

Для одних і тих же діаметрів частинок щебеню великі значення радіальних напружень досягаються в ґрунті з меншим вмістом порового простору, тобто з більшою щільністю.

При збільшенні діаметра частинок відбувається падіння напруги як в ґрунті, так і на самі частки, але великі частки проникають в ґрунт на великі відстані. Глибина проникнення для розглянутих діаметрів складає від 3 до 7,5 діаметрів.

При проникненні щебеню в ґрунт відбувається його ущільнення, причому на однакових відстанях великі значення об'ємної деформації досягаються в ґрунті з більшою вільною пористістю.

#### Список літератури

1. Зельдович Я.Б. Движение газа под действием кратковременного давления (удара) //Акустический журнал, № 1, вып. 28, 1956. – С. 31 -38.
2. Станкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды. М.: «Наука», 1971. – 854 с.
3. Рахматуллин Х.А., Шапиро Г.С. распространение возмущений в нелинейной упругой среде // Изв.АН СССР,ОТН, №2, 68, 1955. – С. 23 – 31.
4. Александров Е.В., Соколинский В.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. М.: Наука, 1969. – 200с.
5. Сагомоян А.Я. Проникание. М.: Из-во Моск. ун-та, 1974.
6. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1989. - 543 с.
7. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989. – 256 с.
8. Механический эффект взрыва в грунтах / Лучко И.А., Плаксий В.А., Ремез Н.С. и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 232 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Соболевим В.В.  
Надійшла до редакції 10.11.10*

УДК 622.235.67:504.3

© В.В. Марченко, Я.Я. Лебедев, Г.П. Кривцун

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІНОСУ ШКІДЛИВИХ ДОМІШОК З ПІДІРВАНОЇ ГІРСЬКОЇ МАСИ В АТМОСФЕРУ РОБОЧИХ ПЛОЩАДОК КАР'ЄРУ**

Приведены результаты исследований процесса накопления вредных примесей в свободном пространстве взорванной горной массы и выноса их в атмосферу рабочих площадок карьера.

Приведені результати досліджень процесу накопичення шкідливих домішок в вільному просторі підірваної гірської маси і виносу їх в атмосферу робочих площадок кар'єру.

The results of researches of process are resulted accumulation of harmful admixtures in free space of the mountain mass and bearing-out of them blown up in the atmosphere of working grounds of quarry.

**Вступ.** Одним з головних напрямків технічного прогресу в гірничодобувній промисловості є переважний розвиток відкритого способу розробки родовищ. Завдяки розвинутій індустріальній базі України і значним запасам корисних копалин, розташованих на незначних глибинах, цим способом у даний час видобувається більш 75% від загального обсягу твердої мінеральної сировини, споживаної промисловістю.

Розвиток видобутку корисних копалин відкритим способом пов'язаний з впровадженням сучасних засобів і методів ведення гірничих робіт, підвищенням концентрації і інтенсифікації очисних робіт. Всі ці зміни істотно впливають на якість повітря робочих зон видобувних дільниць і кар'єрів в цілому.

Аналіз причин нещасних випадків і професійних захворювань показав, що одною з них є велика кількість випадків асфіксії кар'єрного персоналу оксидом вуглецю, який виділяється при вторинному виході його в кар'єрну атмосферу з відбитої гірської маси.

Поліпшити умови праці за сучасної технології ведення відкритих гірничих робіт можливо лише шляхом розробки способів і засобів, які враховують наявний стан умов праці робітників кар'єру та особливості основних технологічних процесів в кар'єрах з різними умовами.

Вивченню процесів, які відбуваються в кар'єрному середовищі при відкритій розробці родовищ корисних копалин, присвячена значна кількість досліджень. Відомо, що масові вибухи при видобутку корисних копалин значно впливають на склад повітря робочих зон кар'єрів, де здійснюється навантаження автосамоскидів і транспортування гірської маси. Проте, дотепер, при контролюванні якості повітря після масових вибухів, не враховуються вторинні викиди оксиду вуглецю, що призводить до нещасних випадків пов'язаних з отруєнням робітників.

Вищенаведене обумовлює актуальність проведення досліджень спрямованих на поліпшення умов праці на робочих місцях.

**Постановка задачі.** Для встановлення закономірностей процесів, які впливають на санітарно-гігієнічні умови праці в робочих зонах площадок кар'єру і розробки на їхній основі способів і засобів, що забезпечують нормативні параметри середовища при основних технологічних процесах у кар'єрах необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити математичну модель газодинамічних явищ у підірваній гірській масі, які виникають після регламентованого за часом провітрювання робочої зони кар'єру;

- визначити кількісні і якісні характеристики явищ виносу шкідливих домішок в атмосферу кар'єра з метою врахування їх при розробці засобів і заходів поліпшення умов праці на робочих місцях.

#### **Результати роботи.**

Для з'ясування причин суттєвого підвищення концентрації токсичних домішок в атмосфері робочих площадок кар'єру після регламентованого за часом провітрювання робочих місць, що виникають у процесі екскавації гірської маси, були проведені дослідження. У результаті досліджень було встановлено, що виділення оксиду вуглецю з підірваної гірської маси відбувається згідно з першим законом Фіка, який для одномірного стаціонарного випадку є основним законом концентраційної дифузії [1]

$$j = -D[\text{grad } c] = -D \frac{dc}{dl} \quad (1)$$

де  $j$  – щільність дифузійного потоку,  $1/(c \cdot m^2)$ ;  $D$  – коефіцієнт дифузії,  $m^2/c$ ;  $dl$  – відстань між обсягами, які дифундують  $m$ .

Різниця в кількості газу у вільному просторі між кусками підірваної гірської маси  $c$  і в мікропорах (тріщинах)  $c_1$  складає  $\Delta c = c - c_1$ .

Витікання газу з підірваної гірської маси відбувається доти, поки тиск у макро- і мікропорах не стане дорівнювати атмосферному тиску. В зв'язку з вищеведеним початкові й граничні умови процесу витікання токсичного газу з мікропор гірської маси в її вільний простір представляються наступною математичною моделлю:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} D \operatorname{grad} c - c_1 &= f(c, a), \quad p > 0, \quad \tau > 0, \\ \frac{\partial a}{\partial \tau} &= f(c, a), \quad p > 0, \quad \tau > 0, \\ c &= 0, \quad a = 0, \quad p > 0, \\ D \frac{\partial c}{\partial x} &= \beta(c_0 - c), \quad p > 0, \quad \tau > 0, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\partial a / \partial \tau = f(c, a)$  – рівняння кінетики десорбції з урахуванням прийнятого допущення в тім, що з мікропор десорбується один компонент;  $\tau$  – час виділення відносної кількості газу з частки підірваної гірської маси, хв.;  $p$  – тиск газу, Па;  $\beta$  – коефіцієнт зовнішнього масообміну, віднесений до одиниці обсягу сорбенту (підірваної гірської маси);  $a$  – концентрація токсичного газу в складі сорбенту,  $г/см^3$ ;  $a_0$  – початкова концентрація токсичного газу в складі сорбенту,  $г/см^3$ ;  $c$  – концентрація токсичного газу в складі рухливої суміші,  $г/см^3$ ;  $c_0$  – початкова концентрація токсичного газу в складі рухливої суміші,  $г/см^3$ .

До кінетики сорбційних процесів правомірний такий же підхід, як і до гетерогенних, де розрізняють два граничних випадки взаємодій рухливого і нерухомого середовищ: дифузійну і хімічну кінетики [2]. При дифузійній кінетиці, швидкість сорбції обмежується швидкістю дифузії часток, які сорбуються до місць сорбції і залежить від швидкості потоку, щільності, в'язкості, маси часток, геометричних факторів. Дифузійна кінетика при наявності внутрішньої пористості, підрозділяється на дві стадії (зовнішню і внутрішню дифузії). На зовнішньодифузійну стадію істотно впливає гідродинамічний режим, а на внутрішню дифузійну визначальний вплив мають геометричні параметри, які характеризують молекулярну внутрішньопорову дифузійну [3].

При лінійній задачі  $f(c, a) = \gamma c - u a$ , где  $\gamma$  и  $u$  - постійні величини, що визначають швидкість збільшення і зменшення концентрації шкідливого газу в складі сорбенту.

Величина питомої поверхні є однією з найбільш важливих характеристик сорбенту [4], що визначається фізичною структурою сорбенту і його фракційним складом.

Для усереднення задачі (1) використовуємо формулу Гауса-Остроградського і з урахуванням граничних умов, одержимо задачу Коші для системи двох звичайних нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку відносно середніх значень  $\bar{c}(\tau)$  и  $\bar{a}(\tau)$

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{c}}{d\tau} + \beta\bar{c} \frac{\partial S}{S} &= \beta c_0 \frac{\partial S}{S} - f(\bar{c}, \bar{a}), \quad \tau > 0, \\ \frac{d\bar{a}}{d\tau} &= f(\bar{c}, \bar{a}), \quad \tau > 0 \\ \bar{c}(0) &= 0, \quad \bar{a}(0) = a_0 \end{aligned} \quad (2)$$

З урахуванням прийнятих допущень  $c=c(\delta, \tau)$  і відповідно до (1) лінійна задача записується в наступному виді

$$\begin{aligned} D \frac{1}{\delta^2} \frac{\partial}{\partial \delta} \left( \delta^2 \frac{\partial c}{\partial \delta} \right) - \frac{\partial c}{\partial \tau} &= \gamma c - ua, \quad 0 < \delta < d, \quad \tau > 0, \\ \frac{\partial a}{\partial \tau} &= \gamma c - ua, \quad 0 < \delta < d, \quad \tau > 0, \\ c(\delta, 0) &= 0, \quad a(\delta, 0) = a_0, \quad 0 < \delta < d, \quad c(0, \tau) < \infty, \quad \tau > 0, \\ D \delta^2 \frac{\partial c}{\partial \delta} &= \beta \delta^2 (c_0 - c), \quad \delta = d, \quad \tau > 0. \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\delta$  і  $d$  - відповідно, діаметр мікропор і фракцій підірваної маси, см.

З урахуванням припущення, що  $C = \delta c$ ,  $A = \delta a$  для  $C(\delta, \tau)$  и  $A(\delta, \tau)$  початкові граничні умови мають вид

$$\begin{aligned} D \frac{\partial^2 C}{\partial \delta^2} - \frac{\partial C}{\partial \tau} &= \gamma C - ua, \quad 0 < \delta < d, \quad \tau > 0, \\ \frac{\partial A}{\partial \tau} &= \gamma C - uA, \quad 0 < \delta < d, \quad \tau > 0, \\ C(\delta, 0) &= 0, \quad A(\delta, 0) = \delta a_0, \quad 0 < \delta < d, \quad C(0, \tau) = 0, \quad \tau > 0, \\ D \left( \delta \frac{\partial c}{\partial \delta} - C \right) &= \beta \delta (\delta c_0 - C), \quad \delta = d, \quad \tau > 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Допускаючи, що оксид вуглецю не вступає в хімічні реакції, обмежуємося випадком,  $\gamma = 0$ ,  $c_0 = 0$ , коли  $A(\delta, \tau) = a_0 \delta e^{-u\tau}$ , а  $C(\delta, \tau)$  визначається як рішення задачі

$$\begin{aligned} D \frac{\partial^2 C}{\partial \delta^2} - \frac{\partial C}{\partial \tau} &= -\frac{ua_0 \delta}{e^{u\tau}}, \quad 0 < \delta < d, \quad \tau > 0, \\ C(\delta, 0) &= 0, \quad 0 < \delta < d, \quad C(0, \tau) = 0, \quad \tau > 0, \\ D \frac{\partial c}{\partial \delta} - \frac{DC}{d} + \beta C &= 0, \quad \delta = d, \quad \tau > 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Знаходимо рішення задачі (5) і задачі (3) при  $\gamma = 0$  методом поділу перемінних

$$\begin{aligned} c(\delta, \tau) &= 2\beta u a_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[\exp(\gamma_n^2 D \tau) - \exp(u\tau)] [\gamma_n^2 d^2 D^2 + (D - \beta d)^2]^{0.5} \sin(\gamma_n \delta)}{\exp(u\tau - \gamma_n^2 D \tau) (\gamma_n^2 D - u) [\gamma_n^2 d D^2 - \beta(D - \beta d)] \gamma_n \delta} \\ &0 \leq \delta \leq d, \quad \tau \geq 0. \end{aligned} \quad (6)$$

$\gamma_n$  є коренями рівняння  $\operatorname{tg}(\gamma_n d) = \frac{D}{\beta} \gamma_n$ .

Виразення (5) дозволяє визначити інтенсивність потоку шкідливого газу з одиниці поверхні

$$J(\tau) = 2\beta^2 u a_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{D\gamma_n [\exp(-u\tau) - \exp(-\gamma_n^2 D\tau)]}{\gamma_n (\gamma_n^2 D - u) [\gamma_n^2 d D^2 - \beta(D - \beta d)]} \quad (7)$$

Кількість речовини  $q(\tau)$ , що виділяється до моменту часу  $\tau$  визначається з вираження

$$q(\tau) = 0,43 \cdot \pi d^2 a_0 \left\{ d - 4,7 \cdot \beta^2 u D \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\gamma_n^2 D \exp(-u\tau) - u \exp(-\gamma_n^2 D\tau)}{u \gamma_n^2 D (\gamma_n^2 D - u) [d(\gamma_n^2 D^2 + \beta^2) - \beta D]} \right\} \quad (8)$$

Для усередненої концентрації  $\bar{c}(\tau)$  при  $D = \text{const}$  и  $A(c, a) = -ua$  з вираження (2) одержуємо задачу Коші

$$\frac{d\bar{c}}{d\tau} + \left(\frac{D}{\beta d}\right)^2 \bar{c} = \left(\frac{D}{\beta d}\right)^2 c_0 + u a_0 \exp(-u\tau), \quad \tau > 0, \quad \bar{c}(0) = 0, \quad (9)$$

Рішення задачі Коші можна представити в наступному виді:

$$\bar{c}(\tau) = c_0 \left[ 1 - \exp\left(-\tau \frac{D^2}{\beta^2 d^2}\right) \right] + \frac{u a_0 \beta^2 d^2 \left[ \exp(-u\tau) - \exp\left(-\frac{D^2}{\beta^2 d^2} \tau\right) \right]}{D^2 - \beta^2 d^2 u}, \quad \tau \geq 0 \quad (10)$$

Виразення для потоку шкідливого газу з одиниці площі поверхні частки підірваної гірської маси

$$J(\tau) = \beta [\bar{c}(\tau) - c_0], \quad \tau > 0$$

має вид

$$J(\tau) = \frac{\beta^3 d^2 u a_0 \left[ \exp(-u\tau) - \exp\left(-\frac{4D^2 \tau}{\beta^2 d^2}\right) \right]}{4D^2 - \beta^2 d^2 u}, \quad \tau \geq 0 \quad (11)$$

Для визначення загальної кількості шкідливого газу, що виділився до моменту часу  $\tau$  вираження має наступний вид:

$$q(\tau) = S a_0 - \frac{S a_0 (\beta d)^2 \left[ 4 \left(\frac{D}{\beta d}\right)^2 \exp(-u\tau) - \exp\left(-\frac{4D^2}{\beta^2 d^2} \tau\right) \right]}{4D^2 - \beta^2 d^2 u} \quad (12)$$

Винос токсичних газів, десорбованих у вільний простір між кусками підірваної гірської маси, в атмосферу площадок кар'єру здійснюється за законом Вікке [3], відповідно до якого, у випадку наявності збурювань, що порушують сталість концентрацій на границях зони, передній і задній фронти в залежності

від виду ізотерми деформуються (рис. 1). Тому на передньому фронті імпульсу спостерігається уповільнення наростання концентрації, а на задньому – уповільнення її падіння. При цьому на границях газової пробки спостерігається експонентний характер зміни концентрації (рис. 1, графік 2).

Процеси сорбції-десорбції газу на поверхні пористого середовища викликають додатково запізнювання виносу газу щодо моменту початку фільтрації, що приводить до зсуву вихідного імпульсу концентрації (рис. 1, графік 3).

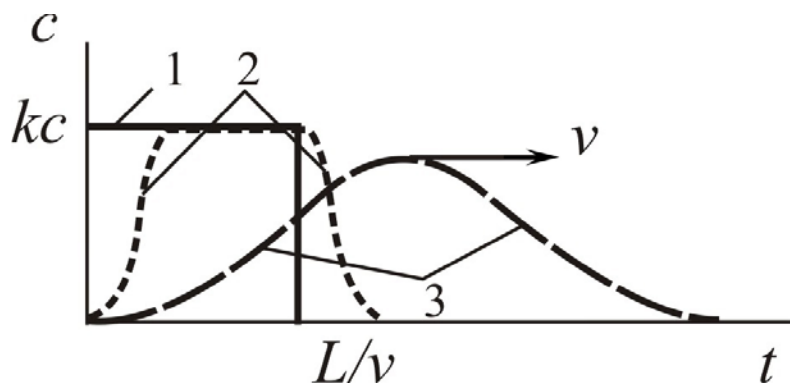


Рис. 1. Зміна концентрації газу в потоці носія на виході з пористого середовища: 1 – ідеалізований імпульс концентрації при відсутності перемішування; 2 – при обліку взаємодії (змішування) газу і фільтраційного повітря на їхніх границях; 3 – при додатковому урахуванні процесів сорбції-десорбції газу в середовищі підірваної гірської маси

Причому час запізнювання, а значить і час настання максимального значення концентрації газу, можуть істотно зміститися в часі в залежності від розмірів мікротріщин і сорбційних властивостей пористого середовища стосовно газу, що, у свою чергу, залежать від температури, тиску і вологості. У результаті зазначеного явища, винос токсичних газів, десорбованих у вільний простір між кусками підірваної гірської маси і, далі, в атмосферу робочих площадок кар'єру має імпульсний характер.

Адекватність вищезазначених процесів, процесам в умовах кар'єру підтверджується натурними вимірами, які виконувались після регламентованого за часом провітрювання співробітниками Криворізького ВГРЗ.

**Висновки.** На підставі виконаних досліджень теоретично обґрунтовано й експериментально встановлено, що при екскавації і транспортуванні підірваної гірської маси, на стан атмосфери на робочих площадках кар'єру, які примикають до заваленого простору, істотно впливає характер виносу десорбованих токсичних газів поглинених поверхнею відбитої гірської маси. Показано, що в результаті явища десорбції, концентрація оксиду вуглецю в атмосфері робочих площадок кар'єру змінюється в часі стрибкоподібно у виді імпульсів.

Розроблена математична модель процесу десорбції і накопичення токсичних газів у вільному просторі між кусками підірваної гірської маси і виносу їх в атмосферу робочих площадок кар'єру, на підставі якої отримані формули для визначення інтенсивності потоку і загальної кількості оксиду вуглецю що виділився до визначеного моменту часу.

#### Список літератури

1. Сахновский В.Л., Умнов А.Е., Куроченко В.М. Интенсификация проветривания глубоких подземных рудников. – М.: Недра, 1992. – 143 с.
2. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Гос. из-во физ.-мат. лит., 1959. – 699 с.
3. Рачинский В.В. Введение в общую теорию динамики сорбции и хроматографии. – М.: Наука, 1964. – 136 с.
4. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. – М.: Химия, 1984. – 592с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бойком В.О.  
Надійшла до редакції 08.10.10*

УДК 622.831.322:532.528

© Ю.А. Жулай, В.В. Зберовский

### **РЕШЕНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ГИДРОИМПУЛЬСНОГО РЫХЛЕНИЯ ВЫБРОСООПАСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ В РЕЖИМЕ ПЕРИОДИЧЕСКИ-СРЫВНОЙ КАВИТАЦИИ**

Рассмотрены проблемы статического и импульсного нагнетания жидкости, а также эффективность использования явления периодически-срывного кавитационного течения жидкости в устройстве импульсного воздействия при гидрорыхлении угольных пластов.

Розглянуто проблеми статичного й імпульсного нагнітання рідини, а також ефективність використання явища періодично-зривного кавітаційного потоку рідини в пристрої імпульсного впливу при гідророзпушуванні вугільних шарів.

The problems of static and pulse modes of fluid injection as well as efficiency of use of phenomenon of periodically stalling cavity fluid flow in pulsed device for hydraulic ripening of coal beds have been considered.

До настоящего времени основополагающим профилактическим мероприятием по борьбе с газодинамическим и пылевым факторами является статическое нагнетание жидкости в угольные пласты. В данных направлениях проведен большой объем научно-технических исследований, на основании которых разработаны нормативные документы, регламентирующие проведение, контроль и оценку эффективности этих работ [1]. Вместе с тем увеличение глубины освоения месторождений, изменение горно-геологических условий и свойств углепородного массива привели к значительному снижению эффективности профилактических мероприятий. При статическом нагнетании имеют место случаи спонтанного прорыва воды в выработанное пространство и преждевременного гидроотжима краевой части пласта с угрозой провоцирования газодинамического явления. Поэтому поиск новых решений в проведении профилактических мероприятий, основанных на гидровоздействии, продолжает оставаться **актуальной задачей**.

Эффективное решение данной проблемы стало возможным после ряда экспериментальных исследований импульсного нагнетания жидкости в угольный массив. Значимые результаты в этом направлении получены в Институте геотехнической механики (ИГТМ) НАН Украины при разработке новых способов и средств гидроимпульсного воздействия, основанных на явлении периодически-