

Екологічні питання

УДК 504.05.662

М.І. Адаменко¹, Б.Д. Халмурадов², Е.А. Дармофал³

¹ Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків

² Національний авіаційний університет, Київ

³ Харківська державна академія фізичної культури, Харків

ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ НА ОБ'ЄКТАХ ГІРНИЧО-ВИДОБУВНОГО ВИРОБНИЦТВА

У статті наведений комплекс математичних розрахунків для різних видів екологічного впливу на атмосферу об'єктів гірничо-видобувного виробництва, що надають можливість оцінити межі розповсюдження екологічно небезпечної ситуації у навколишньому середовищі.

Ключові слова: екологічний ризик, атмосфера, забруднювачі повітря, двокомпонентна суміш, дифузія.

Вступ

Постановка проблеми. Забруднення атмосферного повітря – одна із самих гострих екологічних проблем багатьох країн світу, отже атмосфера – середовище для розміщення газоподібних відходів виробництва. Процес самоочищення атмосфери, притаманний їй, нездатний подолати самостійно навантаження, що діяльність людей покладає на неї [1].

Найбільшу екологічну небезпеку представляють тверді, рідкі й пилогазоподібні відходи виробництва, що утворюються в ході гірничопромислової діяльності, і містять у своєму складі різні токсичні речовини й сполуки.

Незважаючи на загальний спад виробництва, надходження їх в навколишнє середовище практично не знижується через відсутність надійних та ефективних способів їх локалізації й знешкодження.

Отже основна проблема полягає в мінімізації екологічно-шкідливих викидів в атмосферу від гірничо-видобувного виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Обговорення означеної проблеми у сучасній науковій та публіцистичній літературі ведеться як вітчизняними так і закордонними науковцями [2–5; 9; 13].

З проблеми органічно витікає наукова задача щодо забезпечення сталої фільтрації (очищення) викидів від гірничо-видобувного виробництва.

Результати дослідження

Аналітичну модель для опису просторового розподілу концентрації небезпечних хімічних речовин як у нестационарному, так й у стаціонарному випадках розвитку аварії, які пов'язані з викидом небезпечних хімічних речовин, можна розробити на основі загальної теорії механіки суцільних середовищ [6–14].

Подібна задача розглядалася для визначення заходів локалізації при аваріях на хімічно-небезпечних об'єктах [1–5]. Теоретична база, що подана у публікаціях [1–5], з додатковим опрацюванням може бути використана для розв'язання наукової задачі, що розглядається у даній статті.

Забруднююча хімічна речовина разом з повітрям створює двокомпонентну газову систему. Концентрація хімічної речовини, яка забруднює атмосферу, визначається її щільністю $\rho_3(\vec{r}, t)$ (кг/м³) в двокомпонентній системі. Сумарна щільність ρ_Σ такої двокомпонентної системи дорівнює

$$\rho_\Sigma(\vec{r}, t) = \rho_3(\vec{r}, t) + \rho_n(\vec{r}, t), \quad (1)$$

де ρ_n – щільність повітря.

Забруднення атмосфери у різних точках простору у різні моменти часу цілком задається функцією $\rho_3(\vec{r}, t)$.

Наша задача отримати повну систему рівнянь, вирішуючи яку можна знайти $\rho_3(\vec{r}, t)$ при заданих початковому розподілі концентрації забруднюючої речовини $\rho_3(\vec{r}, t = 0)$ та граничних умовах.

У двокомпонентному газі забруднення рухається зі швидкістю $\vec{v}_3(\vec{r}, t)$, а повітря – зі швидкістю $\vec{v}_n(\vec{r}, t)$. Поряд зі швидкостями \vec{v}_3 та \vec{v}_n введемо також конвективну (загальну) швидкість $\vec{V}_k(\vec{r}, t)$ двокомпонентного газу рівністю

$$\rho_\Sigma \vec{V}_k = \rho_3 \vec{v}_3 + \rho_n \vec{v}_n. \quad (2)$$

Якщо двокомпонентна суміш перебуває у спокої, то $\vec{V}_k = 0$. Тоді згідно з (2) маємо

$$0 = \rho_3 \vec{v}_{3,d} + \rho_n \vec{v}_{n,d}, \quad (3)$$

де $\vec{v}_{з,д}$ та $\vec{v}_{п,д}$ – відповідно швидкості руху забруднюючої речовини та повітря у двокомпонентній системі, яка у цілому перебуває у стані спокою, тому що $\vec{V}_к = 0$.

Зміна концентрацій компонент у двокомпонентній системі, яка перебуває у стані спокою, називається дифузією. Дифузія обумовлена зустрічним рухом компонент з відповідними швидкостями $\vec{v}_{з,д}$ та $\vec{v}_{п,д}$, які не дорівнюють нулю.

Явище дифузії забруднюючої речовини визначається вектором дифузії

$$\vec{i}_3 = \rho_3 \vec{v}_{з,д}, \quad (4)$$

який, згідно з (4), дає кількість забруднювача, що переноситься дифузією в одиницю часу крізь одиницю поверхні перпендикулярну вектору $\vec{v}_{з,д}$.

Аналогічно вектор дифузії повітря у двокомпонентному газі визначається рівністю

$$\vec{i}_п = \rho_п \vec{v}_{п,д}. \quad (5)$$

Згідно (3–5) виконується рівняння

$$\vec{i}_3 = -\vec{i}_п. \quad (6)$$

Фізичною причиною дифузії є зустрічний тепловий рух молекул забруднювача та молекул повітря з середніми швидкостями $\vec{v}_{з,д}$ та $\vec{v}_{п,д}$.

Виділимо у швидкостях руху забруднювача \vec{v}_3 та повітря $\vec{v}_п$ конвективну швидкість руху двокомпонентного газу $\vec{V}_к$ та швидкості дифузійного руху рівностями

$$\vec{v}_3 = \vec{V}_к + \vec{v}_{з,д}, \quad (7)$$

$$\vec{v}_п = \vec{V}_к + \vec{v}_{п,д}. \quad (8)$$

Відзначимо, що при цьому визначенні підстановка (7) та (8) у праву частину рівності (2) з урахуванням (1) дає ліву частину рівності (2).

Перейдемо до отримання повної системи рівнянь, яка описує зміну концентрації забруднювача у просторі та часі. Почнемо з закону збереження маси забруднювача. З цією метою розглянемо деякий замкнений об'єм V , який обмежує замкнена поверхня f . Маса забруднювача в об'ємі V , очевидно, дорівнює

$$M_3 = \int_V \rho_3(\vec{r}, t) d^3r. \quad (9)$$

Зміна маси забруднювача у замкненому об'ємі V в одиницю часу t дорівнює

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho_3 d^3r = - \int_f \rho_3 \vec{v}_3 d\vec{f} + \int_V Q_3 d^3r. \quad (10)$$

Тут перший інтеграл по замкненій поверхні f у правій частині рівняння (10) дає зміну маси забруд-

нювача в об'ємі V в одиницю часу за рахунок його руху крізь замкнену поверхню f . Другий інтеграл у правій частині рівняння (10) дає зміну маси забруднювача в об'ємі V в одиницю часу за рахунок наявності у ньому джерел та стоків забруднювача, які задаються функцією Q_3 .

Джерела зв'язані з зовнішніми викидами забруднювача в атмосферу та можуть бути описані функцією $Q_{дж}(\vec{r}, t)$. Функція $Q_{дж}(\vec{r}, t)$ задає масу забруднювача, яку викидають зовнішні джерела за одиницю часу в одиницю об'єму, який містить точку \vec{r} . Стоки забруднювача виникають, коли відбуваються спонтанний розпад забруднювача або реакція забруднювача з компонентами зовнішнього середовища, внаслідок якої забруднювач знищується. Стоки, подібно джерелам, можна описати функцією $Q_{ст}(\vec{r}, t)$. Функція

$$Q_3(\vec{r}, t) = Q_{дж}(\vec{r}, t) + Q_{ст}(\vec{r}, t). \quad (11)$$

Виходячи з теореми Остроградського-Гауса, інтеграл по поверхні, який міститься у правій частині рівняння (10), перетворюємо в інтеграл по об'єму.

Окрім цього врахуємо, що об'єм V не змінюється з часом. Це дозволяє диференціювати по часу підінтегральний вираз у лівій частині рівняння (10). Врешті-решт, отримаємо

$$\int_V \frac{\partial \rho_3}{\partial t} d^3r = - \int_V \text{div} \rho_3 \vec{v}_3 d^3r + \int_V Q_3 d^3r. \quad (12)$$

Враховуючи, що рівність (12) виконується для будь-якого об'єму V , одержимо

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} = -\text{div} \rho_3 \vec{v}_3 + Q_3. \quad (13)$$

З урахуванням рівностей (4; 7) запишемо рівність (13) у вигляді

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div} \rho_3 \vec{V}_к - \text{div} \vec{i}_3 + Q_3. \quad (14)$$

Закон збереження маси для повітря співпадає з (14) з точністю до позначення

$$\frac{\partial \rho_п}{\partial t} = -\text{div} \rho_п \vec{V}_к - \text{div} \vec{i}_п + Q_п. \quad (15)$$

Рух двокомпонентного газу, як цілого, описується рівнянням Нав'є-Стокса

$$\rho_\Sigma \left\{ \frac{\partial \vec{V}_к}{\partial t} + (\vec{V}_к \nabla) \vec{V}_к \right\} = -\nabla p + \eta \Delta \vec{V}_к + \left(\xi + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \text{div} \vec{V}_к + \vec{F}_{ст}, \quad (16)$$

де η та ξ – відповідно коефіцієнти першої та другої в'язкості, які передбачаються заданими, P – тиск у двокомпонентному газі, а $\vec{F}_{ст}$ – стороння сила, яка передбачається заданою.

Сторонньою силою може бути, наприклад, сила тяжіння.

Закон збереження енергії двокомпонентного газу записується у вигляді

$$\rho_{\Sigma} T \left\{ \frac{\partial S}{\partial t} + (\vec{V}_{\kappa} \nabla) S \right\} = \sigma_{\text{ік}} \frac{\partial V_{\text{кі}}}{\partial x_{\kappa}} - \text{div} \vec{q} + \mu \text{div} \vec{i}_{\Sigma}, \quad (17)$$

де T та S – відповідно температура та ентропія двокомпонентного газу.

Тензор в'язкості $\sigma_{\text{ік}}$, вектор потоку тепла \vec{q} та хімічний потенціал μ двокомпонентного газу передбачаються заданими.

Вираз для вектора дифузії \vec{i}_{Σ} записується з простих феноменологічних міркувань. Будемо вважати, що в горизонтальній площині, яка співпадає з площиною x, y , якості атмосфери не залежать від напрямку, але відмінні у вертикальному напрямку, який співпадає з віссю z . Тоді компоненти вектору дифузії \vec{i}_{Σ} можна записати у вигляді

$$i_{\Sigma x} = -D_{\parallel} \rho_{\Sigma} \frac{\partial \rho_3}{\partial x} - K_T \frac{\partial T}{\partial x} - K_p \frac{\partial P}{\partial x}; \quad (18)$$

$$i_{\Sigma y} = -D_{\parallel} \rho_{\Sigma} \frac{\partial \rho_3}{\partial y} - K_T \frac{\partial T}{\partial y} - K_p \frac{\partial P}{\partial y}; \quad (19)$$

$$i_{\Sigma z} = -D_{\perp} \rho_{\Sigma} \frac{\partial \rho_3}{\partial z} - \chi_T \frac{\partial T}{\partial z} - \chi_p \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (20)$$

Перші доданки у правих частинах рівностей (18–20) описують дифузію, що обумовлена залежністю ρ_3 від \vec{r} , другі – термодифузію, треті – бародифузію. Коефіцієнти $D_{\parallel}, D_{\perp}, K_T, \chi_T, K_p, \chi_p$ передбачаються заданими. Коефіцієнти дифузії D_{\parallel} та D_{\perp} – позитивні, а коефіцієнти термодифузії K_T і χ_T та коефіцієнти бародифузії K_p і χ_p можуть бути як позитивні, так і негативні.

Аналогічно записується вектор дифузії \vec{i}_{Π} . При цьому повинно виконуватись рівняння (6).

Система трьох скалярних рівнянь (14–15; 17) та одного векторного рівняння (16) є повна система рівнянь відносно чотирьох функцій $\rho_3(\vec{r}, t)$, $\rho_{\Pi}(\vec{r}, t)$, $P(\vec{r}, t)$, $\vec{V}_{\kappa}(\vec{r}, t)$.

При цьому ентропія S та температура T задаються рівняннями стану, згідно з якими $S=S(\rho_3, \rho_{\Pi}, P)$ та $T=T(\rho_3, \rho_{\Pi}, P)$. Рівняння стану визначаються якостями двокомпонентного газу, який розглядається, та передбачаються заданими.

При заданих початкових та граничних умовах рішення системи рівнянь (14–17) з урахуванням рівностей (18–20) дозволяє знайти концентрацію забруднювача $\rho_3(\vec{r}, t)$ у будь-якій точці простору та у будь-який момент часу. Зміна концентрації забруднювача в просторі та в часі згідно з системою рів-

нянь (14–17) та рівностей (18–20) визначається конвективним переносом забруднювача зі швидкістю \vec{V}_{κ} , а також дифузією, термодифузією та бародифузією.

Загальне рішення такої задачі у теперішній час отримати неможливо. Розвиток сучасних комп'ютерних технологій дозволяє для кожного конкретного випадку одержати чисельне рішення для функції $\rho_3(\vec{r}, t)$. Між тим безумовні переваги мають аналітичні рішення задачі про розповсюдження забруднення, які можна отримати в умовах наявності низки припущень, що суттєво спрощують рівняння (14–20).

Аналітичні рішення не тільки дають точне рішення задачі при зробленій низці припущень. Крім того вони дозволяють якісно описати розповсюдження забруднень у досить загальних випадках навіть тоді, коли зроблені припущення не реалізуються. Нижче наводиться низка таких аналітичних рішень.

Перше рішення впливає з рівностей (18–20), які дозволяють запропонувати термодифузійний спосіб розподілу забруднень. Нехай у початковий момент часу $t = 0$ у якійсь області простору концентрація забруднювача буде однакою у всіх точках простору, тобто ρ_3 не залежить від координати \vec{r} . Крім того двокомпонентний газ покоїться, тобто $\vec{V}_{\kappa} = 0$.

При цьому виникають задачі або зібрати забруднювач в якійсь області простору, де він буде дезактивований, або очистити деяку область простору від забруднювача. Рішення цих задач впливає з рівностей (18–20).

Задля спрощення будемо вважати, що $D_{\parallel} = D_{\perp}$, $K_T = \chi_T$ та тиск двокомпонентного газу постійний у всіх точках простору, який розглядається. Тоді з рівностей (18–20) впливає, що

$$\vec{i}_{\Sigma} = D_{\parallel} \rho_{\Sigma} \nabla \frac{\rho_3}{\rho_{\Sigma}} - K_T \nabla T. \quad (21)$$

Якщо у якійсь області $\rho_3(t=0) = \text{const}$, то перший доданок у правій частині рівності (21) дорівнює нулю. Помістимо у просторі тверде тіло, яке нагріто до деякої температури, що перевищує температуру навколишнього двокомпонентного газу. Тоді у просторі виникне градієнт температури, який згідно з (21), приведе до руху забруднювача у просторі. Якщо температуру твердого тіла підтримувати постійною, то після деякого часу настане стаціонарний стан, при якому \vec{i}_{Σ} обернеться на нуль.

Згідно з (21) стаціонарний стан при заданому градієнті температури можливий тільки за умови, що є градієнт забруднювача. При цьому розподіл концентрації забруднювача $\rho_3(\vec{r})$, що виникає у

просторі, впливає з (21), в якому слід \vec{i}_3 покласти рівним нулю. Врешті-решт, маємо

$$D_{\parallel} \rho_{\Sigma} \nabla \frac{\rho_3}{\rho_{\Sigma}} = -K_T \nabla T. \quad (22)$$

Якщо забруднювач такий, що $K_T > 0$, то область навкруги нагрітого твердого тіла очиститься від забруднювача. Якщо $K_T < 0$, то забруднювач буде сконцентрований навкруги нагрітого твердого тіла, де можна його дезактивувати. При дезактивації рівність (22) буде порушуватися. У цих умовах нові порції забруднювача будуть підходити до нагрітого твердого тіла, поблизу якого можливо продовжувати його дезактивацію.

Безумовно, замість нагрітого твердого тіла можливо використати навіть багаття.

Для термодифузійного розподілу забруднювача можливо також використати охолоджене тверде тіло, або якусь область простору, в якій температура нижче, ніж температура навколишнього двокомпонентного газу. У цьому випадку, коли $K_T > 0$, забруднювач збереться навколо охолодженої області простору, а при $K_T < 0$, охолоджена область очиститься від забруднювача.

Потрібно, безумовно, враховувати, що градієнт температури може привести до конвективного руху двокомпонентного газу з швидкістю \vec{V}_k . Наявність конвективного руху можливо врахувати, але це вже інша задача.

Розглянемо рішення інших задач, виходячи з рівняння (14). На жаль, у загальному випадку рівняння (14) не можна вирішувати окремо від решти рівнянь повної системи, тому що поруч з ρ_3 , воно містить також швидкість \vec{V}_k , повну щільність ρ_{Σ} , тиск P та температуру T .

Між тим, якщо зробити низку припущень, які спрощують задачу, то рівняння (14) можна вирішувати, не враховуючи решту рівнянь повної системи. Перелічимо ці припущення:

1. Будемо вважати, що внесок термодифузії та бародифузії у зміну концентрації забруднювача $\rho_3(\vec{r}, t)$ малий. Таке припущення виправдане, якщо температура та тиск постійні, або досить слабо змінюються у просторі. Таке припущення виправдане також у випадку, коли K_T, χ_T та K_P, χ_P є малими. У цих випадках другий та третій доданки у правій частині рівності (18–20) будуть відсутні.

2. Не будемо враховувати залежність від координати \vec{r} сумарної щільності ρ_{Σ} .

Перше та друге припущення дозволяють записати рівності (18–19) у вигляді

$$i_{3x} = -D_{\parallel} \frac{\partial \rho_3}{\partial x}; \quad i_{3y} = -D_{\parallel} \frac{\partial \rho_3}{\partial y}; \quad i_{3z} = -D_{\perp} \frac{\partial \rho_3}{\partial z}. \quad (23)$$

3. Швидкість конвективного руху \vec{V}_k , що міститься в (14), будемо вважати відомою. Це може бути, зокрема, швидкість вітру, що вимірюється незалежно.

Якщо підставити (23) у (14) та врахувати (11), то одержимо відносно шуканої концентрації забруднювача $\rho_3(\vec{r}, t)$ рівняння

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_3}{\partial t} + \rho_3 \operatorname{div} \vec{V}_k + \vec{V}_k \nabla \rho_3 - \frac{\partial}{\partial x} D_{\parallel} \frac{\partial \rho_3}{\partial x} - \\ - \frac{\partial}{\partial y} D_{\parallel} \frac{\partial \rho_3}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} D_{\perp} \frac{\partial \rho_3}{\partial z} = \\ = Q_{\text{ст}}(\vec{r}, t) + Q_{\text{дж}}(\vec{r}, t). \end{aligned} \quad (24)$$

При отриманні рівняння (24) ми врахували, що

$$\operatorname{div} \rho_3 \vec{V}_k = \rho_3 \operatorname{div} \vec{V}_k + \vec{V}_k \nabla \rho_3, \quad (25)$$

щоб виділити внесок залежності швидкості \vec{V}_k від \vec{r} у зміну функції $\rho_3(\vec{r}, t)$. Цей внесок дає другий доданок у лівій частині рівняння (24).

Виходячи з рівняння (24), вирішимо низку задач, які реалізуються в практиці.

Розглянемо випадок, коли вітер відсутній, тобто $\vec{V}_k = 0$. Відсутні також джерела забруднення, тобто $Q_{\text{дж}} = 0$. Будемо вважати, що коефіцієнти вертикальної та горизонтальної дифузії рівні, тобто $D_{\parallel} = D_{\perp}$ та не залежать від координати. Будемо вважати також, що стоки забруднювача лінійно залежать від концентрації, тобто

$$Q_{\text{ст}} = -\sigma_{\text{ст}} \rho_3(\vec{r}, t), \quad (26)$$

де коефіцієнт пропорційності $\sigma_{\text{ст}}$ передбачається постійним та позитивним.

Зроблені припущення дозволяють записати рівняння (24) у вигляді

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} = D_{\parallel} \Delta \rho_3 - \sigma_{\text{ст}} \rho_3. \quad (27)$$

Рівняння (27) повинно бути доповнено початковими умовами, які задають розподіл концентрації забруднювача у початковий момент часу $t=0$. Такий початковий розподіл задається функцією

$$\rho_3(\vec{r}, t=0) = \rho_{03}(\vec{r}). \quad (28)$$

Рівняння (27) слід також доповнити граничними умовами на функцію $\rho_3(\vec{r}, t)$.

Для спрощення будемо вважати, що граничні умови відсутні. Таке передбачення виправдане, якщо об'єм газу, який досліджується, знаходиться досить далеко від границь, які впливають на зміни концентрації забруднювача у часі та у просторі.

Рішення рівняння (27) з початковою умовою (28) можна отримати, якщо функцію $\rho_3(\vec{r}, t)$ подати у вигляді інтегралу Фур'є, тобто

$$\rho_3(\vec{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_k(t) e^{i\vec{k}\vec{r}} d^3K. \quad (29)$$

Підставлення (29) у (27) дає

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{d\rho_k}{dt} + D_{II}K^2\rho_k + \sigma_{cr}\rho_k \right\} e^{i\vec{k}\vec{r}} d^3K. \quad (30)$$

З рівняння (30) випливає рівність

$$\frac{d\rho_k}{dt} + D_{II}K^2\rho_k + \sigma_{cr}\rho_k = 0. \quad (31)$$

Рішення рівняння (31) запишемо у вигляді

$$\rho_k(t) = \rho_0(\vec{K}) e^{-D_{II}K^2t} e^{-\sigma_{cr}t}, \quad (32)$$

де $\rho_0(\vec{K})$ вже не залежить від часу, але є функція вектору \vec{K} .

Підставлення рішення (32) у (29) дає

$$\rho_3(\vec{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_0(\vec{K}) e^{-D_{II}K^2t} e^{-\sigma_{cr}t} e^{i\vec{k}\vec{r}} d^3K. \quad (33)$$

Функція (33), очевидно, є рішенням рівняння (27). Треба підібрати таку функцію $\rho_0(\vec{K})$, щоб задовольнялась початкова умова (28). Для цього покладемо $t = 0$. Після чого отримаємо

$$\rho_3(\vec{r}, t = 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_0(\vec{K}) e^{i\vec{k}\vec{r}} d^3K. \quad (34)$$

Згідно (28) та (34) функція $\rho_0(\vec{K})$ є Фур'є – образ розподілення забруднення у початковий момент часу $t = 0$. Виходячи зі зворотного перетворення Фур'є, одержимо

$$\rho_0(\vec{K}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{03}(\vec{r}') e^{-i\vec{k}\vec{r}'} d^3r'. \quad (35)$$

Підставляючи (35) у (33), отримаємо рішення, яке задовольняє рівнянню (27) та початковій умові (28):

$$\rho_3(\vec{r}, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} e^{-\sigma_{cr}t} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{03}(\vec{r}') e^{-D_{II}K^2t} e^{i\vec{k}(\vec{r}-\vec{r}')} d^3K d^3r'. \quad (36)$$

Виконуючи у (36) інтегрування по \vec{K} , остаточно отримаємо

$$\rho_3(\vec{r}, t) = \frac{e^{-\sigma_{cr}t}}{8(\pi Dt)^{3/2}} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{03}(\vec{r}') e^{\frac{(\vec{r}-\vec{r}')^2}{4D_{II}t}} d^3r'. \quad (37)$$

Результат (37) розв'язує поставлену задачу. З рішення (37) випливає, що концентрація забруднювача за рахунок спонтанного розпаду та взаємодії з довіллям експоненціально зменшується. За час $t_{cr} = \frac{1}{\sigma_{cr}}$ концентрація у кожній точці зменшується в e разів.

Подальше дослідження рішення (37) зручно провести в моделі простої початкової умови, коли в початковий момент часу маса забруднення M_0 знаходиться у малому об'ємі, який міститься на початку координат. Така початкова умова апроксимується дельта-функцією з множником M_0 , тобто

$$\rho_{03}(\vec{r}') = M_0 \delta(\vec{r}'). \quad (38)$$

Підставлення (38) у (37) дає

$$\rho_3(\vec{r}, t) = \frac{M_0}{8(\pi D_{II}t)^{3/2}} e^{-\sigma_{cr}t} e^{-\frac{r^2}{4D_{II}t}}. \quad (39)$$

Згідно з рішенням (39) в певний фіксований момент часу t характерна область, в якій буде помітна кількість забруднювача, що не розпався, визначається розміром L_3 , при якому показник другої експоненти порядку одиниці, тобто

$$\frac{L_3^2}{4D_{II}t} \approx 1 \text{ або } L_3 \approx 2\sqrt{D_{II}t}. \quad (40)$$

При цьому у всіх точках простору зменшення концентрації забруднювача за рахунок розпаду визначається множником $e^{-\sigma_{cr}t}$.

Висновки

Рівняння (24) з заданими початковими та граничними умовами дозволяє прогнозувати розподіл концентрації забруднювача у просторі та у часі практично для всіляких можливих ситуацій на об'єктах гірничо-видобувної промисловості.

Внаслідок спрощуючих передумов отримано просторовий розподіл забруднюючих речовин у випадку стаціонарних умов при постійно діючому джерелі викиду. На базі отриманого рішення можливо знаходити зони з гранично допустимими концентраціями хімічної речовини для робочої зони та населення, а також зон з верхніми та нижніми концентраційними межами займання.

В рішеннях рівняння (24) також потрібно врахувати, що окрім токсичної дії газової хмари, суттєвими факторами небезпеки є надлишковий тиск, який виникає при можливому вибуху хмари, і тепловий потік у випадку створення вогневої кулі при загорянні хмари.

Список літератури

1. Адаменко М.І. Інформаційна модель розповсюдження забруднення атмосфери викидами із резервуарів з залишками нафтопродуктів під час їх провітрювання / М.І. Адаменко, С.В. Гарбуз // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С. 115-121.
2. Захаренко О.В. Підвищення безпеки життєдіяльності об'єктів хімічної промисловості шляхом моделювання заходів по локалізації надзвичайних ситуацій / О.В. Захаренко, М.І. Адаменко, О.А. Клименко // Системи

озброєння і військова техніка. – Х.: Харків. ун-т Повітряних Сил, 2009. – № 2 (18). – С. 73-78.

3. Селіванов С.Є. Проблеми забезпечення екологічної безпеки функціонування потенційно небезпечних об'єктів / С.Є. Селіванов, М.І. Адаменко // Збірник наукових праць ХНУ ім. Каразіна. – Х., 2010.

4. Адаменко М.І. Зниження масштабів екологічного впливу аварій на потенційно небезпечних об'єктах шляхом їх своєчасного виявлення / М.І. Адаменко // Системи управління, навігації та зв'язку: Збірник наукових праць. – К.: ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління», 2010. – Вип. 4 (16). – С. 240-243.

5. Адаменко М.І. Дослідження меж екологічного впливу хімічно небезпечних об'єктів на навколишнє середовище / М.І. Адаменко // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2010. – Вип. 35. – С. 6-8.

6. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.

7. Берлянд М.Е. Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха / М.Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 163 с.

8. Куценогий К.П. Рассеяние аэрозолей в приземном слое атмосферы / К.П. Куценогий // Прикладная механика и техническая физика. – 1970. – №4. – С. 180-185.

9. Турбулентная диффузия в нижнем слое атмосферы: [ред. Н.Л. Вызова]. – Л.: Гидрометииздат, 1977. – Вип 15 (60). – 54 с.

10. Методы расчёта турбулентных течений: [ред. В. Кульман; пер. с англ.] 1984. – 464 с.

11. Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей / Е.П. Медников. – М.: Наука, 1980. – 176 с.

12. Хинце И.О. Турбулентность, её механизм и теория / И.О. Хинце. – М.: Физматгиз, 1963. – 378 с.

13. Рабинович М.И. Регулярная и хаотическая динамика структур в течение жидкости / М.И. Рабинович, М.М. Суцук // УФН. – 1990. – Т. 160, Вып 1. – С. 3-64.

14. Матеріали впровадження нового механізму регулювання викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря [Текст] / за ред. С.С. Куруленка. – К.: ДЕІ Мінприроди України, 2007. – 216 с.

Надійшла до редколегії 23.05.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.А. Кучук, НТУ «Харківський політехнічний інститут», Харків.

ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ОБЪЕКТАХ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА

Н.И. Адаменко, Б.Д. Халмуратов, Е.А. Дармофал

В статье приведен комплекс математических расчетов для различных видов экологического воздействия на атмосферу объектов горнодобывающего производства, предоставляют возможность оценить границы распространения экологически опасной ситуации в окружающей среде.

Ключевые слова: экологический риск, атмосфера, загрязнители воздуха, двухкомпонентная смесь, диффузия.

INFORMATION MODEL OF THE DISTRIBUTION OF ATMOSPHERIC POLLUTION AT THE OBJECTS OF MINING PRODUCTION

M. Adamenko, B. Khalmuradov, E. Darmofal

The article presents a complex of mathematical calculations for various types of environmental impact on the atmosphere of mining production facilities, provide an opportunity to assess the boundaries of the spread of an ecologically dangerous situation in the environment.

Keywords: ecological risk, atmosphere, air pollutants, two-component mixture, diffusion.