

TECHNICAL SCIENCE

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗНЕПИЛЮВАННЯ ХМАРИ ПІСЛЯ ВИБУХУ В КАР'ЄРІ

Біляєв М. М.

*доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри «Гідравліка та водопостачання»,
Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна*

Біляєва В. В.

*кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос»,
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара*

Берлов О.В.

*кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри «Безпека життєдіяльності»,
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури*

Козачина В. А.

*кандидат технічних наук, доцент,
старший викладач кафедри «Гідравліка та водопостачання»,
Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна*

MODELING OF DUST REMOVAL FROM CLOUD AFTER EXPLOSION IN A QUARRY

Biliaiev M.

*Doctor of Technical Sciences, Professor
Head of The Department «Hydraulics and Water Supply»,
Dnipro National University of Railway Transport
named after academician V. Lazaryan*

Biliaieva V.

*PhD, Associate Professor of The Department «Fluid Dynamics,
Energy and Mass Transfer»,
Oles Honchar Dnipro National University*

Berlov O.

*PhD, Associate Professor of The Department «Workplace Safety and Health»,
State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and
Architecture»*

Kozachyna V.

*PhD, Senior lecturer of The Department « Hydraulics and water supply»,
Dnipro National University of Railway Transport
named after academician V. Lazaryan*

Abstract

The problem of dust removal of clouds in the quarry by water supply is considered. The mass transfer equation is used to calculate the process of dust and water droplet propagation. This modeling equation takes into account convective and diffusion transfer of impurities in atmospheric air. An empirical model is used to calculate the process of interaction between water droplets and dust particles. The air velocity field in the quarry is calculated based on the model of vortex-free flows of a non-viscous fluid (model of potential flow). Differential splitting schemes are used for numerical solution of modeling equations. A computer program was created on the basis of the developed numerical model. The results of a computational experiment are presented.

Анотація

Розглядається задача знепилювання хмари в кар'єрі шляхом подачі води. Для розрахунку процесу розповсюдження пилу та крапель води використовується рівняння масопереносу. Це моделює рівняння враховує конвективний та дифузійний перенос домішки в атмосферному повітрі. Для розрахунку процесу взаємодії крапель води та часток пилу використовується емпірична модель. Поле швидкості повітряного потоку в кар'єрі розраховується на базі моделі безвихрових течій невязкої рідини.

Для чисельного рішення моделюючих рівнянь використовуються різницеві схеми розщеплення. На базі розробленої чисельної моделі створено комп'ютерну програму. Представлено результати обчислювального експерименту.

Keywords: numerical simulation; air pollution, quarry, labor protection, dust reducing

Ключові слова: чисельне моделювання; забруднення повітря, кар'єр, охорона праці, знепилювання.

Постановка проблеми.

Видобуток корисних копалин здійснюється в багатьох країнах світу. Як правило, цей процес видобутку супроводжується інтенсивним забрудненням навколишнього середовища [1, 4, 10, 11]. Відомою проблемою при видобутку копалин є забруднення повітря в робочих зонах, що прилягають до кар'єру [4]. При цьому виникає потреба вирішення декількох важливих наукових задач:

1. Прогнозування забруднення повітря при русі пилогазової хмари після вибуху.

2. Зменшення рівня забруднення повітря шляхом використання різних технічних засобів.

Особливо важливою є роль математичних моделей в таких дослідженнях. Але прогнозування рівня забруднення повітря в робочих зонах при вибухах в кар'єрах на базі чисельних моделей стикається з такими труднощами:

1. Складна геометрична форма кар'єру впливає на формування дуже нерівномірного поля швидкості повітряного потоку, як наслідок – формування нерівномірного концентраційного поля домішки в зоні дослідження.

2. Виникають математичні труднощі при «створенні» геометричної форми кар'єру в дискретній моделі.

3. Має місце суттєва нестационарність процесу поширення домішки в кар'єрі та за його межами після вибуху.

Крім цього, при використанні даного методу виникає серйозна проблема апроксимації моделюючих рівнянь на неортогональних сітках, складність апроксимації граничних умов, що створює значні труднощі при створенні чисельної моделі та коду. Слід зазначити, що, тим не менш, чисельні моделі є найбільш потужним інструментом вирішення задач даного класу.

Для практики важливо мати чисельні моделі, що дозволяють оперативно визначати необхідні параметри забруднення навколишнього середовища у випадку даного типу техногенних викидів, потребують незначного часу на розрахунок та враховують найбільш суттєві фізичні фактори, що впливають на формування зон забруднення.

Мета. Побудова чисельної моделі для експрес розв'язку таких задач:

1. Оцінювання динамки забруднення повітря при русі пилогазової хмари в кар'єрі.

2. Оцінювання ефективності використання подачі води в хмару для зменшення концентрації пилу в повітрі.

Математична модель переносу пилової хмари.

Для експрес розв'язку задачі по оцінці рівня забруднення робочих зон при русі пилової хмари використовується рівняння масопереносу [3, 7, 9, 12]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_s)S}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\delta} \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\delta} \frac{\partial S}{\partial y} \right) \quad (1)$$

де S – концентрація пилу в повітрі (кількість часток/м³), u, v – проекції вектора швидкості повітряного потоку на вісі декартової системи координат; w_s – швидкість гравітаційного осадження пилу; t – час; μ_x, μ_y – коефіцієнти турбулентної дифузії.

Граничні умови для цього рівняння такі [3, 7]:

1) на границі входу повітряного потоку в розрахункову область: $S=0$;

2) на границі виходу потоку з рахункової області: $\left. \frac{\partial S}{\partial n} \right|_{\bar{A}} = 0$;

3) на твердих границях: $\frac{\partial S}{\partial n} = 0$,

де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні.

Для моменту часу $t=0$, початкова умова записується так: $S=S_0$, тобто задається концентрація домішки в хмарі та за допомогою маркерів [7] задається форма хмари, що утворилася в кар'єрі після вибуху.

Для розрахунку нерівномірного поля швидкості повітряного потоку в кар'єрі використовується модель потенціального руху. Моделююче рівняння має вигляд [2, 7]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w)C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\delta} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\delta} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (2)$$

$$u = \frac{\partial P}{\partial x} \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (3)$$

де P – потенціал швидкості.

Граничні умови для рівняння (2) такі [7]:

1) $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ на непроникливих границях;

2) $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ на верхній границі;

3) $P = \text{const}$ на границі «виходу» потоку;

4) $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$ на межі, де потік втікає (V_n – відома швидкість повітряного потоку).

Математична модель знепилювання хмари

В даній роботі розглядається процес знепилювання хмари за рахунок подачі води в зону забруднення. Процес розсіювання крапель води в повітрі моделюється наступним рівнянням масопереносу [3, 7]:

де C – концентрація крапель води в повітрі (кількість крапель/м³); $Q_i(t)$ – інтенсивність подачі води; u, v – проекції вектора швидкості повітряного потоку на вісі декартової системи координат; w – швидкість гравітаційного осадження краплі; t – час; μ_x, μ_y – коефіцієнти турбулентної дифузії x_i, y_i – координати джерела емісії води; $\delta(x - x_i)$, $\delta(y - y_i)$ – дельта-функція Дірака (моделює місце подачі води).

Відзначимо, що якщо насос подає в пилову хмару об'єм води в кількості W м³/с, то інтенсивність подачі крапель води Q_i розраховується так:

$$Q_i = \frac{W}{V} \cdot \frac{\text{крапель}}{c},$$

де V – об'єм краплі води.

Розглянемо розрахунок процесу взаємодії крапель води та часток пилу (рис. 1). В даній роботі для моделювання цього процесу використовується така залежність [8]:

$$Q = \frac{S\pi d^2 \omega \eta}{4}, \quad (5)$$

де Q – кількість часток пилу, що «захоплює» крапля води за 1с, d – діаметр краплі води, ω – відносна швидкість, η – емпіричний параметр ($\eta = 0.48$), S – концентрація часток пилу.

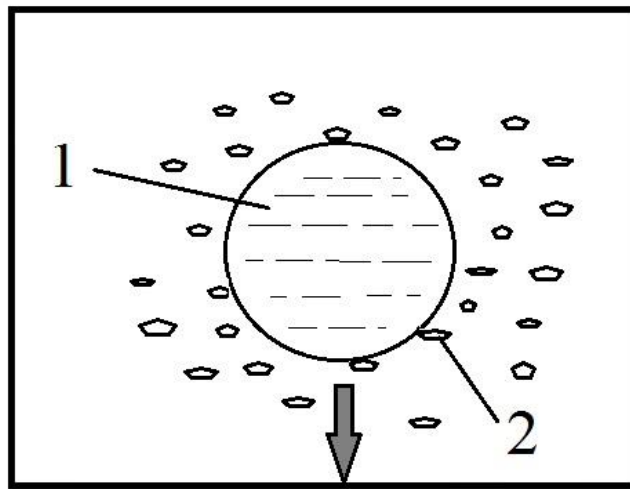


Рис. 1. Розрахункова схема: 1 – крапля води; 2 – частки пилу

Залежність (5) зручна для практичного використання при проведенні інженерних розрахунків. Але завдяки руху повітряних мас концентрація часток пилу та крапель води буде різною для різних моментів часу в різних точках області дослідження. Також буде різною відносна швидкість ω . Тому будемо використовувати залежність (5) у вигляді:

$$Q(x, y, t) = \frac{S(x, y, t)\pi d^2 \omega(x, y)\eta}{4}. \quad (6)$$

Також відзначимо дуже важливий аспект: залежність (5) або (6) не вказує, коли процес «захоплення» часток пилу зупиниться краплею. Далі надається залежність, що дозволяє здійснити оцінювання максимальної масу пилу, що може бути «захоплена» краплею води без її руйнування. Для отримання цієї залежності здійснимо таке міркування. Як відомо, надлишковий тиск всередині краплі розраховується за формулою Лапласа:

$$p_L = \frac{2\sigma}{R}, \quad (7)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу, R – радіус краплі.

За рахунок цього тиску на внутрішню поверхню краплі, що має площу S_k , діє сила:

$$F_L = p_L S_k, \quad (8)$$

З іншого боку, на зовнішню поверхню краплі діє сила тяжіння від часток пилу, що «захоплені» краплею. Якщо сумарна маса цих часток є m , то сила тяжіння така:

$$F_m = mg, \quad (9)$$

Тоді, умова рівноваги має вигляд:

$$F_L = F_m,$$

або

$$\frac{2\sigma}{R} S_k = mg.$$

Звідси визначаємо, що максимальна маса пилу, що може бути утримана на поверхні краплі, без її руйнування, така:

$$m = \frac{2\sigma}{gR} S_k = \frac{8\pi R\sigma}{g}. \quad (10)$$

Ця залежність буде використовуватися при моделюванні процесу знепилювання хмари за рахунок подачі води на базі побудованої чисельної моделі.

Відзначимо, що для практики, коли потрібно проводити значну кількість розрахунків, та при їх проведенні, початкові дані відомі дуже приблизно, пропонується використовувати таку залежність для визначення зменшення концентрації пилу в повітрі з часом:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -k_c C \cdot S, \quad (11)$$

де k_c – емпіричний параметр.

Чисельна модель знепилювання хмари.

Розглянемо питання чисельного рішення моделюючих рівнянь (1), (2), (4). По-перше, для чисель-

ного інтегрування моделюючих рівнянь будимо використовувати кінцево-різницеві методи. Розрахунок здійснюється на прямокутній сітці. Для формування геометричної форми кар'єру використовуються маркери (рис.2) [7]. Маркери також використовуються для того, щоб задати форму хмари, що утворилася після вибуху в кар'єрі.

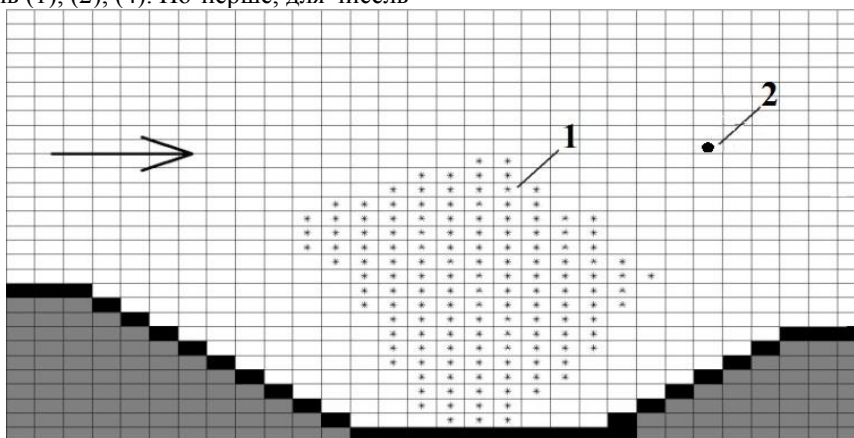


Рис. 2. Схема розрахункової області:
1 – пілогазова хмара; 2 – джерело емісії води для знепилювання.

Для рішення рівняння для потенціалу швидкості запишемо його так [6]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (11)$$

де t – фіктивний час.

Далі, для рівняння (11) здійснимо геометричне розщеплення так [6]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (13)$$

Розрахункові залежності [5, 6] для визначення невідомого значення P на базі рівняння (12) мають вигляд:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + Vt \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + Vt \frac{-P_{i,j}^n + P_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} \quad (14)$$

Розрахункові залежності [5, 6] для визначення невідомого значення P на базі рівняння (13) мають вигляд:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + Vt \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} + Vt \frac{-P_{i,j}^n + P_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \quad (15)$$

Оскільки ми вирішуємо еволюційне рівняння, то розрахунок за залежностями (14), (15) закінчується тоді, коли виконується умова:

$$|P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n| \leq \varepsilon,$$

де ε – мале число; n – номер ітерації.

Швидкість потоку розраховується на межах різниці комірки так:

$$u = \frac{P_{i+1,j} - P_{i,j}}{\Delta x}, \quad v = \frac{P_{i,j+1} - P_{i,j}}{\Delta y}.$$

Для чисельного рішення рівняння переносу (1) здійснимо його розщеплення за фізичними процесами так:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = 0, \quad (16)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right).$$

Перше рівняння з системи (16) показує зміну концентрації домішки за рахунок конвективного

переносу. Друге рівняння з системи (16) показує зміну концентрації домішки внаслідок дифузії.

Далі здійснимо такі перетворення [7]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u S}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ S}{\partial x} + \frac{\partial u^- S}{\partial x}, \\ \frac{\partial v S}{\partial y} &= \frac{\partial v^+ S}{\partial y} + \frac{\partial v^- S}{\partial y}, \\ u^+ &= \frac{u + |u|}{2}, u^- = \frac{u - |u|}{2}, \\ v^+ &= \frac{v + |v|}{2}, v^- = \frac{v - |v|}{2}, \\ \frac{\partial u^+ S}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^+ S_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ S_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ S^{n+1}, \\ \frac{\partial u^- S}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^- S_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- S_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- S^{n+1}, \\ \frac{\partial v^+ S}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^+ S_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^+ S_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ S^{n+1}, \\ \frac{\partial v^- S}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^- S_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- S_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- S^{n+1}.\end{aligned}$$

Схема розщеплення для першого рівняння з системи (16) записується так [7]:

– на першому кроці, різницеве рівняння має вигляд ($k=1/2$):

$$\frac{S_{i,j}^k - S_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ S^k + L_y^+ S^k = 0;$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{S_{i,j}^{n+1} - S_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- S^{n+1} + L_y^- S^{n+1} = 0;$$

Невідоме значення концентрації S на кожному кроці розщеплення визначається за формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного інтегрування другого рівняння з системи (16) використовується двоетапна різницева схема розщеплення [6]:

– на першому етапі різницева схема така:

$$\frac{S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - S_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

– на другому етапі різницева схема така:

$$\frac{S_{i,j}^{n+1} - S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{S_{i+1,j}^{n+1} - S_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{S_{i,j+1}^{n+1} - S_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right]$$

Невідоме значення концентрації пилу, на кожному етапі, визначається з за явною формулою.

Такий підхід використовується для чисельного інтегрування рівняння (4). Це рівняння розщеплюється на три рівняння: рівняння конвективного переносу домішки, рівняння дифузії та наступне рівняння:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$$

Для чисельного інтегрування цього рівняння використовується метод Ейлера [6].

На базі розглянутої чисельної моделі створено комп'ютерний код «PIT-2D». Для створення комп'ютерного коду використовувався FORTRAN.

Методичні розрахунки.

На базі побудованої чисельної моделі було проведено обчислювальний експеримент. Розглядався рух пилової хмари, що утворилася в кар'єрі після вибуху. При проведенні розрахунків прийма-

лося: $\sigma = 73 \cdot 10^{-3}$ Н/м, діаметр краплі води 0.001м, швидкість гравітаційного осадження краплі 0.001м/с, діаметр частки пилу 40мкм, щільність пилу 1500кг/м³.

На рис. 3–5 показано поле концентрації пилу в кар'єрі для різних моментів часу після вибуху (час безрозмірний).

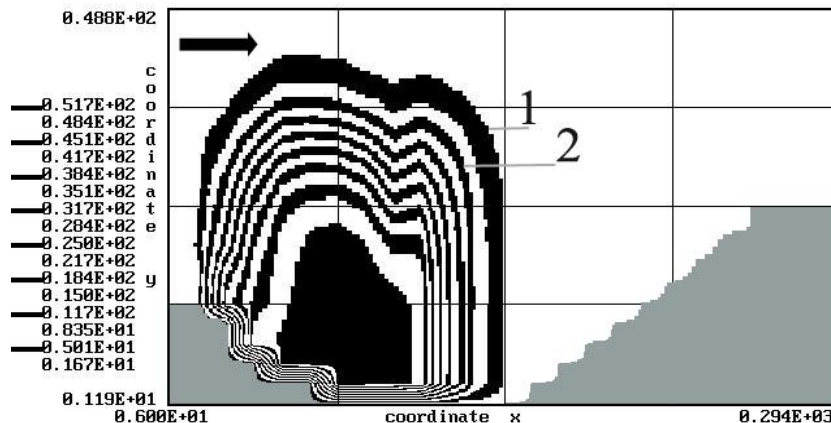


Рис.3. Поле безрозмірної концентрації пилу для моменту часу $t=1.6$ (нема подачі води):

1 – $C=5$; 2 – $C=11.7$

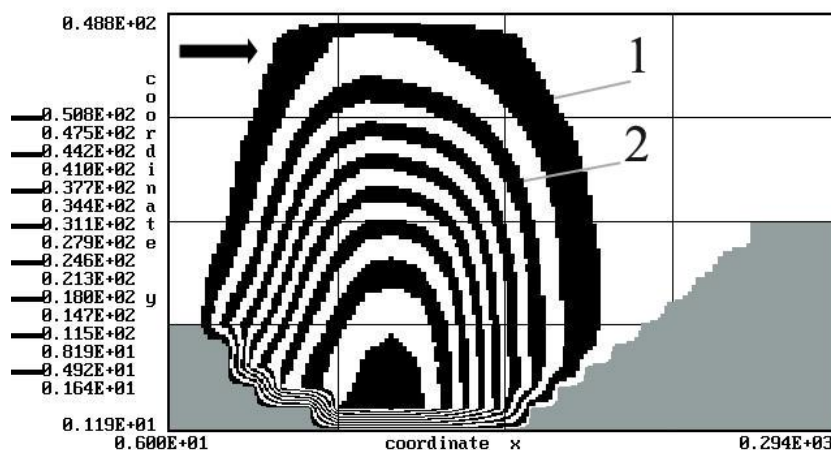


Рис.4. Поле безрозмірної концентрації пилу для моменту часу $t=5.8$ (нема подачі води):
1 – $C=4.9$; 2 – $C=11.5$

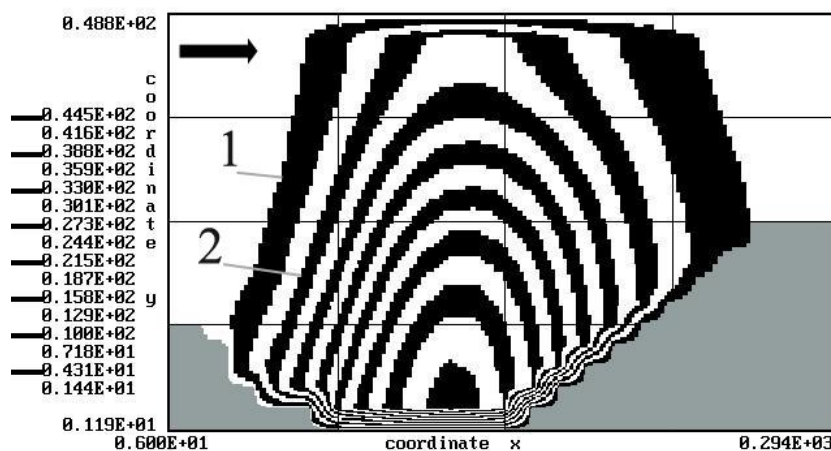


Рис.5. Поле безрозмірної концентрації пилу для моменту часу $t=12.4$ (нема подачі води):
1 – $C=4.3$; 2 – $C=10.0$

Як ми бачимо з рис. 3–5, після вибуху має місце збільшення розмірів хмари внаслідок атмосферної дифузії та її рух в напрямку виходу з кар'єру.

На рис. 3–5 показано поле концентрації пилу в кар'єрі для моменту часу $t=5.8$ після вибуху, але для

двох сценаріїв: подача води в кар'єрі в одній точці (рис. 6) та подача води в двох точках (рис. 7). Ці рисунки потрібно порівняти з рис. 4.

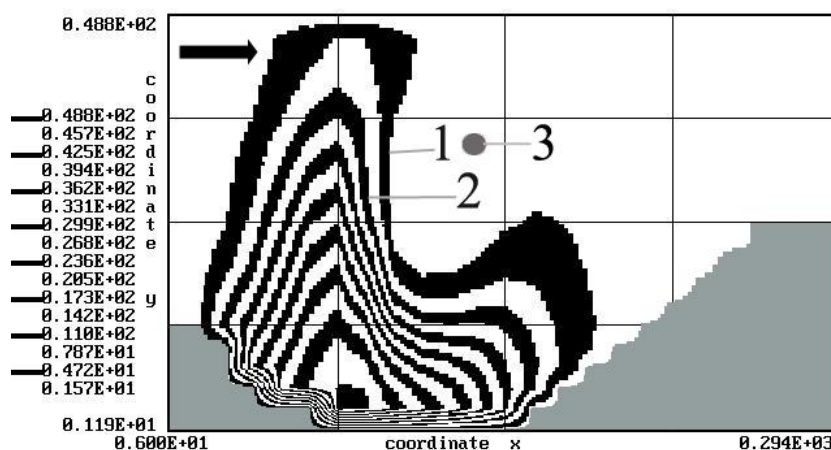


Рис.6. Поле безрозмірної концентрації пилу для моменту часу $t=5.8$ (є подача води в одній точці):
1 – $C=4.7$; 2 – $C=11.0$

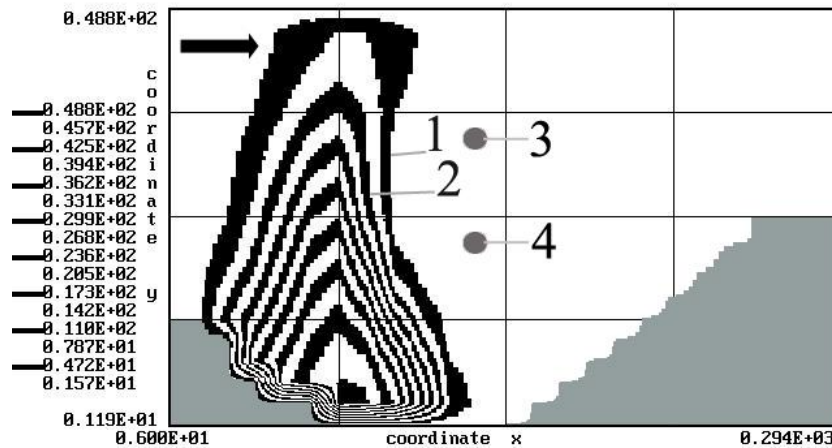


Рис. 7. Поле безрозмірної концентрації пилу для моменту часу $t=5.8$ (є подача води в двох точках):
1 – $C=4.7$; 2 – $C=11.0$

Як можна бачити з наведених рисунків, використання подачі води суттєво зменшує зону пилового забруднення в кар'єрі.

Відзначимо, що час розрахунку – 5с.

Наукова новизна та практична цінність. Розроблена ефективна чисельна модель для моделювання процесу знепилювання хмари при вибухах в кар'єрі шляхом подачі води. Чисельна модель базується на рішенні рівняння для потенціалу швидкості та рівняння масопереносу для пилу та крапель води. Розроблена субмодель, що дозволяє швидко проводити експрес оцінювання процесу знепилювання на комп'ютерах малої та середньої потужності.

В подальшому, слід розвивати даний напрям по створенню 3D чисельної моделі процесу, що досліджується.

Висновки.

1. На основі розробленої математичної моделі розв'язано задачу по розрахунку процесу знепилювання пилової хмари в кар'єрі після вибуху.

2. Результати обчислювального експерименту показують, що розроблена модель дозволяє швидко оцінювати ефективність метода знепилювання хмари шляхом подачі води.

Список літератури:

1. Євдокименко М.Ф., Францев Є.В., Бондар М.В., Курінова М.К. Моніторинг та прогноз стану атмосферного повітря під час проведення масових вибухів у залізрудних кар'єрах кривбасу. гірничий вісник, вип.101, 2016, с.28 – 32.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Лойцянский Л. Г. – Москва : Наука, 1978. – 735 с.
3. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Марчук Г. И. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.

4. Проблемы экологии массовых взрывов в карьерах / Э. И. Ефремов, П. В. Бересневич, В. Д. Петренко и др. / Под ред. Э. И. Ефремова. – Днепропетровск: Сечь, 1996. – 196 с.

5. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – Москва : Мир, 1980. – 616 с.

6. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 616 с.

7. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К. : Наук.думка, 1997. – 368 с.

8. Юрченко А.А. Исследование коэффициента захвата аэрозольных частиц каплями воды при орошении // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. - 2012. - № 39. - С. 187-194. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpngu_2012_39_28

9. Biliaiev M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography, *Air Pollution Modeling and its Application XXI (Springer)*. 2012, – P. 87-91.

10. Suzanne Oudwater. Modeling of Dust Emission in Dimension Stone Quarry. Aalto University, School of Engineering, Espoo 30.09.2017, 88p.

11. Sumanth Chinthala. Particle Dispersion within a Deep Open Cast Coal Mine. <https://www.researchgate.net/publication/274364974>

12. Biliaiev M., Biliaieva V., Berlov O., Kozachyna V., Kirichenko P., Oladipo M.O., Poltoratska V. Modeling Coal Dust Dispersion from Pile with Protection Barriers. E3S Web of Conferences. Vol. 168: 2nd Intern. Conf. Essays of Mining Science and Practice, Dnipro, Ukraine, 22–24 April 2020. P. 1–6.