

УДК 504.5:621.565.8

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.010721.39.765

ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ТЕПЛООВОГО ТА ХІМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ РОБОЧИХ ЗОН

БІЛЯЄВА В. В., канд. техн. наук, доц.

Кафедра аерогідродинаміки та енергомасопереносу, Дніпровський національний університет ім. Олеса Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-98-22, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

Анотація. Постановка проблеми. Розглядається проблема прогнозування рівня забруднення повітря в робочих зонах на базі математичних моделей аеродинаміки та тепломасопереносу. Ставиться задача розрахунку поля концентрації хімічно небезпечних речовин та поля температури в робочих зонах. **Мета роботи.** Побудова числових моделей, що дозволяють швидко визначати розподіл температури та концентрації хімічно небезпечних речовин в областях, які мають складну геометричну форму. **Методика.** Для числового моделювання процесу забруднення повітря в робочих зонах у разі поширення хімічно небезпечних речовин використовується рівняння Г. Марчука, що враховує перенос хімічно небезпечної речовини шляхом конвекції, а також за рахунок турбулентної дифузії. Для моделювання теплового забруднення робочих зон використовується рівняння енергії. Для моделювання поля швидкості вітру за наявності різного роду перешкод – рівняння Лапласа для потенціалу швидкості. Інтегрування моделювальних рівнянь здійснюється на прямокутній сітці. Для числового інтегрування рівняння, що описує розповсюдження хімічно небезпечної речовини в повітрі робочих зон, використовується скінченнорізницева схема розщеплення. Для числового інтегрування рівняння Лапласа для потенціалу швидкості – дві схеми розщеплення. Невідоме значення потенціалу швидкості на кожному кроці розщеплення розраховується за явною формулою. Числове інтегрування рівняння енергії здійснюється за допомогою явної різницевої схеми. **Наукова новизна.** Побудовано числові моделі, що дають можливість розраховувати зони хімічного та теплового забруднення з урахуванням комплексу важливих фізичних факторів. Особливість числових моделей полягає у швидкості розрахунку, що важливо для проведення серійних розрахунків на практиці. **Практична значимість.** На базі розроблених числових моделей створено комплекс прикладних програм, який дозволяє аналізувати та прогнозувати інтенсивність та розміри зон теплового або хімічного забруднення. Він може бути корисним для визначення зон ураження у випадку екстремальних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах. **Висновки.** Розроблено числові моделі, на базі яких створено комплекс прикладних програм, що дозволяють методом комп'ютерного моделювання досліджувати багатопараметричні процеси хімічного та теплового забруднення робочих зон, повітря. Комплекс програм може бути реалізований на комп'ютерах малої та середньої потужності. Наведено результати обчислювального експерименту.

Ключові слова: термічне забруднення; хімічне забруднення; робоча зона; числове моделювання

MATHEMATICAL MODELS APPLICATION TO PREDICT HEAT AND CHEMICAL AIR POLLUTION IN WORKING AREAS

BILIAIEVA V.V., Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

Department of Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharina Ave., 49000, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-98-22, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

Abstract. Problem statement. The problem of prediction the level of air pollution in working areas is considered on the basis of mathematical models of aerodynamics and heat and mass transfer. The task is to calculate the concentration field of chemically hazardous substances and the temperature field in the working zones. **The purpose of the article.** Construction of numerical models that allow determine the distribution of temperature and concentration of chemically hazardous substances in work areas with a complex geometric shape. **Methodology.** For numerical modeling of the process of air pollution in working areas during the spread of chemically hazardous substances, G. Marchuk's equation is used, which takes into account the transfer of a chemically hazardous substance due to convection, as well as due to turbulent diffusion. The energy equation is used to model the thermal contamination of work areas. To simulate the wind speed field in the presence of various kinds of obstacles, the Laplace equation for the speed potential

is used. The integration of the modeling equations is carried out on a rectangular grid. For the numerical integration of the equation describing the propagation of a chemically hazardous substance in the air of working areas, a finite-difference splitting scheme is used. For the numerical integration of the Laplace equation for the velocity potential, two splitting schemes are used. The unknown value of the velocity potential at each splitting step is calculated using an explicit formula. Numerical integration of the energy equation is carried out using an explicit difference scheme. **Scientific novelty.** The constructed numerical models that allow to calculate the zones of chemical and thermal pollution, taking into account a set of important physical factors. A feature of numerical models is the speed of calculation, which is important when serial calculations are carrying out in practice. **Practical significance.** A complex of applied programs was created on the basis of the developed numerical models. This complex of programs allows to analyze and predict the intensity and size of zones of thermal or chemical pollution. This set of programs can be useful in determining the affected areas in case of extreme situations at chemically hazardous facilities. **Conclusions.** Numerical models have been developed. On the basis of these models a complex of applied programs has been created that allow to study multiparameter processes of chemical and thermal air pollution of working areas using the method of computer modeling. The complex of programs can be implemented on computers of low and medium power. The results of a computational experiment are presented.

Keywords: thermal pollution; chemical pollution; work zone; numerical simulation

Постановка проблеми. На практиці у разі виникнення екстремальних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах, транспорті можливе інтенсивне забруднення повітря в робочих зонах унаслідок пожеж або раптових викидів токсичних речовин. У таких екстремальних ситуаціях виникає ризик токсичного або хімічного ураження людей. Тому постає проблема прогнозування можливих наслідків екстремальних ситуацій з метою визначення масштабу загрози та на базі цієї інформації розроблення науково обґрунтованої системи захисту працівників.

Аналіз останніх досліджень. Оцінювання ризику теплового або хімічного ураження працівників можливе лише на базі математичних моделей. Для розв'язання цієї важливої задачі використовуються різні класи моделей [3; 7–13]:

1. Аналітичні моделі (наприклад, пакет прикладних програм SLAB).
2. Модель Гаусса (наприклад, пакет прикладних програм ALOHA).
3. Числові моделі, CFD моделі (наприклад, пакет прикладних програм ANSYS Fluent).

Використання аналітичних моделей, моделі Гаусса дозволяє дуже швидко визначити зони хімічного забруднення, але ці моделі не враховують впливу різного роду перешкод, що мають місце у цих зонах. На базі числових моделей, CFD моделей можливо отримати практично всю інформацію, потрібну для наукового

прогнозування ризику ураження працівників. Тому залишається задача створення математичних моделей, що дозволяють швидко визначити зони хімічного та теплового забруднення і при цьому врахувати найважливіші фізичні параметри, що впливають на процеси тепломасопереносу.

Мета статті. Побудова CFD моделей для оцінювання рівня хімічного та теплового забруднення повітря в робочих зонах.

Методика. Розглядається процес хімічного та теплового забруднення повітря в робочих зонах, що може виникнути у надзвичайних ситуаціях на хімічно небезпечних об'єктах, транспорті. Для моделювання багатофакторних процесів тепломасопереносу використовуються фундаментальні моделі механіки суцільного середовища та методи числового інтегрування.

Модель хімічного забруднення робочих зон

Для моделювання забруднення повітря в робочих зонах у випадку емісії хімічно небезпечної речовини використовується фундаментальне рівняння масопереносу [6]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum Q_i \cdot \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (1)$$

де C – концентрація хімічно небезпечної речовини в робочих зонах; u, v –

компоненти вектора швидкості повітряного потоку; μ_x, μ_y – коефіцієнти атмосферної турбулентної дифузії; (x_i, y_i) – координати місця емісії хімічно небезпечної речовини; t – час; $\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)$ – дельта-функція Дірака; Q_i – інтенсивність емісії хімічно небезпечної речовини; v_g – швидкість осадження хімічно небезпечної речовини.

Граничні умови для моделювального рівняння такі [4]:

$$1. \frac{\partial C}{\partial n} = 0 \text{ – на непроникливих межах (} n \text{ – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні).}$$

– одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні).

2. $C = 0$ – на межі, де потік входить у розрахункову область.

$$3. \left. \frac{\partial C}{\partial n} \right|_{\Gamma_2} = 0 \text{ – на межі виходу потоку з}$$

розрахункової області.

Для моменту часу $t = 0$, початкова умова записується як $C = 0$.

Розглянемо числову модель, побудовану на базі рівняння масопереносу. Для числового інтегрування будемо використовувати прямокутну різницеву сітку. Для побудови числової моделі здійснюється фізичне розщеплення рівняння масопереносу таким чином:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right). \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum_i Q_i \cdot \delta(x-x_i) \cdot \delta(y-y_i). \quad (4)$$

Надалі здійснюються наступні перетворення:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \beta_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} -$$

$$-\beta_x \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C_{i,j}^{n+1} + M_{xx}^+ C_{i,j}^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \beta_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} -$$

$$-\beta_y \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C_{i,j}^{n+1} + M_{yy}^+ C_{i,j}^{n+1},$$

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

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

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

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

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

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

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

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

На наступному етапі будується двокрокова схема розщеплення для рівняння (2):

– перший крок ($k = \frac{1}{2}$):

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

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{3}{4}} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} + L_x^- C^{n+\frac{3}{4}} + L_y^- C^{n+\frac{3}{4}} = 0;$$

Далі, для числового інтегрування рівняння (3), використовується наступна двокрокова схема розщеплення:

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{3}{4}} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = 0,5 \cdot (L_{xx}^- C_{xx}^{n+\frac{1}{2}} + L_{xx}^+ C_{xx}^{n+\frac{3}{4}} + M_{yy}^- C_{yy}^{n+\frac{1}{2}} + M_{yy}^+ C_{yy}^{n+\frac{3}{4}});$$

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+\frac{3}{4}}}{\Delta t} = 0,5 \cdot (L_{xx}^- C_{xx}^{n+1} + L_{xx}^+ C_{xx}^{n+\frac{3}{4}} + M_{yy}^- C_{yy}^{n+1} + M_{yy}^+ C_{yy}^{n+\frac{3}{4}}).$$

Для числового інтегрування рівняння (4) застосовується метод Ейлера.

Модель теплового забруднення повітря в робочих зонах

Для розрахунку поля температур у робочих зонах будемо використовувати рівняння енергії в наближенні Бусінеска:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{uT}{\partial x} + \frac{vT}{\partial y} = \text{div}(a \text{ grad } T), \quad (5)$$

де T – температура; u, v – складові вектора руху повітряного потоку; $a = (a_x, a_y)$ – коефіцієнти температуропровідності; x, y – декартові координати; t – час.

Граничні умови для рівняння (5):

1. На вході в розрахункову область:

$$T = T_{in},$$

де T_{in} – фонові температура повітря.

2. На виході з розрахункової області:

$$T_{i+1,j} = T_{i,j},$$

де $T_{i+1,j}$ – температура в останній різницевій комірці; $T_{i,j}$ – температура в попередній комірці.

3. На твердих поверхнях $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$.

Початкова умова (за $t = 0$): $T = T_0$, де T_0 – відома температура повітря.

Розглянемо побудову числової моделі. Числове інтегрування здійснюється на прямокутній різницевій сітці, температура визначається на сторонах різницевої комірки таким чином:

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \Delta t \frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} a_x + \Delta t \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} a_y.$$

Як можна бачити із цієї залежності, температура визначається за явною формулою.

Модель аеродинаміки

Для використання рівняння масопереносу та рівняння енергії в прикладних розрахунках потрібно мати інформацію стосовно поля параметрів u, v . Для цього необхідно розв'язати задачу аеродинаміки. Для розв'язання цієї задачі будемо використовувати модель потенціального руху. В цьому випадку моделювальне рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0;$$

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad (6)$$

де P – потенціал швидкості.

Граничні умови:

1. $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ – на твердих межах.

2. $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$ – на межі, де потік входить у розрахункову область, V_n – відома швидкість повітря.

3. $P = \text{const}$ – на межі виходу потоку.

Для числового інтегрування рівняння (6) представимо його так:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (7)$$

де t – фіктивний час.

Для числового інтегрування рівняння (7) використовуються дві різницеві схеми. Перша схема розщеплення така:

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

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

де t – фіктивний час.

Для побудови другої схеми здійснюється таке розщеплення рівняння (7):

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \tag{8}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \tag{9}$$

Розрахункова залежність для обчислення невідомого значення P на базі рівняння (8) має вигляд:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + Vt \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} - P_{i,j}^n + P_{i-1,j}^n + Vt \frac{P_{i,j}^n - P_{i-1,j}^n}{\Delta x^2}.$$

Розрахункова залежність для обчислення невідомого значення P на базі рівняння (9) має вигляд:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + Vt \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} - P_{i,j}^n + P_{i,j-1}^n + Vt \frac{P_{i,j}^n - P_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}.$$

Визначення потенціалу швидкості на базі розглянутих різницевих схем закінчується, коли виконується умова:

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

де ε – мале число.

Після розрахунку поля потенціалу швидкості визначаються компоненти вектора швидкості на базі залежностей:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

На базі розрахованого поля швидкості повітряного потоку розв'язується рівняння масопереносу та енергії.

Результати. Нижче наведено результати розв'язання задачі на базі розглянутих числових моделей.

На рисунку 1 показано зону хімічного забруднення на промисловому майданчику у випадку аварійного викиду хлористого водню. Викид має місце в будівлі в двох місцях: перша зона викиду розташована зверху будівлі, а друга – з лівого боку.

На рисунку 1 показано концентрацію токсичної речовини у відсотках від максимальної концентрації в розрахунковій області. Максимальна концентрація (маркер «99») дорівнює 27 г/м³. Як показують дані обчислювального експерименту, хімічне забруднення повітря має місце з усіх боків промислової будівлі.

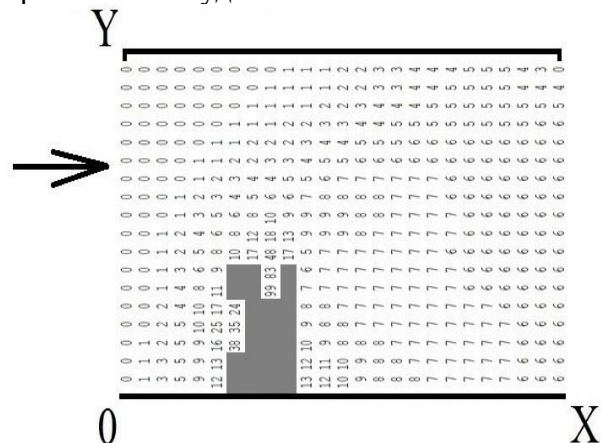


Рис. 1. Зона хімічного забруднення, $t = 26$ с

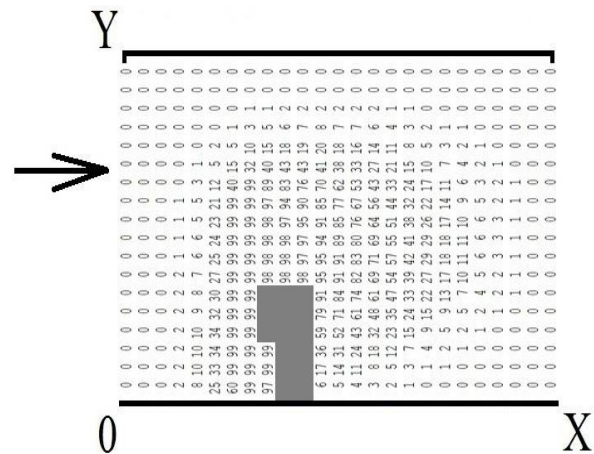


Рис. 2. Зона теплового забруднення, $t = 33$ с

На рисунку 2 показано поле температури в розрахунковій області для певного часу у випадку пожежі біля промислової будівлі. Число «99» показує положення полум'я. Зазначимо, що число «0» відповідає фоновій температурі 23 °С. Кожне число показує температуру у відсотках від максимальної температури $T = 1100^{\circ}\text{C} + \text{фонова температура } 23^{\circ}\text{C}$.

Наведені результати обчислювальних експериментів показують, що побудовані числові моделі дозволяють оцінювати хімічне та теплове забруднення з урахуванням складної геометричної форми

об'єктів, розташованих на промисловому майданчику.

Зазначимо, що час розрахунку склав 4 секунди

Висновки

Розроблено дві числові моделі для оцінювання рівня хімічного та теплового забруднення робочих зон.

Ці моделі базуються на числовому інтегруванні фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища

У подальшому цей напрям досліджень буде спрямований на створення тривимірних числових моделей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алымов, В. Т., Тарасова Н. П. Техногенный риск : анализ и оценка : учеб. пособ. для вузов. Москва : ИКЦ «Академкнига», 2004. 118 с.
2. Горшков В. И. Тушение пламени горючих жидкостей. Москва : Пожнаука, 2007. 268 с.
3. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Чердніченко Л. А. Оцінка ризику термічного ураження у випадку аварійного горіння. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 6. С. 54–60. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241120.54.698.
4. Роч П. Вычислительная гидродинамика. Москва : Мир, 1980. 412 с.
5. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.
6. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Київ : Наукова думка, 1997. 368 с.
7. Anthony Michael Barret. *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense : Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. Dissertation. Pittsburg, Pennsylvania, USA, 2009. 123 p.
8. Biliaiev M., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Kalashnikov I. Numerical Simulation of Toxic Chemical Transport after Accidental Release at Chemical Plant. *Romanian Journal of Information Science and Technology*. 2020. Vol. 23. Pp. 3–23.
9. Chan W. R., Nazaroff W. W., Price P. N., Gadgil A. J. Effectiveness of Urban Shelter-in-Place. II: Residential Districts. 2008. 31 p. URL: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/928232> (Accessed: 29 March 2014). DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.059.
10. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool. ALOHA Software. *Quality of Life*. № 9. 2018. Pp. 38–45.
11. John S. Nasstrom, Gayle Sugiyama, Ronald L. Baskett, Shawn C. Larsen and Michael M. Bradley. The National Atmospheric Release Advisory Center (NARAC) Modeling and Decision Supports System for Radiological and NUCLEAR Emergency Preparedness and Response. *Int. J. Emergency Management*. 2007. № 3, vol. 4. Pp. 1–32.
12. Lacombe J.-M., Truchot D., Duplantier S. *Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation*. 18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. 2017. Pp. 1–5.
13. Cejun Cao and oth. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability*. 2017. Vol. 9, iss.11. DOI: 10.3390/su9112103.

REFERENCES

1. Alymov V.T. and Tarasova N.P. *Tekhnogennyy risk : analiz i otsenka : uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Technogenic risk : analysis and evaluation : a manual for higher education institutions]. Moscow : IKTs "Akademkniga" Publ., 2004, 118 p. (in Russian).
2. Gorshkov V.I. *Tushenie plameni goryuchih zhidkostej* [Extinguishing flames of flammable liquids]. Moscow : Pozhnauka, 2007, 136 p. (in Russian).
3. Bilyayev N.N., Berlov O.V., Bilyayeva V.V. and Cherednychenko L.A. *Ocinka ryzyku termichnogo urazhennya u vypadku avarijnogo gorinnya* [Risk assessment of thermal damage in case of emergency combustion]. *Visnyk Prydniprovskoi dergavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Pridneprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020, no. 6, pp. 54–60. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241120.54.698. (in Ukraine).

4. Rouch P. *Vychislitel'naya gidrodinamika* [Computational fluid dynamics]. Moscow : Mir Publ., 1980, 412 p. (in Russian).
5. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [Difference Scheme Theory]. Moscow : Nauka Publ., 1983, 616 p. (in Russian).
6. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K. and Belyaev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modeling of pollution spreading in the environment]. Kyiv : Naukova dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian).
7. Barret Anthony Michael Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectivness. Dissertation. Pittsburg, Pennsylvania, USA, 2009, 123 p.
8. Biliaiev M., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O. and Kalashnikov I. Numerical Simulation of Toxic Chemical Transport after Accidental Release at Chemical Plant. Romanian Journal of Information Science and Technology. 2020, vol. 23, pp. 3–23.
- 9 Chan W.R., Nazaroff W.W., Price P.N. and Gadgil A.J. Effectiveness of Urban Shelter-in-Place. II: Residential Districts. 2008, 31 p. URL: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/928232> (Accessed: 29 March 2014). DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.059.
10. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool. ALOHA Software. Quality of Life. 2018, no. 9, pp. 38–45.
11. John S. Nasstrom, Gayle Sugiyama, Ronald L. Baskett, Shawn C. Larsen and Michael M. Bradley. The National Atmospheric Release Advisory Center (NARAC) Modeling and Decision Supports System for Radiological and NUCLEAR Emergency Preparedness and Response. Int. J. Emergency Management. 2007, no. 3, vol. 4, pp. 1–32.
12. Lacombe J.M., Truchot D. and Duplantier S. Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. 18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. 2017, pp. 1–5.
13. Cao C., Li C., Yang Q. and Zhang, F. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. Sustainability. 2017, vol. 9, iss. 11. DOI: 10.3390/su9112103.

Надійшла до редакції: 07.05.2021.