

Biliaiev M.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.V.

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

Berlov O.V.

*PhD, Associate Professor of The Department «Workplace Safety and Health»,
Prydniprovskya State Academy of Civil Engineering and Architecture*

Kozachyna V.A.

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

NUMERICAL SIMULATION OF DUST POLLUTION OF WORKING PLACE NEAR COAL DUMP

Біляєв Микола Миколайович

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

Біляєва Вікторія Віталіївна

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

Берлов Олександр Вікторович

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

Козачина Віталій Анатолійович

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

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ РОБОЧИХ ЗОН БІЛЯ ШТАБЕЛЮ

DOI: [10.31618/ESSA.2782-1994.2021.1.68.12](https://doi.org/10.31618/ESSA.2782-1994.2021.1.68.12)

Summary. The problem of estimating the level of air pollution in the working areas near the coal pile is considered. The task is to develop a CFD model that allows to predict the level of air dust pollution, taking into account the process of wetting the surface of the coal pile. To model the process of coal dust transfer in the air, a two-dimensional mass transfer equation is used, which takes into account coal dust transfer due to convection and diffusion. The Navier-Stokes equations are used to calculate the air flow field near the coal pile. Finite-difference schemes of splitting are used for numerical integration of modeling equations.

Computer code is developed on the basis of created CFD model. The developed code can be used to analyze the effectiveness of the coal surface wetting to reduce dust pollution of work areas near coal piles. The results of a computational experiment are presented.

Анотація. Розглядається задача оцінювання рівня забруднення повітря в робочих зонах за штабелем вугілля. Ставиться задача розробки CFD моделі, що дозволяє прогнозувати рівень пилового забруднення повітря з урахуванням процесу зволоження поверхні штабелю. Для моделювання процесу поширення вугільного пилу в повітрі використовується двовимірне рівняння масопереносу, що враховує поширення вугільного пилу за рахунок конвекції та дифузії. Для розрахунку швидкості повітряного потоку біля штабеля вугілля використовуються рівняння Нав'є-Стокса. Для чисельного інтегрування моделюючих рівнянь використовуються різницеві схеми розщеплення.

Створено комп'ютерний код на базі розробленої CFD моделі. Розроблений код може бути використаний для аналізу ефективності використання зволоження поверхні вугілля для зниження пилового забруднення робочих зон. Представлені результати обчислювального експерименту.

Keywords: numerical simulation; air pollution, working area, coal pile, labor protection

Ключові слова: чисельне моделювання; забруднення повітря, робоча зона, штабель вугілля, охорона праці

Постановка проблеми.

Відомо, що штабеля вугілля є потужними джерелами забруднення повітря в робочих зонах. З поверхні штабеля вугілля виносяться різні забруднюючі речовини (пил, CO та таке інше). Особливо інтенсивним є пилове забруднення робочих зон біля штабелів вугілля. Прогнозування рівня забруднення повітря біля штабелів є особливо важливою задачею.

Для зменшення рівня пилового забруднення робочих зон використовуються різні засоби: екрани, зволоження поверхні штабелю, використання спеціальних розчинів, що подаються на поверхню штабелю та таке інше. Для практики важливо адекватно оцінювати ефективність цих засобів на етапі розробки проекту захисту повітря від забруднення. Одним з важливих методів такого оцінювання є використання спеціалізованих математичних моделей.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Для прогнозування рівня забруднення повітря при емісії пилу від штабелю використовуються різні математичні моделі, наприклад, модель ОНД-86, модель Гауса, чисельні моделі [1, 2, 3, 7, 8, 12]. Дані

моделі дозволяють при використанні комп'ютерів малої та середньої потужності швидко оцінювати інтенсивність та розміри зон забруднення при тих або інших метеоумовах, інтенсивності джерела забруднення тощо. Моделі потребують використання типової початкової інформації, що є важливим для практики. Але дані моделі важко застосовувати для адекватного оцінювання ефективності використання різних засобів захисту повітря від забруднення. Це пов'язано з тим, що вказані моделі враховують штабель вугілля як «точку», тобто без врахування його геометричної форми та аеродинаміки потоку біля штабелю. Тому виникає важлива проблема по створенню ефективних методів оцінювання ефективності використання різних засобів захисту повітря біля штабелів.

Мета роботи- створення CFD моделі для оцінювання рівня забруднення повітря в робочих зонах біля штабелю вугілля.

Математична модель.

Для оцінювання рівня забруднення повітря біля штабелю вугілля використовуються наступні рівняння [1, 4, 8, 9]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = \frac{1}{Re \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right)} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u C}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} = \text{div}(\mu \cdot \text{grad}C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (3)$$

де $\omega = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$ – вихор;

$Re = V_0 L / \nu$ – число Рейнольдса;

L – характерний розмір;

V_0 – характерна швидкість;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості;

ψ – функція току;

$u = \partial \psi / \partial y$, $v = -\partial \psi / \partial x$ – компоненти вектора швидкості повітряного потоку;

C – концентрація вугільного пилу;

μ_x, μ_y – коефіцієнти турбулентної дифузії;

Q – інтенсивність емісії вугільного пилу від поверхні штабелю;

$\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ дельта функція Дірака;

(x_i, y_i) – декартові координати;

t – час.

Крайові умови для системи рівнянь (1)–(3) наведено в [8].

Як відомо, для зниження інтенсивності пилового забруднення повітря в робочих зонах використовують зволоження поверхні штабелю водою. Для оцінювання ефективності такого

методу захисту побудована субмодель, що використовується сумісно з моделлю (1)–(3). Для побудови субмоделі скористаємось такими міркуваннями. Вода, що потрапила на поверхню штабеля, збільшує вологість W вугілля. Це збільшує значення V_t – «порогове» значення швидкості повітря, після якого починається відрив часток пилу вугілля. Як результат, зменшується інтенсивність Q емісії пилу від поверхні штабелю. При русі повітряних мас над поверхнею штабелю має місце випарювання води. Інтенсивність випарювання залежить від комплексу факторів, але швидкість повітряного потоку має в цьому процесі дуже суттєву роль. Внаслідок випарювання води зменшується вологість W вугілля, що зменшує значення параметру V_t та, як результат, збільшується інтенсивність Q емісії пилу від поверхні штабелю.

Для розрахунку вказаних процесів використовуються такі емпіричні моделі [5, 10, 11]:

$$Q_w = (5,83 + 4,1V) P_H \sqrt{M}, \quad (4)$$

$$V_t = 4,97 + 0,268 \cdot W^{1,58} \quad (5)$$

$$Q = 4.2 \cdot (V - V_t) \quad (6)$$

де Q_w – інтенсивність випарювання води, V – локальна швидкість вітру біля ділянки вугілля; P_H – тиск насиченої пари води; M – молекулярна маса води; V_t – «порогове» значення швидкості, після якого починається відрив часток пилу; W – відносна вологість вугілля; Q – інтенсивність емісії пилу від поверхні штабелю.

Таким чином, рівняння (4) описує інтенсивність випарювання води від поверхні штабелю; рівняння (5) описує зміну «порогового» значення швидкості при зміні відносної вологості вугілля; рівняння (6) описує інтенсивність емісії пилу від ділянки штабелю.

Далі, алгоритм рішення задачі включає такі міркування. Модель будується на базі таких міркувань. Нехай, на поверхню штабеля, що має площину S_{coal} , просочився об'єм води W_{wat} (маса води $M_{water}^n = W_{wat} \cdot \rho$, де ρ – щільність води), а відносна порозність вугілля P_{coal} , то в глибину зона промочування буде дорівнювати:

$$h_{wat} = \frac{W_{wat}}{S_{coal} P_{coal}}$$

При потраплянні об'єму води W_{wat} в штабель, всередині вугілля змінюється його відносна вологість, що розраховується так:

$$W^n = \frac{M_{water}^n + m_0}{M_{coal}} \cdot 100\%,$$

де M_{coal} – маса вугілля в зоні промочування; m_0 – маса води, що була в вугіллі до зволоження.

Якщо здійснено зволоження поверхні штабелю, то алгоритм рішення задачі по визначенню рівня пилового забруднення робочих зон для такого сценарію, наступний:

$$\frac{\omega_{i,j}^k - \omega_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ \omega^k + L_y^+ \omega^k = 0; \quad (9)$$

– на другому кроці розщеплення різницевого рівняння має вигляд:

$$\frac{\omega_{i,j}^{n+1} - \omega_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- \omega^{n+1} + L_y^- \omega^{n+1} = 0. \quad (10)$$

У формулах (9), (10) використовуються такі залежності:

$$\frac{\partial u \omega}{\partial x} = \frac{\partial u^+ \omega}{\partial x} + \frac{\partial u^- \omega}{\partial x},$$

$$\frac{\partial v \omega}{\partial y} = \frac{\partial v^+ \omega}{\partial y} + \frac{\partial v^- \omega}{\partial y},$$

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}, \quad u^- = \frac{u - |u|}{2},$$

$$v^+ = \frac{v + |v|}{2}, \quad v^- = \frac{v - |v|}{2},$$

$$\frac{\partial u^+ \omega}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ \omega_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ \omega_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ \omega^{n+1},$$

1. Визначається локальна швидкість повітряного потоку біля різних ділянок поверхні штабелю (чисельне рішення рівнянь (1), (2)).

2. Визначається маса води dm_0 , що випаровується за проміжок часу dt (рівняння 4).

3. Розраховується відносна вологість вугілля після випарювання води за час dt :

$$W^{n+1} = \frac{M^{n+1} \text{wat} - dm_0}{M_{coal}}$$

4. Розраховується V_t – «порогове» значення швидкості (рівняння 5).

5. Визначається кількість вугілля, що емітована в повітря від ділянки штабелю (рівняння 6).

6. Розрахунок повторюється, починаючи з п.2.

Необхідно підкреслити, що для використання цієї методології дуже важливо розрахувати локальну швидкість повітряного потоку біля поверхні штабелю вугілля. Як це вказувалось раніше – ця задача вирішується на базі рівнянь (1)–(3). Розглянемо методології рішення цих моделюючих рівнянь. Так, для рішення рівняння (1) здійснюється його розщеплення наступним чином:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{1}{Re \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}} \quad (8)$$

Для чисельного рішення рівняння переносу (7) використовується двокрокова схема розщеплення [8]:

– на першому кроці різницевого рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial u^- \omega}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- \omega_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- \omega_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- \omega^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ \omega}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ \omega_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^+ \omega_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ \omega^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- \omega}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- \omega_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- \omega_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- \omega^{n+1}.$$

Невідоме значення ω в кожному рівнянні (9), (10) визначається за формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного рішення рівняння (8) використовується наступна різницева схема розщеплення [6]:

$$\begin{cases} \frac{\omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \omega_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-\omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \omega_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{Re \Delta x^2} \right] + \left[\frac{-\omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \omega_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{Re \Delta y^2} \right], \\ \frac{\omega_{i,j}^{n+1} - \omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{\omega_{i+1,j}^{n+1} - \omega_{i,j}^{n+1}}{Re \Delta x^2} \right] + \left[\frac{\omega_{i,j+1}^{n+1} - \omega_{i,j}^{n+1}}{Re \Delta y^2} \right]. \end{cases} \quad (11)$$

Невідоме значення ω в кожному рівнянні (11) визначається за формулою «рахунку, що біжить». Різницєва схема для чисельного рішення рівняння (2) має вигляд [6, 7]:

$$\frac{\psi_{i+1,j,k} - 2\psi_{i,j,k} + \psi_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{\psi_{i,j+1,k} - 2\psi_{i,j,k} + \psi_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} = -\omega_{ij} \quad (12)$$

Невідоме значення параметра ψ визначається з (12) за явною формулою. Компоненти вектора швидкості повітряного потоку розраховуються так

$$u_{i,j} = \frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}}{\Delta y}, v_{i,j} = -\frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}}{\Delta x}.$$

Для чисельного рішення рівняння (3) По-перше, здійснимо розщеплення на використовуються різницєва схема розщеплення. диференціальному рівні так:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial u c}{\partial x} + \frac{\partial v c}{\partial y} = 0, \quad (13)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial c}{\partial y} \right). \quad (14)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \sum Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i). \quad (15)$$

Тут прийнято позначення $v = v - w$. Для чисельного інтегрування рівняння (13) використовуємо такі залежності:

$$\frac{\partial u c}{\partial x} = \frac{\partial u^+ c}{\partial x} + \frac{\partial u^- c}{\partial x},$$

$$\frac{\partial v c}{\partial y} = \frac{\partial v^+ c}{\partial y} + \frac{\partial v^- c}{\partial y},$$

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}, u^- = \frac{u - |u|}{2},$$

$$v^+ = \frac{v + |v|}{2}, v^- = \frac{v - |v|}{2},$$

$$\frac{\partial u^+ c}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- c}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ c}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- c}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

Схема розщеплення для рівняння (13) – на першому кроці, різницєве рівняння має записується так: вигляд:

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

– на другому кроці розщеплення різницєве рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^n}{\Delta t} + L^-_x C^{n+1} + L^-_y C^{n+1} = 0.$$

Невідоме значення концентрації C в кожному рівнянні визначається за формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного інтегрування рівняння (14) використовується двоетапна різницева схема розщеплення:

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

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

Невідоме значення концентрації пилу визначається з цих залежностей за явною формулою.

Для чисельного інтегрування рівняння (15) використовується метод Ейлера, розрахункова залежність має вигляд

$$C_{ij}^{n+1} = C_{ij}^n + \Delta t \sum Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i).$$

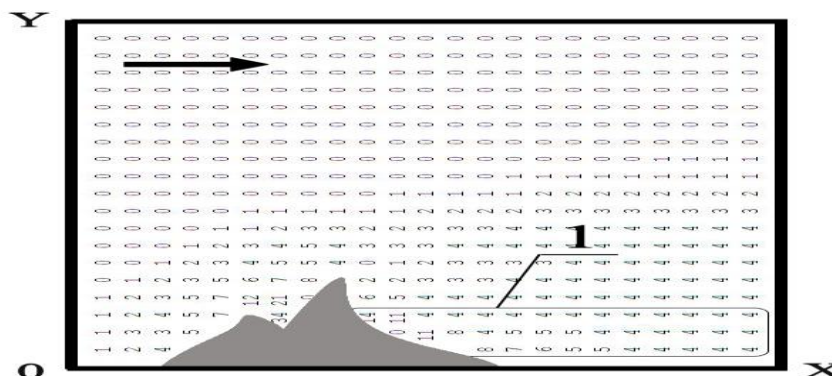
На базі розробленої чисельної моделі створено код "COAL", мова програмування FORTRAN.

Результати.

На базі розробленої чисельної моделі розв'язано наступну задачу. Розглядається штабель вугілля, що має складну геометричну форму та на його поверхню подано $1\text{л}/\text{м}^2$ води. Початкова вологість вугілля 4%; порозність вугілля 10%;

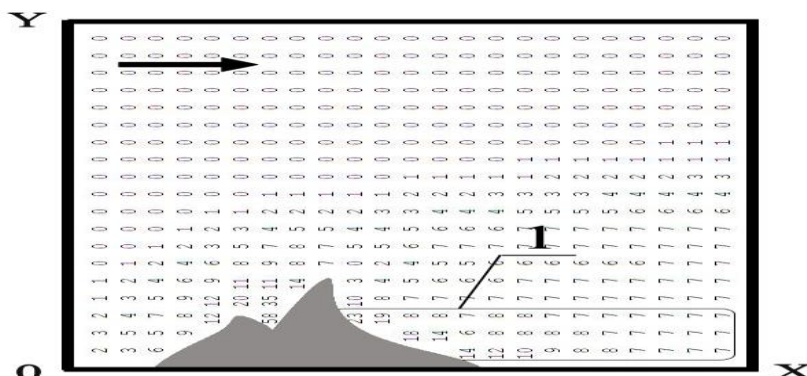
швидкість повітряного потоку $12\text{м}/\text{с}$.

Нижче на рисунках показано, як змінюється інтенсивність зони пилового забруднення біля штабелю з часом внаслідок випаровування води з поверхні вугільного штабелю. Кожне число на рисунках показує у відсотках значення концентрації пилу від максимальної концентрації пилу на даний час в розрахунковій області.



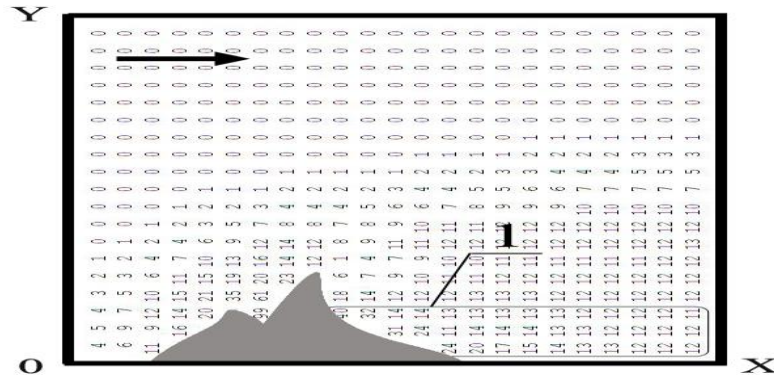
1 – концентрація пилу в діапазоні $0.25-0.71 \text{мг}/\text{м}^3$

Рис. 1 – Концентрація пилу біля штабелю вугілля, $t=335\text{с}$, $C_{\text{макс}}=6.47\text{мг}/\text{м}^3$



1 – концентрація пилу в діапазоні $0.75-2.05 \text{мг}/\text{м}^3$

Рис. 2 – Концентрація пилу біля штабелю вугілля, $t=559\text{с}$, $C_{\text{макс}}=10.82\text{мг}/\text{м}^3$



1 – концентрація пилу в діапазоні 2.91-5.85 мг/м³
 Рис. 3 – Концентрація пилу біля штабелю вугілля, $t=951c$, $C_{\max}=18.31\text{мг/м}^3$

Аналіз наведених рисунків показує, що внаслідок інтенсивного випаровування води з поверхні штабелю збільшується інтенсивність виносу пилу від штабелю та, як результат цього, дуже швидко збільшується концентрація пилу в робочій зоні за штабелем. Так, протягом 10хв (з часового рівня 335с до часового рівня 951с), максимальна концентрація пилу в робочій зоні збільшується практично в 8 раз. Тобто, дуже швидко буде мати суттєве забруднення повітря в робочій зоні біля штабелю.

Відзначимо, що час розрахунку – 7с.

Висновки.

Розроблена двовимірна CFD модель, що базується на використанні рівнянь Нав'є-Стокса та рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки в атмосфері. Модель орієнтована на оцінювання рівня забруднення атмосферного повітря в робочих зонах біля вугільного штабелю. Розроблена субмодель для оцінювання впливу зволоження поверхні штабелю на ступінь забруднення повітря.

В подальшому, планується створення тривимірної чисельної моделі для аналізу ефективності використання зволоження поверхні штабелю з метою зниження рівня пилового забруднення повітря в робочих зонах.

Список використаних джерел

1. Беляев Н.Н., Оладипо М.О., Кириченко П.С. Защита окружающей среды при транспортировке угля.- Кривой Рог: Изд.: Р.А. Козлов, 2018.-92с.
2. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеоздат, 1985. – 273 с.
3. Бруязкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов /

Е. В. Бруязкий. – Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.

4. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук.– Москва: Наука, 1982. – 320 с.

5. Мацак В. Г. Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве / В. Г. Мацак, Л. К. Хоцянов – Москва : Медгиз, 1959. - 231 с.

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

7. Уорк К. Загрязнение воздуха. Источники и контроль / К. Уорк, С. Уорнер. – Москва : Мир, 1980. – 539 с.

8. Згуровский М.З., Скопецкий В.В., Хрущ В.К., Беляев Н.Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде, Киев: Наук. думка, 1997, 368 с.

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

10. Biliaiev M.M., Kozachyna V.A., Oladipo M.O. Numerical analysis of atmosphere pollution from coal train / M.M. Biliaiev, V.A. Kozachyna, M.O. Oladipo // East European Scientific Journal. – 2019. – Vol 3(43). – P. 10-15.

11. Chen Weiman, Dong Zhibao. Wind Tunnel Test on the Influence of moisture on the Erodibility of loessial loam soil by Wind. Journal of Arid Environments, 1996, 34: 391 – 402

12. Tripathy D.P., Dash T.R., Badu A., Kanungo R.. Assessment and Modelilng of Dust Concentration in Opencast Coal Mine in India. Global NEST Journal, Vol 17, No 4, 2015, pp 825-834.