловині, що пов'язана з виробленим простором, спрямування променя лазерного далекоміра на протилежну стінку пустоти для вимірювання відстані до неї, розрахунок параметрів пустоти. Для вимірювання параметрів пустоти використовують існуючі свердловини глибокого буріння, які залишають після відбійки руди, що мають вихід до пустоти. При цьому лазерний далекомір обладнують телескопічною штангою, яку виконують з можливістю регулювання довжини від устя свердловини до її контакту з пустотою.

Використання даного способу для виміру параметрів підземних пустот забезпечує можливість оперативного отримання точних даних про фактичну конфігурацію пустоти завдяки наявності доступу до пустоти через віяло свердловин глибокого буріння.

Формулювання мети роботи. Повітря у виробленому просторі є достатньо неоднорідним. Тому виникає розсіяння світла лазерного променя. У результаті розсіяння виникає багато явищ, що, зазвичай, не пов'язують із розсіянням: 1) дифузне віддзеркалення шорсткими поверхнями; 2) дзеркальне відображення й заломлення на оптично гладких межах розділу поверхонь. Саме ці явища відбуваються при віддзерка-

ленні лазерного променя від стінок виробки. Розглянемо останній приклад детальніше. Напрями відбитого й заломленого променів на рис. 1 визначаються законом дзеркального відображення та законом Снелліуса. Ці закони можна вивести з детального розгляду молекулярної будови речовини при проходженні через неї електромагнітних хвиль.



Рис. 1. Віддзеркалення та заломлення лазерного променя на оптично гладкій межі розділу поверхонь

Будь-яке середовище, на яке падає світло (рис. 1), складається з великого числа атомів (молекул). Електромагнітне поле поблизу даного атома призводить у ньому до зміни дипольного моменту. Він, у свою чергу, призводить до появи вторинного дипольного випромінювання.

При аналізі взаємодії світла з оптично гладкою межею розділу поверхонь передбачається, що середовище, яке заломлене (або відображене), є ідеально однорідним. У той же час воно однорідне лише у статичному сенсі. Поверхня виробки складається з безлічі дрібних кристалів, що мають різні фізичні властивості і, отже, по-різному відображатимуть лазерний промінь.

Лазерний промінь у виробці розповсюджується в повітрі, що містить різні пилові часточки. Їх концентрація може коливатися у значних межах. У цьому випадку повітря у виробці є неоднорідним середовищем з усередненим показником заломлення лазерного променя n_v . Показник заломлення лазерного променя n_v більше одиниці. Швидкість розповсюдження лазерного променя у виробці дорівнює

$$V_l = C / n_v,$$

де V_l – швидкість розповсюдження лазерного променя у виробці; C – швидкість світла у вакуумі.

У такому випадку шлях, пройдений лазерним променем за час t , визначається рівнянням

$$L = V_l \cdot t = \frac{C \cdot t}{n_v}.$$

Наявність часточок пилу на шляху лазерного променя призводить до його ослаблення (розсіяння + „дійсне“ („чисте“) поглинання). Основною проблемою тут є завдання щодо взаємодії світла довільної довжини хвилі з окремою часточкою, що занурена до однорідного середовища.

Для забезпечення достовірності отриманих розрахунків параметрів виробленого простору необхідно враховувати концентрацію пилу у виробці, щоб мати скореговані значення. Тому необхідність визначення часу та швидкості осідання часток є актуальним питанням, вирішення якого дозволить мінімізувати похибки вимірювання.

Викладення основного матеріалу. Проходження лазерного променя у виробці істотно залежить від запиленості повітря у ній. Після вибуху концентрація пилу у виробці буде максимальною. Далі часточки пилу будуть осідати. Кожна частка осідає із власною стаціонарною швидкістю. Визначимо зміну концентрації пилу у виробці з часом. Розглянемо циліндр висотою h з постійним перетином S , що містить n_o часточок однакового розміру (рис. 2). При перемішуванні часток та відсутності зовнішніх сил, крім сили тяжіння, число часток, що рухаються вгору й перетинають площину S , розташовану на деякій висоті h_1 перпендикулярно осі циліндра, буде дорівнювати числу часток, що рухаються вниз. Отже, для деякого нескінченно малого проміжку часу dt , зміна dn числа часток, які пройшли через перетин S у припущенні, що швидкість часточок вгору та вниз різні, визначається рівнянням

$$dn = \frac{1}{2} CSU_{\text{вг}} dt - \frac{1}{2} CSU_{\text{вн}} dt,$$

де C – концентрація часточок (г/см^3); $U_{\text{вг}}$ – швидкість часточок, що рухаються вгору (см/с); $U_{\text{вн}}$ – швидкість часточок, що рухаються вниз (см/с).

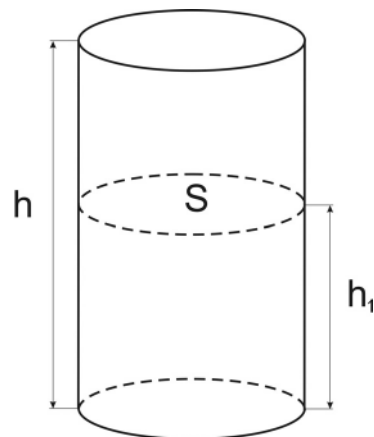


Рис. 2. До розрахунку зміни концентрації пилових часточок у виробці з часом

За наявності деякого силового поля (наприклад, поля сили тяжіння) частинки отримують деяку додаткову швидкість U руху вниз, тоді

$$dn = \frac{1}{2}CS(U_{\text{вн}} - U)dt - \frac{1}{2}CS(U_{\text{вн}} + U)dt.$$

При відомій концентрації C число часток n у виділеному циліндрі дорівнює

$$n = CSh. \quad (1)$$

З урахуванням математичних перетворень рівняння (1), і того, що $U_{\text{вн}} = U_{\text{вн}}$, маємо наступне рівняння

$$ShdC = -U\tilde{N}Sdt, \quad (2)$$

де dC – зміна концентрації часток за проміжок часу dt . Звідси

$$\frac{dC}{C} = -\frac{U}{h}dt. \quad (3)$$

Якщо частки не взаємодіють між собою, то стаціонарна швидкість осідання U не залежить від часу осідання, положення та концентрації часток. Для незаряджених часток, враховуючи рівність (3), маємо наступне рівняння

$$C = C_0 e^{-\frac{U}{h}t}, \quad (4)$$

де C_0 – концентрація часток ($г/см^3$) при $t_0 = 0$; e – основа натуральних логарифмів.

Розглянемо чисельний приклад. Частинки пилу будуть осідати зі швидкістю, що визначається за формулою Стокса

$$U = kg r^2 \frac{\rho - \rho_0}{\mu} = \frac{2}{9} \times \frac{\rho - \rho_0}{\mu} \times r^2 \times g, \quad (5)$$

де U – швидкість осідання; g – прискорення сили тяжіння; r – радіус частки; ρ, ρ_0 – щільність, відповідно, повітря та пилових часток; k – коефіцієнт, що залежить від форми часток. Він, приблизно, дорівнює $2/9$ для часток круглої форми.

За даними, наведеними в роботі Савельєва І.В., при $t = 20^\circ\text{C}$ щільність повітря дорівнює $\rho = 0,0012 \text{ г/см}^3$ і нею в нашій задачі можна знехтувати, динамічна в'язкість повітря $\mu = 1,83 \cdot 10^{-4} \text{ г/см} \cdot \text{с}$, для частки SiO_2 (за матеріалами Єлезова К.С.) $\rho = 2,65 \text{ г/см}^3$, $r = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$.

Стаціонарна швидкість осідання часток дорівнює, см/с

$$U = \frac{2}{9} \cdot \frac{2,65}{1,83 \cdot 10^{-4}} \cdot (5 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 981 = 0,79.$$

А для часток радіуса $r = 10^{-3} \text{ см}$ $U = 78,92 \text{ см/с}$. Обчислимо концентрацію часток через $t = 3 \text{ години} = 10800 \text{ сек}$ при $h = 20 \text{ м} = 2 \cdot 10^3 \text{ см}$ з $r = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ маємо, мг/м^3

$$C = 100 \cdot e^{(-0,79 \cdot 10800 / 2 \cdot 10^3)} = 100 \cdot e^{-4,3} \approx 1,5.$$

Для часток з $r = 10^{-3} \text{ см}$ через $t = 1800 \text{ с}$

$$C = 100 \cdot e^{(-0,78,92 \cdot 1800 / 2 \cdot 10^3)} \approx 0.$$

Для часток гематиту картина буде схожою [4], оскільки щільність Fe_2O_3 $\rho = 5,04\text{--}5,27 \text{ г/см}^3$. Отже, частки зазначених розмірів будуть випадати ще швидше. Інакше поведуться частинки диму, щільність речовини якого значно менша. Середня щільність димових частинок $\rho \approx 1 \text{ г/см}^3$. У цьому випадку для частинок з $r = 0,375 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ стаціонарна швидкість осідання $U = 2,07 \cdot 10^{-2} \text{ см/с}$. При початковій концентрації $C_0 = 50 \text{ мг/м}^3$ через 3 години концентрація стане рівною, мг/м^3

$$C = 50 \cdot e^{-2,07 \cdot 10^{-2} \cdot 10800 / 2 \cdot 10^2} = 50 \cdot e^{-0,112} = 49.$$

Визначивши концентрацію часток через задані проміжки часу в 6, 9, 13, 17, 19 та 24 години, отримаємо відповідні значення концентрації часток, що наведені в таблиці.

Таблиця

Зміна концентрація пилу (C) у виробці з часом (t)

t , години	3	6	9	13	17	19	24
C , мг/м^3	49	40	35	31	27	25	20

Через 9 годин усі частинки з $r > 1 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ осядуть у виробці. Необхідний вимір потрібно проводити по закінченню не менше, ніж 24 години після вибуху, тому, що концентрація часток, які постійно рухаються у виробці, буде становити менше 20 мг/м^3

Висновки. У повітрі залишаться частинки менших розмірів і частки диму з $r \leq 1 \cdot 10^{-4} \text{ см}$. Для лазерного променя ці частки дають однакову кількість розсіяного „вперед“ і „назад“ світла, тому їх вплив на проходження лазерного променя буде незначним. При концентрації C менше 20 мг/м^3 частки є незалежними чинниками розсіювання лазерного променя, їх вплив на нього буде мінімальним, тому помилка у вимірах буде мінімальною.

Список літератури / References

1. Азарян А.А. Система сканирования очистных камер „Геоскан-1“ / А.А. Азарян, С.О. Попов // Збірник НДГРІ – 2010 р. – № 52 – С. 180–186.

Azaryan, A.A. and Popov, S.A. (2010), “Geoskan-1, a system for shrink stopping scanning”, *Proceedings NDHRI*, no. 52, pp. 180–186.

2. Дистанційне сканування виробленого простору з використанням свердловин глибокого буріння / В.Д. Сидоренко, М.В. Шолох, К.С. Єлезов, В.М. Пільтек // Гірничий вісник. – 2013. – № 96. – С. 188–191.

Sidorenko, V.D., Sholokh, M.V., Yelezov, K.S. and Piltek, V.N. (2013), "Remote scanning of mined-out space by means of deep well drilling", *Mining Gazette*, no. 96, pp. 188–191.

Цель. Определение скорости оседания пыли в выработке с учетом размера частиц и вида пыли.

Методика. Использование теоретических и экспериментальных методов, в частности, анализа существующих методов изучения объекта, математическое моделирование, апробации в промышленных условиях.

Результаты. Разработана методика определения скорости оседания пыли с учетом времени, положения и заряженности частиц. Установлена зависимость эффективности ослабления лазерного луча частицами пыли из гематитовых руд, железистых кварцитов от размера этих частиц. Рассчитано время после проведения взрыва, при котором концентрация пылевых частиц в выработанном пространстве не влияет на прохождение лазерного луча. Это обеспечит проведение достоверных измерений камеры.

Научная новизна. Научная новизна предложенного метода исследования скорости оседания пылевых частиц состоит в математическом моделировании поведения пылевых частиц незначительных размеров, часть из которых движется вверх, а часть – вниз, с учетом плотности частиц, что позволяет определить скорость их движения. На основе этого впервые установлено время, при котором точность системы оперативного сканирования не зависит от концентрации пыли в выработанном пространстве после массового взрыва.

Практическая значимость. Создание метода исследования, который позволяет высчитать время, после которого большинство частиц осядут, и останутся частицы, которые дают одинаковое количество рассеянного „вперед“ и „назад“ света. Их влияние на прохождение лазерного луча будет незначительным. Необходимое измерение для определения параметров очистительной камеры, которое проводят с помощью лазерных дальномеров, нужно проводить по окончании не менее, чем 24 часа после взрыва. В этом случае вклад частиц в проходя-

щий световой поток будет минимальным, и ошибка в измерениях будет минимальной.

Ключевые слова: пылевые частицы, концентрация, скорость оседания, время оседания

Purpose. Determination of dust sedimentation time taking into consideration the size of particles and type of dust.

Methodology. We have used theoretical and experimental methods in particular, analysis of existing methods of study, mathematical simulation, and field testing.

Findings. We have developed the method of estimation of the speed of dust sedimentation taking into consideration time, location and charge of the particles. We have found out that the ability of the dust consisting of the particles of hematite ore and jaspilite to attenuate the laser ray depends on the size of the particles. We have calculated the time period after explosion required to reach the concentration of dust particles in the goaf which doesn't influence the passage of the laser ray. This can ensure reliable measurement of the camera with minimal errors.

Originality. The study of dust particles sedimentation has been carried out using the mathematical modeling of the dust particles behavior, when some of them move up and some move down, taking into account particles density. This allows us to determine the speed of their movement based on the initial concentration of dust.

Practical value. We have developed the research method allowing us to calculate the time period after which most of the particles will settle. And in the air there only particles which make the same amount of 'front' and 'back' scattered light will remain. Their influence on the passage of the laser ray is negligible. So, the necessary measurements should be carried out in not less than 24 hours after the explosion. In this case the error in the measurements is minimal.

Keywords: dust particle concentration, sedimentation rate, settling time

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук П.Й. Федоренком. Дата надходження рукопису 12.03.13.