

УДК 519.6:504.5:614.84

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.20.950

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЕННЯ РИЗИКУ ТЕРМІЧНОГО УРАЖЕННЯ У ВИПАДКУ ПОЖЕЖІ НА ОБ'ЄКТАХ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ

БІЛЯЄВ М. М.¹, докт. техн. наук, проф.,
ПЕТРЕНКО В. Д.², докт. техн. наук, проф.,
БІЛЯЄВА В. В.³, докт. техн. наук, доц.,
БЕРЛОВ О. В.^{4*}, канд. техн. наук, доц.,
ТИМОШЕНКО О. А.⁵, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Кафедра мостів та тунелів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-53, e-mail: petrenko.diit@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2201-3593

³ Кафедра аерогідромеханіки та енергомасопереносу, Дніпровський національний університет імені Олеся 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

^{4*} Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 247-16-01, e-mail: berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

⁵ Кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 452-43-63, e-mail: tymoshenko.olena@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

Анотація. Постановка проблеми. Розглядається задача прогнозування теплового забруднення повітря та оцінки ризику термічного ураження людей під час пожежі на промисловому майданчику. Ставиться задача розрахувати 3D температурних полів під час пожежі та на базі цього оцінити ризик термічного ураження людей. **Мета** – розроблення 3D чисельної моделі для розрахунку теплового забруднення повітря та оцінення ризику термічного ураження працівників на промисловому майданчику під час пожежі. **Методика.** Для моделювання процесу теплового забруднення повітря на промисловому майданчику у разі виникнення пожежі використано тривимірне рівняння енергії. Для розрахунку поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику застосовується тривимірне рівняння для потенціалу швидкості. Для чисельного інтегрування рівняння для потенціалу швидкості – метод розщеплення. Для чисельного інтегрування тривимірного рівняння енергії здійснюється його розщеплення на диференціальному рівні на два рівняння. Перше рівняння описує поширення температури внаслідок руху повітряних мас. Друге рівняння описує поширення температури внаслідок теплопровідності. Для чисельного інтегрування першого рівняння використовується змінно-трикутна різницева схема розщеплення. Для чисельного інтегрування другого рівняння – явна різницева схема. **Наукова новизна.** Побудована 3D чисельна модель, що дозволяє швидко розраховувати динаміку формування областей теплового забруднення повітря на промисловому майданчику та на базі цієї інформації прогнозувати ризик термічного ураження людей в робочих зонах на промисловому майданчику та базується на чисельному інтегруванні рівнянь аеродинаміки та теплопереносу. Модель дозволяє швидко розраховувати динаміку формування теплових зон на промисловому майданчику у випадку пожежі. **Практична значущість.** Розроблена модель дозволяє прогнозувати динаміку зміни температурних полів у повітрі, що виникають під час пожежі на промисловому майданчику. Чисельна модель може бути використана для визначення зон інтенсивного теплового забруднення та оцінення ризику термічного ураження працівників. **Висновки.** На базі розробленої 3D чисельної моделі створено код для проведення обчислювального експерименту. Розроблений код дозволяє швидко розрахувати динаміку формування областей теплового забруднення повітря на промисловому майданчику під час пожежі. На основі отриманої інформації оцінюється ризик термічного ураження працівників. Наведено результати обчислювального експерименту.

Ключові слова: теплоперенос; пожежа; чисельне моделювання; ризик ураження; теплове забруднення повітря

MATHEMATICAL MODEL FOR RISK ASSESSMENT OF THERMAL DAMAGE IN CASE OF FIRE AT THE FACILITIES OF THE FUEL AND ENERGY COMPLEX

BILIAIEV M.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
PETRENKO V.D.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BILIAIEVA V.V.³, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
BERLOV O.V.^{4*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
TYMOSHENKO O.A.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

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

² Department of Bridges and Tunnels, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-53, e-mail: petrenko.diit@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2201-3593

³ Department of Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharina Ave., Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 374-98-22, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

^{4*} Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

⁵ Department of Ecology and Environmental Protection, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 452-43-63, e-mail: tymoshenko.olena@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

Abstract. Problem statement. The task of prediction for thermal air pollution and assessing the risk of thermal damage to people during a fire at an industrial site is considered. The task is to calculate 3D temperature fields during a fire and, based on this, to assess the risk of thermal damage to people. **The purpose of the article.** Development of a 3D numerical model for calculating thermal air pollution and assessing the risk of thermal damage to workers at an industrial site in the case of a fire. **Methodology.** A three-dimensional energy equation was used to model the process of thermal air pollution at an industrial site in the case of a fire. A three-dimensional equation for the velocity potential is used to calculate the air flow velocity field at the industrial site. For the numerical integration of the equation for the velocity potential, the splitting method is used. For the numerical integration of the three-dimensional energy equation, it is split at the differential level into two equations. The first equation describes the spread of temperature due to the movement of air masses. The second equation describes the temperature distribution due to thermal conductivity. For the numerical integration of the first equation, a variable-triangular difference splitting scheme is used. An explicit difference scheme is used for the numerical integration of the second equation. **Scientific novelty.** A 3D numerical model was created, which allows to quickly calculate the dynamics of the formation of thermal air pollution areas at the industrial site and, based on this information, to predict the risk of thermal damage to people in the work zones at the industrial site. The model is based on the numerical integration of the aerodynamic and heat transfer equations. The model allows to quickly calculate the dynamics of the thermal zones' formation at the industrial site in the case of a fire. **Practical value.** The developed model makes it possible to predict the dynamics of changes in temperature fields in the air that occur during a fire at an industrial site. The numerical model can be used to determine zones of intense thermal pollution and assess the risk of thermal damage to workers. **Conclusions.** On the basis of the developed 3D numerical model, a code was created for conducting a computational experiment. The developed code allows to quickly calculate the dynamics of the formation of thermal air pollution areas at an industrial site during a fire. Based on the received information, the risk of thermal damage to workers is assessed. The results of the computational experiment are presented.

Keywords: *heat transfer; fire; numerical modeling; risk of damage; thermal air pollution*

Постановка проблеми. Екстремальні ситуації на промислових об'єктах, об'єктах підвищеної небезпеки, зокрема, на об'єктах паливно-енергетичного комплексу супроводжуються викидом у повітря різних хімічно небезпечних речовин, вибухами, а також пожежами [1–3; 7; 8; 11; 12]. Особливо небезпечні екстремальні ситуації на об'єктах паливно-енергетичного комплексу, які часто супроводжуються масштабними пожежами (рис. 1).



Рис. 1. Пожежа у сховищі нафтопродуктів
[<http://surl.li/gtyjg>]

Це створює загрозу здоров'ю та життю працівників. Тому вкрай важливо прогнозувати наслідки таких екстремальних

ситуацій з метою розроблення науковообґрунтованих систем захисту працівників. Для розв'язання цієї відповідальної задачі потрібно мати сучасні математичні моделі, оскільки проведення фізичного експерименту для розв'язання задач даного класу потребує складного, коштовного обладнання та значного часу.

Створення таких моделей – сучасний напрям у галузі математичного моделювання складних процесів тепломасопереносу [1; 4–6].

Аналіз останніх досліджень. Ризик ураження працівників під час виникнення екстремальних ситуацій може бути визначений шляхом використання спеціалізованих математичних моделей [1–5; 8; 9]. Ці моделі відрізняються ступенем деталізації процесу, що моделюється. Так, емпіричні та аналітичні моделі враховують лише незначну кількість фізичних факторів, що впливають на формування полів хімічного або теплового забруднення [7–9; 12]. Такі моделі дають можливість визначити ризик ураження «в першому наближенні». Чисельні моделі дозволяють урахувати значну кількість фізичних факторів та отримати більш обґрунтовані оцінки величини ризику [6; 10; 11]. Але дефіцит чисельних моделей існує і це пов'язано з тим, що екстремальні ситуації дуже різноманітні, тому процес створення спеціалізованих математичних моделей триває і бачиться важливим науковим напрямом.

Мета дослідження. Побудова тривимірної CFD-моделі для оцінення ризику термічного ураження під час пожежі на об'єктах паливно-енергетичного комплексу.

Методика. Ризик термічного ураження працівників виникає, коли людина потрапляє в область із підвищеною температурою повітря. Це створює загрозу ураження шкіри, легень унаслідок вдихання нагрітого повітря. Будемо враховувати, що за температури повітря в робочій зоні понад 100 °C у робочій зоні існує 100 % ризик термічного ураження організму.

Для прогнозування динаміки формування теплових полів біля місця пожежі використовується тривимірне рівняння енергії [2; 3; 6]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial (w+w_z)T}{\partial z} = \text{div}(a \text{ grad} T), \quad (1)$$

де T – температура повітря; $a = (a_x, a_y, a_z)$ – коефіцієнти теплопровідності; u, v, w – складові вектора руху повітряного потоку; x_i, y_i, z_i – декартові координати; w_z – швидкість руху нагрітого повітря вгору; t – час.

Для рівняння енергії ставляться такі граничні умови [4–6]:

1. Область втікання повітряного потоку:

$$T = T_{in},$$

де T_{in} – відома фонові температура повітря.

2. Область виходу повітряного потоку:

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

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

3. На поверхні землі, різних об'єктів:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0.$$

За початкову умову ($t = 0$) приймається: $T = T_0$, де T_0 – температура повітря на місці пожежі.

Для моменту часу $t = 0$ також приймається, що в іншій частині розрахункової області температура повітря дорівнює фоновій температурі.

На рух нагрітого повітря впливають різного роду об'єкти, розташовані біля місця пожежі. Для визначення компонент вектора швидкості повітряного потоку в цьому випадку потрібно розв'язати задачу аеродинаміки. Для цього використовується наступне рівняння [6]:

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

де P – потенціал швидкості.

Якщо потенціал швидкості – відома величина, значення компонент швидкості обчислюється так [6]:

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

Для рівняння (2) ставляться такі граничні умови:

$$1. \quad \frac{\partial P}{\partial n} = 0 \quad \text{– на твердих границях}$$

(поверхня землі, поверхня об'єктів);

$$2. \quad \frac{\partial P}{\partial n} = V_n \quad \text{– на межі, де потік, } V_n \text{ –}$$

відома швидкість повітряного потоку;

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

На вході в розрахункову область задається нерівномірний профіль швидкості повітряного потоку на вході в розрахункову область (модель Швеця – Юдіна):

$$u = u_1 \begin{pmatrix} \lg \frac{z}{z_0} \\ \lg \frac{z_1}{z_0} \end{pmatrix},$$

де u_1 – швидкість вітру на висоті, z_1, z_0 – шорсткість.

При проведенні обчислювального експерименту приймається: $\mu_x = k_0 \cdot u$, $k_0 = 0.1$, u – локальна швидкість вітру,

$$\text{м/с; } \mu_x = \mu_y; \quad \mu_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m, \quad k_1 = 0.1 \text{ м}^2/\text{с},$$

$$z_1 = 1 \text{ м, } m \approx 1.$$

Таким чином, процес прогнозування рівня теплового забруднення повітря та ризику термічного ураження людей складається з послідовного розв'язання двох задач: по-перше, задачі аеродинаміки на базі рівняння (2) та залежностей (3), а далі – розв'язується рівняння енергії (1) та визначається поле температур на деякий момент часу після виникнення пожежі.

Методика розв'язання. Для чисельного інтегрування (2) приведемо його до еволюційного вигляду:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}, \quad (4)$$

де t – фіктивний час.

Далі застосовується різницева схема розщеплення:

– на першому етапі розщеплення використовується таке різницеве рівняння:

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

– на другому етапі розщеплення :

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

Невідоме значення потенціалу швидкості обчислюється за явною формулою на кожному кроці розщеплення. Умовою для припинення розрахунку поля потенціалу є:

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

де ε – мале число.

Оскільки розв'язуються рівняння еволюційного типу (4), для початку розрахунку потенціалу швидкості потрібно задати значення його для фіктивного $t = 0$. Приймаємо, що на початок розрахунку $P = 0$ в усій розрахунковій області.

Далі здійснюється розрахунок компонент швидкості потоку:

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

$$w_{ijk} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j,k-1}}{\Delta z}.$$

На наступному кроці здійснюється чисельне інтегрування рівняння (1). Спочатку виконаємо таке розщеплення:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_z \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (6)$$

Зауважимо, що тут використовується позначення $w = w^+ + w^-$. Для чисельного інтегрування рівняння (5) беремо такі залежності [10]:

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

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

$$\frac{\partial wT}{\partial z} = \frac{\partial w^+T}{\partial z} + \frac{\partial w^-T}{\partial z},$$

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\partial w^-T}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^- T_{i,j,k+1}^{n+1} - w_{i,j,k}^- T_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^- T^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^+T}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^+ T_{i,j,k} - w_{i,j,k}^+ T_{i,j,k-1}}{\Delta y} = L_z^+ T^{n+1}.$$

Схема розщеплення для рівняння (5) записується так [10]:

– на першому кроці різницеве рівняння має вигляд:

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

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- T^{n+1} + L_y^- T^{n+1} + L_z^- T^{n+1} = 0.$$

Невідоме значення температури T у кожному рівнянні визначається за явною формулою.

Для чисельного інтегрування рівняння (6) використовується явна різницева схема. Розрахункова залежність має вигляд [6]:

$$T_{i,j,k}^{n+1} = T_{i,j,k}^n + \text{Vt} \frac{T_{i+1,j,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j,k}^n}{\Delta x^2} a_x + \\ + \text{Vt} \frac{T_{i,j+1,k}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} a_y + \\ + \text{Vt} \frac{T_{i,j,k+1}^n - 2T_{i,j,k}^n + T_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} a_z.$$

Здійснено програмну реалізацію розглянутих різницевоїх 3D-залежностей, що створюють основу побудованої чисельної моделі. На базі розробленої чисельної моделі створено код, мова програмування – FORTRAN.

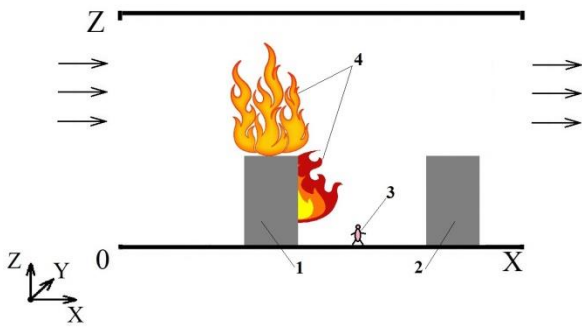


Рис. 2. Схема розрахункової області: 1 – місце горіння (резервуар із нафтопродуктами); 2 – резервуар із нафтопродуктами без горіння; 3 – робоча зона; 4 – полум'я

Результати. На базі розробленої чисельної моделі розв'язано модельну задачу. Розглядаються два резервуари з нафтопродуктами (рис. 2). На першому резервуарі виникає пожежа. Потрібно визначити динаміку формування температурних полів на промисловому майданчику, де розташовані резервуари. Швидкість вітру $u_1 = 7\text{ м/с}$, $z_0 = 2\text{ см}$. Розміри розрахункової області $100 \times 90 \times 90\text{ м}$.

На рисунках 3–6 показано, як формується теплове поле на промисловому майданчику з часом. На рисунках 3, 4 кожне число показує температуру у відсотках від максимальної температури $T = 1100^\circ\text{C}$, що прийнята за температуру на місці пожежі (переріз $y = 45\text{ м}$).

На рисунках 5, 6 показано ізотерми на промисловому майданчику для різних моментів часу (переріз $y = 45\text{ м}$).

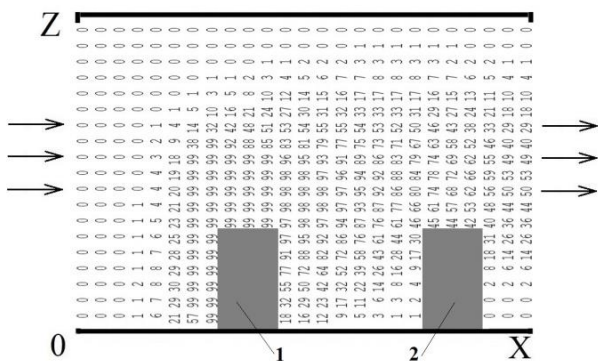


Рис. 3. Зона теплового забруднення на промисловому майданчику, $t = 5.7\text{ с}$: 1, 2 – резервуари

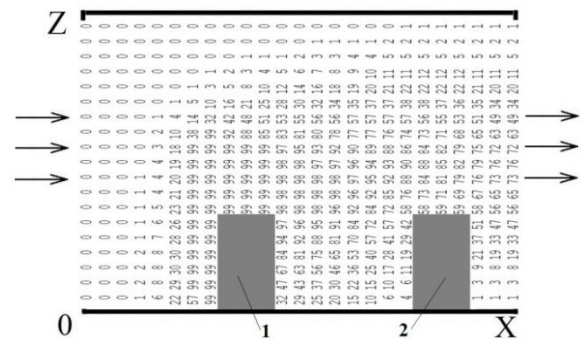


Рис. 4. Зона теплового забруднення на промисловому майданчику, $t = 7,7\text{с}$: 1, 2 – резервуари

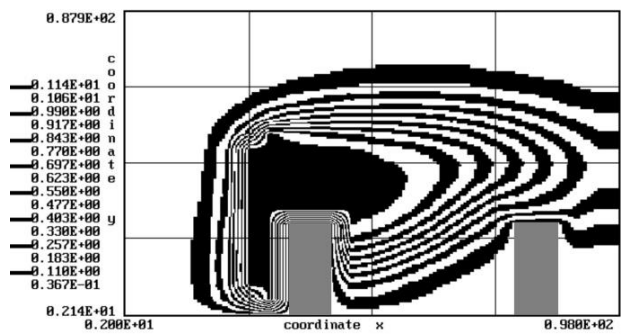


Рис. 5. Зона теплового забруднення на промисловому майданчику, $t = 4,6\text{ с}$

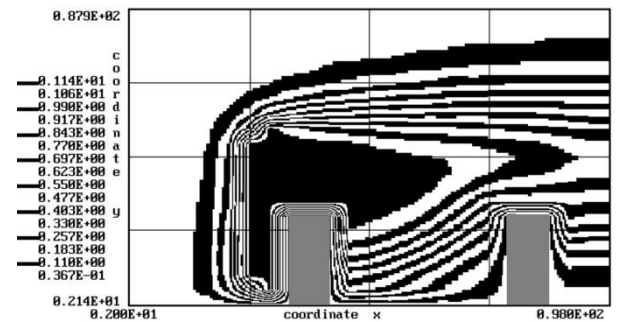


Рис. 6. Зона теплового забруднення на промисловому майданчику, $t = 8,7\text{ с}$

Як можна бачити з наведених рисунків, перешкода (другий резервуар), суттєво впливає на деформацію поля температур, що формується на промисловому майданчику.

На рисунку 7 показано зміну температури на поверхні другого резервуара.

Як можна бачити з рисунка 7, температура на поверхні другого резервуара дуже швидко зростає, що створює загрозу руйнування цього резервуара.

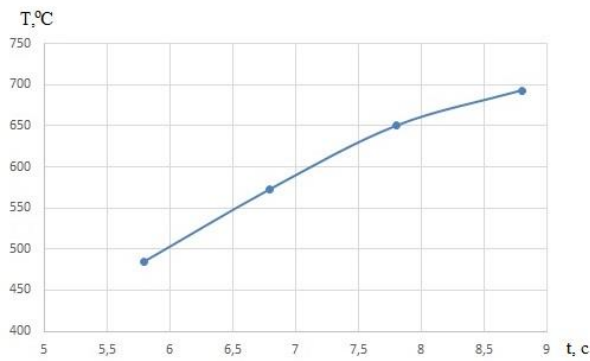


Рис. 7. Зміна температури повітря на даху другого резервуара

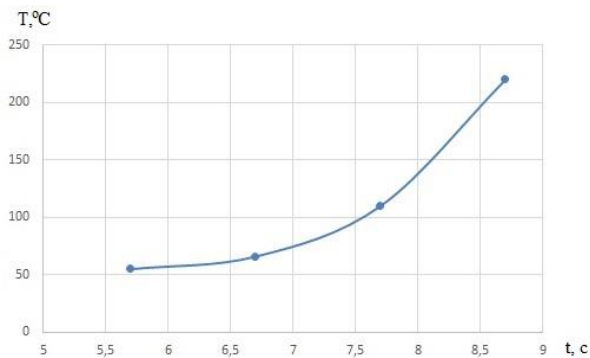


Рис. 8. Зміна температури повітря в робочій зоні

На рисунку 8 показана зміна температури повітря в робочій зоні (рис. 2) з часом.

Дані на рисунку 8 показують, що вже за 7 с після початку пожежі температура повітря в робочій зоні має значення, яке створює ризик термічного ураження працівників.

Зазначимо, що час розрахунку склав 11 секунд.

Висновки.

1. Запропоновано 3D чисельну модель, що дозволяє в режимі реального часу прогнозувати формування теплових полів біля місця пожежі та оцінювати ризик термічного ураження працівників.

2. Розрахунок динаміки формування полів теплового забруднення повітря біля місця пожежі здійснюється шляхом чисельного інтегрування тривимірних рівнянь енергії та динаміки руху повітряних мас.

3. Результати проведеного обчислювального експерименту показали, що побудована чисельна модель дозволяє прогнозувати теплове забруднення повітря з урахуванням впливу перешкод на рух нагрітого повітря, що дуже важливо для практичного застосування моделі.

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., Говаленков С. С. Оценка концентрации опасных химических веществ в воздухе при непрерывной активности источника. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2010. Вип. 12. С. 21–27.
3. Басманов А. Е. Математическая модель нагрева теплового датчика под тепловым воздействием пожара разлива нефтепродукта. *Проблеми пожежної безпеки*. 2012. Вип. 32. С. 21–25.
4. Біляєва В. В. Використання математичних моделей для оцінювання рівня теплового та хімічного забруднення робочих зон. *Український журнал будівництва та архітектури*. № 3 (003). 2021. С. 39–45.
5. 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.
6. 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 : монографія. Дніпро : Журфонд, 2021. 270 с.
7. Виноградов А. Г. Моделювання процесу формування водяної завіси за допомогою програмного комплексу FlowVision. *Пожежна безпека: теорія і практика*. № 6. 2010. С. 19–25.
8. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. Москва : Стройиздат, 1990. 420 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. 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.
11. Biliaiev M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI (Springer)*. 2012. Pp. 87–91.
12. 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.

REFERENCES

1. Abramov Yu.A., Basmanov A.E. and Tarasenko A.A. *Modelirovaniye pozharov. ikh obnaruzheniya lokalizatsii i tusheniya* [Modeling of fires, their detection, localization and extinguishing]. Kharkiv : NUGZU Publ., 2011, 927 p. (in Russian).
2. Basmanov A.E. and Govalenkov S.S. *Ocenka koncentraciy opasnux xymicheskix veshhestv v vozduxe pry nepreruvnoj aktivnosti istochnyka* [Estimation of the concentration of hazardous chemicals in the air with continuous source activity]. *Problemy nadzvychnykh situacij* [Problems of Emergency Situations]. Vol. 12, 2010, pp. 21–27. (in Russian).
3. Basmanov A.E. *Matematicheskaya model nagreva teplovogo datchika pod teplovym vozdeystviyem pozhara razliva nefteprodukta* [Mathematical model of heating a thermal sensor under the thermal effect of an oil spill fire]. *Problemy pozharной bezopasnosti* [Fire Safety Issues]. Vol. 32, 2012, pp. 21–25. (in Russian).
4. Biliaieva V.V. *Vykorystannya matematychnykh modelej dlya ocinyuvannya rivnya teplovogo ta ximichnogo zabrudnennya robochyx zon.* [Use of mathematical models to assess the level of thermal and chemical contamination of working areas]. *Ukrayinskyj zhurnal budivnyctva ta arxitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. Vol. 3(003), 2021, pp. 39–45. (in Ukrainian).
5. Biliaiev M.M., Berlov O.V., Biliaieva V.V. and Cherednichenko L.A. *Ocinka ryzyku termichnogo urazhennya u vypadku avarijnogo gorinnya* [Assessment of the risk of thermal injury in case of accidental burning]. *Visnyk Prydniprovkoyi derzhavnoyi akademiyi budivnyctva ta arxitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Vol. 6, 2020, pp. 54–60. (in Ukrainian).
6. Biliaiev M.M., Kalashnikov I.V., Biliaieva V.V., Kozachyna V.A. and Berlov O.V. *Matematychni modelyuvannya v zadachax ocinky ryzyku na potencijno nebezpechnykh obyektax : monografiya* [Mathematical modeling in risk assessment tasks at potentially dangerous objects : monograph]. Dnipro : Zhurfond Publ., 2021, 270 p. (in Ukrainian).
7. Vinogradov A.G. *Modelyuvannya procesu formuvannya vodyanoyi zavisyy za dopomogoyu programnogo kompleksu FlowVision* [Modeling of the water curtain formation process using the FlowVision software complex]. *Problemy pozharной bezopasnosti ozhezha bezpeka: teoriya i praktyka* [Fire safety: Theory and Practice]. Vol. 6, 2010, pp. 19–25. (in Ukrainian).
8. Drysdale D. *Vvedeniye v dynamyku pozharov* [Introduction to fire dynamics]. Moscow : Strojizdat Publ., 1990, 420 p. (in Russian).
9. Stoetskiy V.F., Golin'ko V.I. and Dranishnikov L.V. *Otsenka riska pri avariyaх tekhnogennogo kharaktera* [Risk assessment for accidents of anthropogenic nature]. *Naukovyi visnyk NHU* [Scientific Bulletin of NMU]. 2014, no. 3, pp. 117–124. (in Russian).
10. 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).
11. Biliaiev M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI* (Springer). 2012, pp. 87–91.
12. Ilic P., Ilic S. and Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool – ALOHA Software. *Quality of Life*. Vol. 9, 2018, pp. 38–45.

Надійшла до редакції: 21.04.2023.