

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 614.83:[536.24:519.6]

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, В. В. БІЛЯЄВА², П. С. КІРІЧЕНКО³, В. А. КОЗАЧИНА⁴,
В. М. ПОЛТОРАЦЬКА⁵

¹Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

²Каф. енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, ННІ ДМІ, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта v.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2399-3124

³Каф. «Теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляція», Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027, тел. +38 (056) 409 06 06, ел. пошта pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

⁴Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

⁵Каф. екології та охорони навколишнього середовища, Український державний університет науки і технологій, ННІ ПДАБА, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38(056) 756 33 71, ел. пошта poltoratskaya.viktoriya@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-6244-8439

Математичне моделювання процесу нестационарної теплопровідності крізь стінку

Мета. Екстремальні ситуації на промислових об'єктах часто призводять до виникнення пожежі, зокрема, пожежі виникають в разі атаки дронів на нафтосховища. У такому випадку в повітря потрапляє значна кількість хімічно небезпечних речовин (продукти згорання палива) та з'являється ризик термічного ураження працівників. Для зменшення ризику термічного ураження використовують різні засоби та конструкції. Під час проектування захисних конструкцій потрібно заздалегідь визначити їх ефективність та час можливого руйнування. Це потребує розробки та використання спеціалізованих математичних моделей. Ця робота присвячена розробці чисельних моделей, що дозволяють прогнозувати теплові поля на промисловому майданчику в разі пожежі та оцінювати ризик руйнування захисної стінки (бар'єру). **Методика.** Для чисельного розв'язання задач аеродинаміки (визначення поля швидкості вітру), розрахунку зон теплового забруднення повітря на промисловому майданчику та визначення динаміки зміни температури в середині захисного бар'єра (стінки) використовуємо фундаментальні моделі механіки суцільного середовища. Для чисельного розв'язання моделювальних рівнянь використовуємо кінценорізницькі схеми. **Результати.** Розроблено комп'ютерну програму, що дає можливість розв'язувати «зв'язану» задачу з визначення зони теплового забруднення повітря на промисловому майданчику та динаміку нагрівання захисного бар'єра (стінки). За допомогою запропонованої чисельної моделі та комп'ютерної програми можна в режимі реального часу розв'язувати задачу теплопровідності та теплопереносу. **Наукова новизна.** Наведено швидкопорозрахункову чисельну модель для оцінювання часу руйнування захисного бар'єра на промисловому майданчику, де має місце пожежа. Аналіз теплових полів на промисловому майданчику та в середині захисного бар'єра здійснено шляхом чисельного інтегрування багаточасового рівняння теплопереносу та теплопровідності. Задачу аеродинаміки розв'язано на базі моделі потенціального руху. Ці чисельні моделі потребують незначного комп'ютерного часу за практичної реалізації. **Практична значимість.** Запропоновані чисельні моделі можуть бути використані для первинної оцінки температурного поля в середині захисного бар'єра з метою визначення її

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

ефективності з точки зору захисту зон від теплового забруднення на промисловому майданчику. Ця інформація може бути корисною на форескі-етапі розробки захисних споруд.

Ключові слова: захисний бар'єр; температурне поле; пожежа; теплоперенос; математичне моделювання; промисловий майданчик; охорона праці

Вступ

Екстремальні ситуації на промислових об'єктах часто призводять до виникнення пожежі (рис. 1, 2) [1–4, 6, 7, 13–15]. Слід підкреслити, що пожежі – це типові явища під час атаки дронів на нафтосховища. За такого явища в повітря потрапляє значна кількість хімічно небезпечних речовин (продукти згорання палива) та з'являється ризик термічного ураження працівників.



Рис. 1. Пожежа на промисловому майданчику з формуванням зони теплового забруднення [https://www.volynpost.com/news/51948-masshtabna-pozhezha-na-naftobazi-pid-vasylkovym-foto]

Fig. 1. Fire at an industrial site – formation of a thermal pollution area [https://www.volynpost.com/news/51948-masshtabna-pozhezha-na-naftobazi-pid-vasylkovym-foto]



Рис. 2. Пожежа на промисловому майданчику з викидом токсичних речовин [https://www.volynpost.com/news/51948-masshtabna-pozhezha-na-naftobazi-pid-vasylkovym-foto]

Fig. 2. Fire at an industrial site release of toxic substances [https://www.volynpost.com/news/51948-masshtabna-pozhezha-na-naftobazi-pid-vasylkovym-foto]

Для аналізу ризику токсичного ураження персоналу в разі викиду в повітря хімічно небезпечних речовин широко використовують модель Гауса [11] та чисельні моделі [5–8, 10], а для аналізу ризику термічного ураження – аналітичні та чисельні моделі [1–6]. Кожен клас моделей має свої переваги й недоліки.

Через значну температуру повітря під час пожежі виникає ризик займання інших сховищ. Тому важливим напрямом наукових досліджень є розробка засобів для зменшення ризику термічного ураження працівників та об'єктів на промисловому майданчику [5, 7]. Постає необхідність в ефективних математичних моделях, щоб за короткий час визначити потребу у використанні захисних засобів для конкретних умов експлуатації.

Мета

Під час проектування захисних конструкцій потрібно заздалегідь визначати їх ефективність та час можливого руйнування. Це вимагає розробки та використання спеціалізованих математичних моделей. Ця робота присвячена розробці чисельних моделей, що дозволяють прогнозувати теплові поля на промисловому майданчику в разі пожежі та оцінювати ризик руйнування захисної стінки (бар'єра).

Методика

У разі виникнення пожежі на промисловому майданчику для захисту об'єктів використовують різного роду конструкції – стінки, габіони тощо. Тому виникає важлива задача оцінювання часу, коли захисна функція споруди зменшується та з'являється ризик її руйнування. Для розв'язання цієї важливої задачі потрібно мати спеціалізовані математичні моделі. Слід вказати, що ця задача потребує розв'язання двох пов'язаних підзадач:

- 1) прогнозування динаміки формування теплових полів на промисловому майданчику та біля захисної стінки;
- 2) розрахунок процесу нестационарної теплопровідності крізь захисну конструкцію (стінку) та визначення часу, коли внаслідок нагрівання стінки може початися її руйнування.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Крім цього, перед розв'язанням цих двох підзадач потрібно визначити поле швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику за наявності на ньому різного роду перешкод. Сумісне розв'язання вказаних задач дуже ускладнює створення математичних моделей.

Для математичного моделювання процесу теплового забруднення повітря на промисловому майданчику в разі пожежі застосовують таке рівняння:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0, \quad (1)$$

де T – температура повітря на промисловому майданчику; a_x, a_y – коефіцієнти теплопровідності повітря; u, v – компоненти вектора швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику; t – час.

Крайові мови:

1) початкова умова: $T_{t=0} = T_{A0}$, де T_{A0} – відома температура повітряного потоку на промисловому майданчику до початку пожежі;

2) на межі входження повітряного потоку до розрахункової зони $T = T_{in}$, де $T_{entrance}$ – відома температура повітряного потоку;

3) на межі виходу повітряного потоку з об'єкта: $\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{CD} = 0$, де $\vec{n}$ – одиничний вектор зовнішньої нормалі до межі зони;

4) на місці пожежі задають «внутрішню» граничну умову першого роду: $T = T_0$, де T_0 – відома температура.

Для визначення поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику використовують модель потенціального руху, модельовальне рівняння має вигляд:

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

де P – потенціал швидкості повітряного потоку.

Для розв'язання рівняння (2) задано відповідні граничні та початкові умови:

1) $\frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{AB} = U$ – умова Неймана на межі, де

потік входить до розрахункової зони зі швидкістю U ;

2) на межі виходження повітряного потоку до розрахункової зони: $P = P_0 + const$ – умова Діріхле, де P_0 – довільна константа;

3) на твердих поверхнях, захисному бар'єрі, верхньої межі розрахункової зони реалізується

умова: $\frac{\partial P}{\partial n} \Big|_{surface} = 0$, де $\vec{n}$ – одиничний вектор

до поверхні.

Після визначення поля потенціалу швидкості визначають компоненти вектора швидкості повітряного потоку на основі залежностей:

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

Для розрахунку ступеня прогрівання захисного бар'єра використовують рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = (a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}), \quad (4)$$

де T – температура в середині бар'єра (стінки); a_x – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки; t – час.

Для рівняння (4) реалізують такі крайові умови (рис. 3):

1. На лівій межі (із зовнішньої сторони стінки) задають температуру повітря на відкритій місцевості, що змінюється з часом:

$$T_A = T(t), \quad (5)$$

де t – час.

2. На лівій межі цієї стінки задають значення температури $T_A = f(t, h)$ – це температура атмосферного повітря за стінкою, що змінюється з часом t та по висоті бар'єра h . На правій межі захисної стінки використовують також поточне значення температури, яке визначають під час розв'язання рівняння (1), тобто $T_B = f(t, h)$.

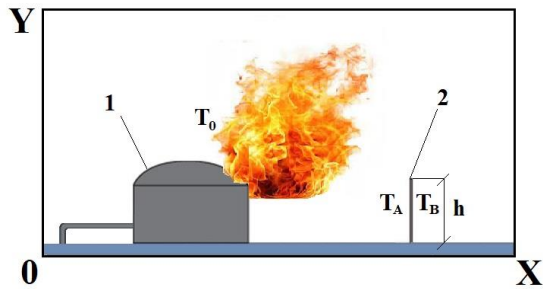


Рис. 3. Розрахункова схема:
1 – нафтохранилище; 2 – захисний бар'єр

Fig. 3. Calculation scheme:
1 – oil storage tank; 2 – protective barrier

Початкова умова – це значення температури в середині стінки T_A .

Таким чином, розв'язання рівняння (4) здійснюють у разі використання граничної умови першого роду на обох межах, що змінюються з часом.

У цій роботі слід розв'язати схожу задачу, а саме: виконати сумісне розв'язання рівнянь (1), (2), (4) за відповідних крайових умов. Алгоритм розв'язання такий:

1. Розв'язуємо «зовнішню» задачу, тобто шляхом розв'язання модельовального рівняння аеродинаміки визначаємо поле швидкості повітря в зоні дослідження.

2. Розв'язуємо «зовнішню» задачу, тобто шляхом розв'язання модельовального рівняння (1) визначаємо поле температури на промисловому майданчику та навколо захисного бар'єра для конкретного моменту часу.

3. Починаємо розрахунок процесу прогрівання стінки з урахуванням вказаних крайових умов.

4. Далі для нового розрахункового кроку за часом розраховуємо нове значення температури повітря на промисловому майданчику та навколо захисного бар'єра.

5. Знову здійснюємо розрахунок прогрівання стінки для нового поля температури на промисловому майданчику.

Таким чином визначаємо нестаціонарне значення температури стінки. Далі здійснюємо порівняння температури в середині стінки з температурою початку руйнування стінки T_{col} . Час досягнення цієї температури показує на час початку руйнування захисної конструкції.

Чисельні моделі. Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа для потенціалу швидкості використовуємо явну схему. Рівняння (2) зводимо до «нестационарного» вигляду:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (6)$$

де t – фіктивний час.

Далі використовуємо таку апроксимацію:

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

Розрахунок за цієї залежністю закінчується, коли:

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

де $P_{i,j}^{n+1}$ – значення потенціалу швидкості на новій ітерації; $P_{i,j}^n$ – значення потенціалу швидкості на попередній ітерації; ε – мале число.

Значення компонент швидкості розраховуємо на сторонах комірок так:

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

Для чисельного інтегрування рівняння (1) здійснюємо таку апроксимацію похідних:

$$\frac{\partial u T}{\partial x} = \frac{\partial u^+ T}{\partial x} + \frac{\partial u^- T}{\partial x};$$

$$\frac{\partial v T}{\partial y} = \frac{\partial v^+ T}{\partial y} + \frac{\partial v^- T}{\partial y};$$

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

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

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

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

$$\begin{aligned}\frac{\partial v^+ T}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^+ T_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^+ T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ T^{n+1}; \\ \frac{\partial v^- T}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^- T_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- T_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- T^{n+1}; \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) &\approx a_x \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - a_x \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = \\ &= M_{xx}^- T^{n+1} + M_{xx}^+ T^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) &\approx a_y \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} - a_y \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = \\ &= M_{yy}^- T^{n+1} + M_{yy}^+ T^{n+1}.\end{aligned}$$

З урахуванням цих залежностей апроксимація рівняння (1) має вигляд:

$$\begin{aligned}\frac{T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ T^{n+1} + L_x^- T^{n+1} + L_y^+ T^{n+1} + L_y^- T^{n+1} = \\ = (M_{xx}^+ T^{n+1} + L_{xx}^- T^{n+1} + L_{yy}^+ T^{n+1} + L_{yy}^- T^{n+1}). \quad (7)\end{aligned}$$

Далі має місце розщеплення (7) на чотири кроки:

– на першому кроці ($k = \frac{1}{4}$):

$$\begin{aligned}\frac{T_{i,j}^{n+k} - T_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ T^{n+k} + L_y^+ T^{n+k}) = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ T^{n+k} + M_{xx}^- T^n + M_{yy}^+ T^{n+k} + M_{yy}^- T^n); \quad (8)\end{aligned}$$

– на другому кроці ($k = n + \frac{1}{2}, c = n + \frac{1}{4}$):

$$\begin{aligned}\frac{T_{ij}^k - T_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- T^k + L_y^- T^k) = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^- T^k + M_{xx}^+ T^c + M_{yy}^- T^k + M_{yy}^+ T^c); \quad (9)\end{aligned}$$

– на третьому кроці ($k = n + \frac{3}{4}, c = n + \frac{1}{2}$) використовуємо залежність (9);

– на четвертому кроці ($k = n + 1, c = n + \frac{3}{4}$)

використовуємо залежність (8).

Для чисельного інтегрування моделюального рівняння (4) використовуємо явну різницеву схему:

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \Delta t \cdot a_1 \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x^2} + \Delta t \cdot a_2 \frac{-T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2}.$$

У разі використання неоднорідного матеріалу стінки (якщо, наприклад, матеріал має два шари різної теплопровідності): коефіцієнти теплопровідності визначаємо так:

$$a_1 = \frac{2(a_{i+1} \cdot a_i)}{a_{i+1} + a_i}; \quad a_2 = \frac{2(a_{i-1} \cdot a_i)}{a_{i-1} + a_i};$$

де a_1, a_2 – коефіцієнти теплопровідності для різних шарів матеріалу стінки.

Для проведення обчислювальних експериментів здійснено програмну реалізацію побудованої чисельної моделі мовою FORTRAN.

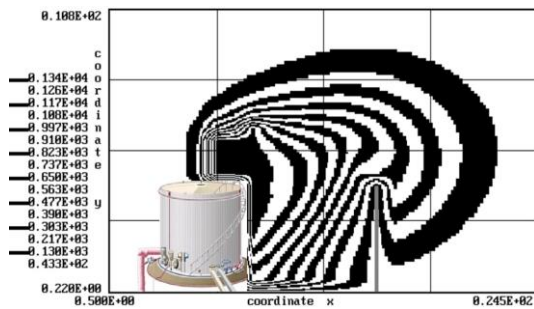
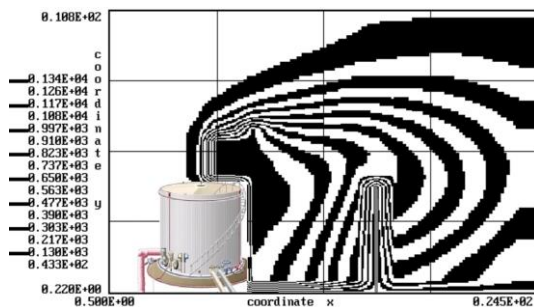
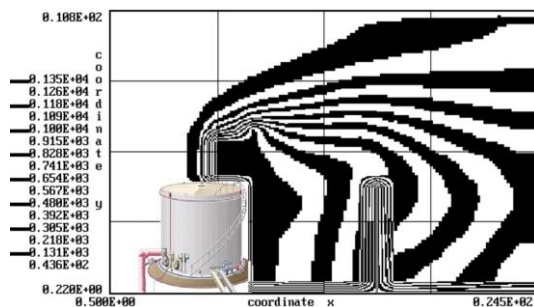
Результати

Розроблені чисельні моделі було використано для розв'язання модельної задачі. Розглядаємо пожежу на промисловому майданчику. На певній довжині від нафтоховища розташований захисний бар'єр (рис. 3) (матеріал бар'єра – сталь). Ставимо задачу: визначити динаміку формування зони теплового забруднення на промисловому майданчику в разі виникнення пожежі та розрахувати температуру в середині захисного бар'єра.

Для проведення обчислювального експерименту швидкість вітру взято 7 м/с, температуру на місці пожежі 1 300 °С, висоту захисного бар'єра 4 м, товщину 2 см, матеріал – сталь. Початкова температура в середині захисного бар'єра 20 °С. Температура атмосферного повітря на промисловому майданчику дорівнює 20 °С.

Далі на рис. 4–6 показано динаміку формування температурних полів на промисловому майданчику для різних моментів часу після початку пожежі.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Рис. 4. Ізотерми, $t = 1,2$ сFig. 4. Isotherms, $t = 1,2$ сРис. 5. Ізотерми, $t = 1,9$ сFig. 5. Isotherms, $t = 1,9$ сРис. 6. Ізотерми, $t = 2,6$ сFig. 6. Isotherms, $t = 2,6$ с

Як можемо бачити з рис. 4–6, на промисловому майданчику дуже швидко формується значна за розмірами зона інтенсивного теплового забруднення, що створює ризик ураження працівників. Наявність захисного бар'єра на промисловому майданчику призводить до суттєвої деформації цієї зони. Дані математичного моделювання показують, що для моменту часу $t = 2,8$ с температура повітря на навідному боці захисного бар'єра змінюється від $T_A = 962$ °C в його нижній частині, до $T_A = 1027$ °C у верхній. З іншого боку бар'єра, підвітряного, температура змінюється від $T_B = 728$ °C в нижній частині до $T_B = 963$ °C у верхній.

Далі на рис. 7 показано розподіл температури в середині захисного бар'єра для двох моментів часу: $t = 3,02$ с; $t = 3,78$ с. Розглядаємо переріз бар'єра на висоті 2 м. Точці 0 відповідає навітряний бік захисного бар'єра.

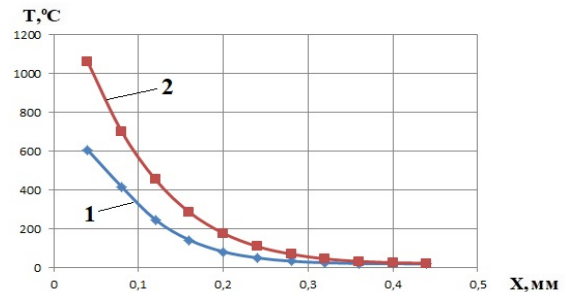


Рис. 7. Розподіл температури в середині захисного бар'єра:

1 – $t = 3,02$ с; 2 – $t = 3,78$ с

Fig. 7. Temperature distribution inside the protective barrier:

1 – $t = 3,02$ s; 2 – $t = 3,78$ s

Як можемо бачити з рис. 7, температура в середині бар'єра для вказаних моментів часу не досягає критичного значення, яке потрібне для руйнування конструкції від термічної дії.

Відзначимо, що час розрахунку становив 3 с.

Наукова новизна та практична значимість

Наведено швидкорозрахункову чисельну модель для оцінювання часу руйнування захисного бар'єра на промисловому майданчику, де має місце пожежа. Аналіз теплових полів на промисловому майданчику та в середині захисного бар'єра здійснено шляхом чисельного інтегрування багатфакторного рівняння теплопереносу та теплопровідності. Задачу аеродинаміки розв'язано на базі моделі потенціального руху.

Запропоновані чисельні моделі можуть бути використані для первинної оцінки температурного поля всередині захисного бар'єра з метою визначення її ефективності з точки зору захисту зон від теплового забруднення на промисловому майданчику.

Висновки

У статті розглянуто розв'язання задачі теплопровідності – визначення температури в середині захисного бар'єра, що перебуває під дією теплового навантаження біля місця пожежі.

Розроблені чисельні моделі дають можливість аналізувати теплові поля на промисловому майданчику та динаміку зміни температури в середині захисного бар'єра.

Побудовані чисельні моделі базуються на чисельному інтегруванні рівнянь аеродинаміки, теплопереносу та теплопровідності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамов Ю. А., Басманов А. Е., Тарасенко А. А. *Моделирование пожаров, их обнаружения локализации и тушения*. Харьков : НУГЗУ, 2011. 927 с.
2. Басманов А. Е., Михайлюк А. А., Кулик Я. С. Математическая модель нагрева теплового датчика под тепловым воздействием пожара разлива нефтепродукта. *Проблемы пожарной безопасности*. 2012. Вып. 32. С. 21–25.
3. Басманов А. Е., Говаленков С. С. Оценка концентрации опасных химических веществ в воздухе при непрерывной активности источника. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2010. Вип. 12. С. 21–27.
4. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Чередниченко Л. А. Оцінка ризику термічного ураження у випадку аварійного горіння. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 6. С. 54–60. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.241120.54.698>
5. Біляєв М. М., Калашніков І. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Берлов О. В. *Математичне моделювання в задачах оцінки ризику на потенційно небезпечних об'єктах*. Дніпро : Журфонд, 2021. 270 с.
6. Біляєва В. В. Використання математичних моделей для оцінювання рівня теплового та хімічного забруднення робочих зон. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 3. С. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.010721.39.765>
7. Виноградов А. Г. Моделювання процесу формування водяної завіси за допомогою програмного комплексу FlowVision. *Пожарна безпека: теорія і практика: Збірник наукових праць*. 2010. № 6. С. 19–25.
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. Стоецкий В. Ф., Голинько В. И., Дранишников Л. В. Оценка риска при авариях техногенного характера. *Науковий вісник НГУ*. 2014. № 3. С. 117–124.
10. Biliaiev M., Kharytonov M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI (Springer)*. 2012. P. 87–91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15
11. Elhelw M., El-Shobaky A., Attia A., El-Maghlany W. M. Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 146. P. 670–685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.002>
12. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life (Banja Luka) – APEIRON*. 2018. Vol. 16. Iss. 1–2. P. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i>
13. Matveev Y., Abu-Abed F., Zhironkina O., Zhironkin S. Simulation Modeling of the Process of Danger Zone Formation in Case of Fire at an Industrial Facility. *Fire*. 2024. Vol. 7. Iss. 7. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7070221>
14. Paula H. M. Insights from 595 tank farm fires from around the world. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023. Vol. 171. P. 773–782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.058>
15. Sun S., Gura D., Dong Bo. Fire safety assessment models based on machine learning methods for the coal industry. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2022. Vol. 231. P. 104693. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2022.104693>

M. M. BILIAIEV^{1*}, V. V. BILIAIEVA², P. S. KIRICHENKO³, V. A. KOZACHYNA⁴,
V. M. POLTORATSKA⁵

¹Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazariana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

²Dep. Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and technologies, SEI DMI, Science Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail v.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-2399-3124

³Dep. «Heat, Gas, Water Supply, Water Drainage and Ventilation», Kryvyi Rih National University, Vitaly Matusevich St., 11, Kryvyi Rih, Ukraine, 50027, tel. +38 (056) 409 06 06, e-mail pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

⁴Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazariana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

⁵Dep. Ecology and Environmental Protection, Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI PSACEA, Architect Oleh Petrov St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38(056) 756 33 71, e-mail poltoratskaya.viktoriya@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-6244-8439

Mathematical Modeling of the Process of Non-Stationary Heat Conduction Throughout the Wall

Purpose. Extreme situations at industrial facilities often lead to fires, in particular, fires occur in the event of drone attacks on oil storage facilities. In such cases, a significant amount of chemically hazardous substances (fuel combustion products) are released into the air, posing a risk of thermal injury to workers. Various means and structures are used to reduce the risk of thermal injury. When designing protective structures, it is necessary to determine in advance their effectiveness and the time of possible destruction. This requires the development and use of specialized mathematical models. This work is devoted to the development of numerical models that allow predicting thermal fields at an industrial site in case of fire and assessing the risk of destruction of a protective wall (barrier). **Methodology.** To numerically solve aerodynamic problems (determining the wind speed field), calculate areas of thermal pollution of the air at an industrial site, and determine the dynamics of temperature changes inside a protective barrier (wall), we use fundamental models of continuum mechanics. Finite difference schemes are used for the numerical solution of simulation equations. **Findings.** A computer program has been developed that makes it possible to solve a «coupled» problem of determining the zone of thermal pollution of air at an industrial site and the dynamics of heating of a protective barrier (wall). Using the proposed numerical model and computer program, it is possible to solve the problem of thermal conductivity and heat transfer in real time. **Originality.** A fast-calculation numerical model is presented for estimating the time of destruction of a protective barrier at an industrial site where a fire occurs. The analysis of thermal fields at an industrial site and inside the protective barrier was carried out by numerical integration of a multivariable heat transfer and heat conduction equation. The aerodynamics problem was solved based on a potential motion model. These numerical models require little computer time for practical implementation. **Practical value.** The proposed numerical models can be used for a preliminary assessment of the temperature field inside the protective barrier to determine its effectiveness in terms of protecting areas from thermal pollution at an industrial site. This info can be useful at the preliminary design stage of protective structures.

Key words: protective barrier; temperature field; fire; heat transfer; mathematical modeling; industrial site; occupational safety

REFERENCES

1. Abramov, Yu. A., Basmanov, A. Ye., & Tarasenko, A. A. (2011). *Modelirovanie pozharov, ikh obnaruzheniya lokalizatsii i tusheniya*. Kharkov: NUGZU. (in Russian)
2. Basmanov, A. E., Mykhailiuk, A. O., & Kulik, Y. S. (2012). Mathematical model for temperature sensor heating under thermal impact of fire of the spill. *Fire safety*, 32, 21-25. (in Russian)
3. Basmanov, Ye., & Govalenkov, S. S. (2010). The concentration of hazardous chemicals in the air at a continuous activity of the source. *Problems of Emergency Situations*, 12, 21-27. (in Russian)
4. Biliaiev, M. M., Berlov, O. V., Biliaieva, V. V., & Cherednychenko, L. A. (2020). Risk assessment of thermal damage in the event of emergency burning. *Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 6, 54-60. DOI: <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.241120.54.698> (in Ukrainian)
5. Biliaiev, M. M., Kalashnikov, I. V., Biliaieva, V. V., Kozachyna, V. A., & Berlov, O. V. (2021). *Matematychni modeliuvannia v zadachakh otsinky ryzyku na potentsiino nebezpechnykh ob'ektakh*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)

6. Biliaieva, V. (2021). Mathematical models application to predict heat and chemical air pollution in working areas. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, 3, 39-45.
DOI: <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.010721.39.765> (in Ukrainian)
7. Vynogradov, A. Gh. (2010). Modeljuvannja procesu formuvannja vodjanoji zavisy za dopomoghoju programnogho kompleksu FlowVision. *Pozhezhna bezpeka: teoriya i praktyka: Zbirnyk naukovykh pracj*, 6, 19-25. (in Ukrainian)
8. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Biliaiev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovani-erasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
9. Stoetsky, V. F., Golinko, V. I. & Dranishnikov, L. V. (2014). Risk assessment in man-caused accidents. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 117-124. (in Russian)
10. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2011). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and Its Application XXI*, 87-91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)
11. Elhelw, M., El-Shobaky, A., Attia, A., & El-Maghlany, W. M. (2021). Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 670-685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.002> (in English)
12. Ilić, P., Ilić, S., & Stojanović Bjelić, L. (2018). Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life (Banja Luka) – APEIRON*, 16(1-2), 38-45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i> (in English)
13. Matveev, Y., Abu-Abed, F., Zhironkina, O., & Zhironkin, S. (2024). Simulation Modeling of the Process of Danger Zone Formation in Case of Fire at an Industrial Facility. *Fire*, 7(7), 1-23. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7070221> (in English)
14. Paula, H. M. (2023). Insights from 595 tank farm fires from around the world. *Process Safety and Environmental Protection*, 171, 773-782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.058> (in English)
15. Sun, S., Gura, D., & Dong, B. (2022). Fire safety assessment models based on machine learning methods for the coal industry. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 231, 104693. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2022.104693> (in English)

Надійшла до редколегії: 13.05.2025

Прийнята до друку: 09.09.2025