

УДК 504.05.662

М. І. АДАМЕНКО, С. В. ГАРБУЗ

## ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ВИКИДАМИ ІЗ РЕЗЕРВУАРІВ З ЗАЛИШКАМИ НАФТОПРОДУКТІВ ПІД ЧАС ЇХ ПРОВІТРЮВАННЯ

У статті розглядається несприятливий екологічний вплив на довкілля викидів із резервуарів з залишками нафтопродуктів під час їх провітрювання перед проведенням ремонтних та інших видів робіт, а також перед зміною класу нафтопродуктів. Наведено комплекс математичних розрахунків для різних видів екологічного впливу об'єктів нафтогазового комплексу на атмосферу, що надають можливість оцінити межі розповсюдження екологічної кризової ситуації у навколишньому середовищі. Передбачено заходи, що попереджають розвиток можливих аварій, пов'язаних з викидом небезпечних речовин в атмосферу, а також нещасних випадків на виробництві.

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

В статье рассматривается неблагоприятное экологическое воздействие на окружающую среду выбросов из резервуаров с остатками нефтепродуктов во время их проветривания перед проведением ремонтных или иных работ, а также перед сменой класса нефтепродуктов. Приведен комплекс математических расчетов для различных видов экологического воздействия объектов нефтегазового комплекса на атмосферу, что дает возможность оценить пределы распространения кризисной экологической ситуации. Предусмотрены мероприятия, предупреждающие развитие возможных аварий, связанных с выбросом опасных веществ в атмосферу, также несчастных случаев на производстве.

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

The article examines the adverse ecological impact on the environment of emissions from reservoirs of oil residues during their airing before the repairs or other works, as well as before the changing of the class of petroleum products. Was shown a complex of mathematical calculations for various types of ecological impact of objects of oil and gas complex on the atmosphere, that allows to estimate the limits of spreading the crisis environmental situation. Provides measures which prevents the development of possible accidents involving the release of hazardous substances into the atmosphere and industrial accidents. The result of this work is a devising mechanism and creation of informational model of spreading pollutions in the atmosphere with given initial and boundary conditions, which allows to predict the spreading of pollutant concentration in space and time for almost all possible situations. In addition, to reduce the duration of reservoirs cleaning and reducing the level of fire and explosion hazard process of their ventilation is also necessary to study regularities of turbulent transport of petroleum products vapor and convective mass transfer in the gas space of reservoirs in their venting.

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

**Вступ.** 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. Екологи б'ють на спалах. Вплив забрудненого повітря на здоров'я населення проявляється через скорочення середньої тривалості життя, збільшення кількості передчасних смертей, ріст захворюваності й негативний вплив на працездатність.

Проблемам безпеки об'єктів нафтогазового комплексу приділяється особлива увага на всіх рівнях законодавчої й виконавчої влади, при цьому одним з найактуальних питань залишається забезпечення захисту людей і територій від впливу небезпечних факторів, які можуть виникнути при надзвичайних ситуаціях на складах нафти та нафтопродуктів. Однієї із проблем, яку постійно потрібно вирішувати на об'єктах нафтогазового комплексу, є проведення безпечної передремонтної підготовки нафтових резервуарів.

Отже основна проблема полягає в мінімізації екологічно-шкідливих викидів в атмосферу із резервуарів з залишками нафтопродуктів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Обговорення означеної проблеми у сучасній науковій та публіцистичній літературі ведеться достатньо широким колом як вітчизняними так і закордонними науковцями [1–9].

З проблеми органічно витікає наукова задача щодо забезпечення сталої фільтрації (очищення) викидів із резервуарів з залишками нафтопродуктів під час їх провітрювання перед ремонтними, профілактичними та іншими видами робіт або при зміні класу

нафтопродуктів, що в них зберігаються, з мінімальною кількісною складовою потрапляння шкідливих речовин в атмосферу.

**Створення інформаційної моделі розповсюдження забруднення атмосфери викидами із резервуарів з залишками нафтопродуктів під час їх провітрювання.** Основним фактором екологічного впливу на навколишнє середовище для аероекологічної оцінки вважають формування хмари забрудненого повітря.

У статті наведемо комплекс математичних розрахунків для різних видів екологічного впливу на атмосферу об'єктів, що розглядаються, що надають можливість оцінити межі розповсюдження екологічної кризової ситуації у навколишньому середовищі.

Аналітичну модель для опису просторового розподілу концентрації небезпечних для здоров'я людини та навколишнього природного середовища речовин як у нестационарному, так й у стаціонарному випадках розвитку можливих аварій, що пов'язані з викидом небезпечних речовин, можна розробити на основі загальної теорії механіки суцільних середовищ [3–15].

Припустимо, небезпечна забруднююча речовина (пари залишків нафтопродуктів) разом з повітрям створює двокомпонентну газову систему. Концентрація речовини, що забруднює атмосферу, визначається її щільністю  $\rho_z(\vec{r}, t)$  (кг/м<sup>3</sup>) в двокомпонентній системі. Сумарна щільність  $\rho_\Sigma$  такої двокомпонентної системи дорівнює

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

де  $\rho_n$  – 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

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

де  $\vec{v}_{3,0}$  та  $\vec{v}_{n,0}$  – відповідно швидкості руху забруднюючої речовини та повітря у двокомпонентній системі, яка у цілому перебуває у стані спокою, тому що  $\vec{V}_k = 0$ .

Зміна концентрацій компонент у двокомпонентній системі, яка перебуває у стані спокою, як відомо, називається дифузиею. Дифузія обумовлена зустрічним рухом компонент з відповідними швидкостями  $\vec{v}_{3,0}$  та  $\vec{v}_{n,0}$ , які не дорівнюють нулю.

Явище дифузії забруднюючої речовини визначається вектором дифузії

$$\vec{i}_3 = \rho_3 \vec{v}_{3,0}, \quad (4)$$

який, згідно з (4), дає кількість забруднювача, що переноситься дифузиею в одиницю часу крізь одиницю поверхні, перпендикулярну вектору  $\vec{v}_{3,0}$ .

Аналогічно вектор дифузії повітря у двокомпонентному газі визначається рівністю

$$\vec{i}_n = \rho_n \vec{v}_{n,0}. \quad (5)$$

Згідно (3), (4), (5) виконується рівняння

$$\vec{i}_3 = -\vec{i}_n. \quad (6)$$

Фізичною причиною дифузії є зустрічний тепловий рух молекул забруднювача та молекул повітря з середніми швидкостями  $\vec{v}_{3,0}$  та  $\vec{v}_{n,0}$ .

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

$$\vec{v}_3 = \vec{V}_k + \vec{v}_{3,0}, \quad (7)$$

$$\vec{v}_n = \vec{V}_k + \vec{v}_{n,0}. \quad (8)$$

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

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

Тут перший інтеграл по замкненій поверхні  $f$  у правій частині рівняння (10) дає зміну маси забруднювача 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 викидів забруднювача, що задаються функцією  $Q_3$ .

Джерела зв'язані з зовнішніми викидами забруднювача в атмосферу та можуть бути описані функцією  $Q_{\text{дж}}(\vec{r}, t)$ . Функція  $Q_{\text{дж}}(\vec{r}, t)$  задає масу забруднювача, яку викидають джерела за одиницю часу в одиницю об'єму атмосферного повітря, який містить точку  $\vec{r}$ .

Викиди, подібно джерелам, можна описати функцією  $Q_{\text{cm}}(\vec{r}, t)$ . Функція

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

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

Окрім цього вважаємо, 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) та (7) запишемо рів-

ність (13) у вигляді

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

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

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} = -\operatorname{div} \rho_n \vec{V}_\kappa - \operatorname{div} \vec{i}_n + Q_n. \quad (15)$$

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

$$\rho_\Sigma \left\{ \frac{\partial \vec{V}_\kappa}{\partial t} + (\vec{V}_\kappa \nabla) \vec{V}_\kappa \right\} = -\nabla P + \eta \Delta \vec{V}_\kappa + \left( \xi + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \operatorname{div} \vec{V}_\kappa + \vec{F}_{cm}, \quad (16)$$

де  $\eta$  та  $\xi$  – відповідно коефіцієнти першої та другої в'язкості, які передбачаються заданими,  $P$  – тиск у двокомпонентному газі, а  $\vec{F}_{cm}$  – стороння сила, яка передбачається заданою (сторонньою силою може бути, наприклад, сила тяжіння).

Закон збереження енергії двокомпонентного газу записується у вигляді

$$\rho_\Sigma T \left\{ \frac{\partial S}{\partial t} + (\vec{V}_\kappa \nabla) S \right\} = \sigma_{ik} \frac{\partial V_{ki}}{\partial x_k} - \operatorname{div} \vec{q} + \mu \operatorname{div} \vec{i}_3, \quad (17)$$

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

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

Вираз для вектора дифузії  $\vec{i}_3$  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  $\vec{i}_3$  можна записати у вигляді

$$i_{3x} = -D_{||} \rho_\Sigma \frac{\partial \rho_3}{\partial x} - K_T \frac{\partial T}{\partial x} - K_p \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (18)$$

$$i_{3y} = -D_{||} \rho_\Sigma \frac{\partial \rho_3}{\partial y} - K_T \frac{\partial T}{\partial y} - K_p \frac{\partial P}{\partial y}, \quad (19)$$

$$i_{3z} = -D_{\perp} \rho_\Sigma \frac{\partial \rho_3}{\partial z} - \chi_T \frac{\partial T}{\partial z} - \chi_p \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (20)$$

Перші доданки у правих частинах рівностей (18) – (20) описують дифузію, що обумовлена залежністю  $\rho_3$  від  $\vec{r}$ , другі – термодифузію, треті – бародифузію.

Коефіцієнти  $D_{||}, D_{\perp}, K_T, \chi_T, K, \chi$  передбачаються заданими. Коефіцієнти дифузії  $D_{||}$  та  $D_{\perp}$  – позитивні, а коефіцієнти термодифузії  $K_T$  і  $\chi_T$  та коефіцієнти бародифузії  $K_p$  і  $\chi_p$  можуть бути як позитивні, так і негативні.

Аналогічно записується вектор дифузії  $\vec{i}_n$ . 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  $\rho_3(\vec{r}, t)$ ,  $\rho_n(\vec{r}, t)$ ,  $P(\vec{r}, t)$ ,  $\vec{V}_\kappa(\vec{r}, t)$ .

При цьому ентропія  $S$  та температура  $T$  задаються рівняннями стану, згідно з якими  $S = S(\rho_3, \rho_n, P)$  та  $T = T(\rho_3, \rho_n, P)$ . Рівняння стану визначаються якостями двокомпонентного газу, що 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 рівнянь (14)–(17) та рівностей (18)–(20) визначається конвективним переносом забруднювача зі швидкістю  $\vec{V}_\kappa$ , 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 випливає 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  $\rho_3$  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 утилізований, або очистити деяку область простору від забруднювача. Рішення цих задач випливає з рівностей (18)–(20).

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

$$\vec{i}_3 = D_{||} \rho_{\Sigma} \nabla \frac{\rho_3}{\rho_{\Sigma}} - K_T \nabla T. \quad (21)$$

Якщо у якійсь області  $\rho_3(t=0) = const$ , 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  $\vec{i}_3$  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

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

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 утилізацію.

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 зі 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  $\rho_3$  воно містить також швидкість  $\vec{V}_k$ , повну щільність  $\rho_{\Sigma}$ , 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  $K_T, \chi_T$  та  $K_P, \chi_P$  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  $\rho_{\Sigma}$ .

Перше та друге припущення дозволяють записати рівності (18)–(20) у вигляді:

$$i_{xx} = -D_{||} \frac{\partial \rho_3}{\partial x}; i_{yy} = -D_{||} \frac{\partial \rho_3}{\partial y}; i_{zz} = -D_{\perp} \frac{\partial \rho_3}{\partial z}. \quad (23)$$

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

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

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  $Q_{dxc} = 0$ . Будемо вважати, що коефіцієнти вертикальної та горизонтальної дифузії рівні, тобто  $D_{||} = D_{\perp}$  та не залежать від координати. Будемо вважати також, що викиди забруднювача лінійно залежать від концентрації, тобто

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

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

Зроблені припущення дозволяють записати рівняння (24) у вигляді

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} = D_{||} \Delta \rho_3 - \sigma_{cm} \rho_3. \quad (27)$$

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

$$\rho_3(\vec{r}, t=0) = \rho_{0_3}(\vec{r}). \quad (28)$$

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

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

Підставлення (29) у (27) дає

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{d\rho_k}{dt} + D_{\text{лк}} K^2 \rho_{cm} + \sigma_{\vec{K}} \rho \right\} e^{i\vec{K}\vec{r}} d^3 K. \quad (30)$$

З рівняння (30) випливає рівність

$$\frac{d\rho_k}{dt} + D_{\text{лк}} K^2 \rho_{cm} + \sigma_{\vec{K}} \rho = 0. \quad (31)$$

Рішення рівняння (31) запишемо у вигляді

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

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

Підставлення рішення (32) у (29) дає

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

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

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

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

$$\rho_0(\vec{K}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{0_3}(\vec{r}') e^{-i\vec{K}\vec{r}'} d^3 r'. \quad (35)$$

Підставляючи (29) у (33), отримаємо рішення, яке задовольняє рівнянню (27) та початковій умові (28)

$$\rho_3(\vec{r}, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} e^{-\sigma_{cm} t} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{0_3}(\vec{r}') e^{-D_{\text{лк}} K^2 t} e^{i\vec{K}(\vec{r}-\vec{r}')} d^3 K d^3 r' \quad (36)$$

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

$$\rho_3(\vec{r}, t) = \frac{e^{-\sigma_{cm} t}}{8(\pi D t)^{3/2}} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{0_3}(\vec{r}') e^{\frac{(\vec{r}-\vec{r}')^2}{4D_{\text{лк}} t}} d^3 r'. \quad (37)$$

Результат (37) розв'язує поставлену задачу. З рішення (37) випливає, що концентрація забруднювача експоненціально зменшується. За час  $t_{cm} = \frac{1}{\sigma_{cm}}$  концентрація у кожній точці зменшується в  $e$  раз.

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 множителем  $M_0$ , тобто

$$\rho_{0_3}(\vec{r}') = M_0 \delta(\vec{r}'). \quad (38)$$

Підставлення (38) у (37) дає

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

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

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

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

### Висновки

Рівняння (24) з заданими початковими та граничними умовами дозволяє прогнозувати розподіл концентрації забруднювача у просторі та у часі практично для всіляких можливих ситуацій. Низка рішень рівняння (24) з урахуванням деяких спрощуючих передумов наведена у відповідних публікаціях [3, 4].

### Список літератури:

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

– 216 с.

2. Экология города [Текст] : Учебник. Под общ. ред. Ф. В. Стольберга – К.: Либра, 2000. – 464 с.
3. Захаренко, О. В. Підвищення безпеки життєдіяльності об'єктів хімічної промисловості шляхом моделювання заходів по локалізації надзвичайних ситуацій [Текст] / О. В. Захаренко, М. І. Адаменко, О. А. Клименко // Системи озброєння і військова техніка. – Наук. журнал. – No 2 (18). – Х.: Харків. ун-т Повітряних Сил, 2009. – С. 73–78.
4. Селіванов, С. Є. Проблеми забезпечення екологічної безпеки функціонування потенційно небезпечних об'єктів [Текст] / С. Є. Селіванов, М. І. Адаменко // Збірник наукових праць ХНУ ім. Каразіна. – Х., 2010. – С. 187–194.
5. Адаменко, М. І. Зниження масштабів екологічного впливу аварій на потенційно небезпечних об'єктів шляхом їх своєчасного виявлення [Текст] / М. І. Адаменко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Збірник наукових праць. – Вип. 4 (16). – К.: ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління», 2010. – С. 240–243.
6. Адаменко, М. І. Дослідження меж екологічного впливу хімічно небезпечних об'єктів на навколишнє середовище [Текст] / М. І. Адаменко // Науковий вісник будівництва. – Вип. 35. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2010. – С. 6–8.
7. Адаменко, Н. І. Классификация чрезвычайных ситуаций по видам ресурсов, применяемых для их ликвидации [Текст] / Н. И. Адаменко // Науковий вісник будівництва. – Вип. 18 – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2002. – С. 11–13.
8. Берлянд, М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы [Текст] / М. Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеоздат, 1975. – 448 с.
9. Берлянд, М. Е. Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха [Текст] / М. Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 163 с.
10. Куценогий, К. П. Рассеяние аэрозолей в приземном слое атмосферы [Текст] / К. П. Куценогий // Прикладная механика и техническая физика. – 1970. – No 4. – С. 180–185.
11. Турбулентная диффузия в нижнем слое атмосферы [Текст] : [ред. Н. Л. Вязова] – Л.: Гидрометеоздат, 1977. – Вып 15 (60). – 54 с.
12. Методы расчёта турбулентных течений [Текст] : [ред. В. Кульман ; пер. с англ.], 1984. – 464 с.
13. Медников, Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей [Текст] / Е. П. Медников. – М.: Наука, 1980. – 176 с.
14. Хинце, И. О. Турбулентность, её механизм и теория [Текст] / И. О. Хинце. – М.: Физматгиз, 1963. – 378 с.
15. Рабинович, М. И. Регулярная и хаотическая динамика структур в течение жидкости [Текст] / М. И. Рабинович, М. М. Суцук. – УФН, 1990. – Т. 160. – Вып 1. – С. 3–64.

**Bibliography (transliterated):**

1. Materiali vprovadzhennya novogo mexanizmu regulyuvannya vikidiv zabrudnyuyuchix rechovin v atmosferi povitrya. za red. S. S. Kurulenkа. Kiev: DEI Minpririodi Ukraini, 2007, 216.
2. Ekologiya goroda: Uchebnik. Pod obshh. red. F. V. Stolberga. Kiev: Libra, 2000, 464.
3. Zaxarenko, O. V., Adamenko, M. I., Klimenko, O. A. (2009). Pidvishchennya bezpeki zhittediyalnosti ob'ektiv khimichnoi promislivosti shlyaxom modelyuvannya zaxodiv po lokalizacii nadzvichajnix situacij. Sistemi ozbroennya i vijskova texnika. Nauk. zhurnal, 2 (18), Kharkov.: Kharkiv. un-t Povitryanix Sil, 73–78.
4. Selivanov, S. E., Adamenko, M. I. (2010). Problemi zabezpechennya ekologichnoi bezpeki funkcionuvannya potencijno nebezpechnix ob'ektiv. Zbirnik naukovix prac XNU im. Karazina, 187–194.
5. Adamenko, M. I. (2010). Znizhennya masshtabiv ekologichnogo vplyvu avarij na potencijno nebezpechnix ob'ektiv shlyaxom ix svoeчасного виявлення. Upravlinnnya, navigacii ta zv'yazku. Zbirnik naukovix prac. Vip. 4 (16). Kiev: DP «Centralnij naukovo-doslidnij institut navigacii i upravlinnnya», 240–243.
6. Adamenko, M. I. (2010). Doslidzhennya mezh ekologichnogo vplyvu khimichno nebezpechnix ob'ektiv na navkolishnє seredovishhe. Naukovij visnik budivnictva, 35, Kharkiv: XDTUBA, XOTV ABU, 6–8.
7. Adamenko, N. I. (2002). Klassifikaciya chrezvyčajnyx situacij po vidam resursov, primenyayemyx dlya ix likvidacii. Naukovij visnik budivnictva, 18, Xarkiv: XDTUBA, XOTV ABU, 11–13.
8. Berlyand, M. E. (1975). Sovremennye problemy atmosfernoj diffuzii i zagryazneniya atmosfery. Lvov: Gidrometeoizdat, 448.
9. Berlyand, M. E. (1987). Atmosfernaya diffuziya i zagryaznenie vozduxa. Lvov: Gidrometeoizdat, 163.
10. Kucenogij, K. P. (1970). Rasseyaniye aerezolej v prizemnom sloe atmosfery. Prikladnaya mexanika i texnicheskaya fizika, 4, 180–185.
11. Turbulentnaya diffuziya v nizhnem sloe atmosfery: [red. N. L. Vyzova]; Gidrometeoizdat, 1977, 15 (60), 54.
12. Metody raschyota turbulentyx techenij: [red. V. Kulman ; per. s angl.], 1984, 464.
13. Mednikov, E. P. (1980). Turbulentnyj perenos i osazhdenie aerezolej. Moscow: Nauka, 176.
14. Xince, I. O. (1963) Turbulentnost, eyo mexanizm i teoriya. Moscow Fizmatgiz, 378.
15. Rabinovich, M. I., Sushhik, M. M. (1990). Reguljarnaya i хаoticheskaya dinamika struktur v techenie zhidkosti. UFN, 160, 1, 3–64.

Надійшла (received) 10.03.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**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. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.115–121. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Информационная модель распространения загрязнения атмосферы выбросами из резервуаров с остатками нефтепродуктов во время их проветривания / Н. И. Адаменко, С. В. Гарбуз// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.115–121. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Informational model of spreading atmospheric pollution of emissions from reservoirs of oil residues during their airing/ M. Adamenko, S. Garbuz// Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189). – P.115–121. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2079-5459.**

**Адаменко Микола Ігоревич** – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, завідувач кафедри «Охорона праці та безпека життєдіяльності»; пл. Свободи, 4, м. Харків, Україна, 61022; тел. 066-196-97-48; e-mail: [nikolajadamenko@mail.ru](mailto:nikolajadamenko@mail.ru)

**Адаменко Николай Игоревич** – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, заведующий кафедры «Охрана труда и безопасность жизнедеятельности»; пл. Свободы, 4, г. Харьков, Украина, 61022; тел. 066-196-97-48; e-mail: [nikolajadamenko@mail.ru](mailto:nikolajadamenko@mail.ru)

**Adamenko Mikolay** – doctor of technical Sciences, Professor, Kharkiv national University named after V.N. Karazin; head of Department "Labour Protection and Safety"; Freedom Square, 4, Kharkiv, Ukraine, 61022; tel. 066-196-97-48; e-mail: [nikolajadamenko@mail.ru](mailto:nikolajadamenko@mail.ru)

**Гарбуз Сергій Вікторович** – Національний університет цивільного захисту України, викладач кафедри «Пожежна та техногенна безпека об'єктів і технологій»; вул. Чернышевська, 94, м. Харків, Україна, 61023; тел. 095-464-54-91; e-mail: [garbuz\\_88@inbox.ru](mailto:garbuz_88@inbox.ru)

**Гарбуз Сергей Викторович** - Национальный университет гражданской защиты Украины, преподаватель кафедры «Пожарная и техногенная безопасность объектов и технологий»; ул. Чернышевская, 94, г. Харьков, Украина, 61023; тел. 095-464-54-91; e-mail: [garbuz\\_88@inbox.ru](mailto:garbuz_88@inbox.ru)

**Garbuz Sergii** – National University of civil protection of Ukraine, lecturer of the Department of Fire and technogenic safety of facilities and technologies; st. Chernyshevskaya, 94, m. Kharkiv, Ukraine, 61023; tel. 095-464-54-91; e-mail: [garbuz\\_88@inbox.ru](mailto:garbuz_88@inbox.ru)