
ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 504.5:614.84.027.1

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, О. В. БЕРЛОВ^{2*}, В. В. БІЛЯЄВА^{3*}, В. А. КОЗАЧИНА^{4*},
І. В. КАЛАШНІКОВ^{5*}

^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Каф. «Безпека життєдіяльності», ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта berlov.oleksandr@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{3*}Каф. «Аерогідромеханіка та тепломасоперенос», Дніпровський національний університет імені Олесья Гончара, просп. Гагаріна, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

^{4*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

^{5*}Харківське відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» АТ «Українська залізниця», вул. Котляра, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

АВАРІЙНЕ ГОРІННЯ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ПАЛИВА: ОЦІНКА РИЗИКУ УРАЖЕННЯ ЛЮДЕЙ В РОБОЧОМУ ПРИМІЩЕННІ

Мета. Ця робота передбачає розробку комп'ютерної моделі для розрахунку ризику термічного ураження людей у цеху в разі аварійного горіння твердого ракетного палива. **Методика.** Для розрахунку поля температури в цеху, з метою визначення зон термічного ураження працівників у приміщенні, використано рівняння, що виражає закон збереження енергії. На базі цього моделювального рівняння розраховано поле температур у цеху за наявності джерела емісії тепла – твердого ракетного палива, що горить. Розрахунок поля швидкості повітряного потоку в цеху, з урахуванням розташування перешкод на шляху розповсюдження теплової хвилі, проведено на базі моделі безвихрового руху повітря – рівняння потенціалу швидкості. Чисельне розв'язання рівняння для потенціалу швидкості виконано за допомогою двокрокової скінченнорізницевої схеми умовної апроксимації. Для чисельного розв'язання рівняння енергії використано різницеву схему розщеплення. На першому етапі побудови різницевої схеми виконано розщеплення двовимірного рівняння енергії на систему одновимірних рівнянь. Кожне одновимірне рівняння дозволяє розрахувати зміну температури в одному координатному напрямку. Для визначення температури використано схему біжучого рахунку. Під час проведення обчислювального експерименту враховано повітрообмін у приміщенні. Оцінку ризику термічного ураження персоналу в приміщенні виконано для різних вірогідностей місця аварійного горіння твердого ракетного палива. **Результати.** За допомогою розробленої чисельної моделі виконано прогнозування зон потенціального ризику термічного ураження персоналу в цеху для різних аварійних ситуацій. **Наукова новизна.** Побудовано комп'ютерну модель для експрес-оцінки потенціального ризику термічного ураження людей в цеху в разі аварійного горіння твердого ракетного палива. **Практична значимість.** Розроблено код, що дозволяє швидко моделювати формування температурних полів у цеху у випадку аварійного горіння твердого ракетного палива, та на базі цієї інформації визначати зони потенціального термічного ураження працівників. Розроблена комп'ютерна програма може бути використана для оцінки ризику термічного ураження на підприємствах хімічної промисловості в разі виникнення аварійних ситуацій.

Ключові слова: чисельне моделювання; ризик ураження; аварійне горіння твердого ракетного палива; теплове забруднення повітря

Вступ

Особливу небезпеку становлять промислові об'єкти, де можливі аварійні ситуації з рапто-вим створенням інтенсивних, різноманітних уражальних факторів (ударна хвиля, теплова хвиля, викид токсичних речовин). У цьому випадку вкрай важливо прогнозувати ризик ураження персоналу на робочих місцях під час виникнення аварійних ситуацій.

Для визначення ризику ураження персоналу в разі аварійних ситуацій використовують аналітичні та чисельні методи прогнозу [3, 6–15]. Ці методи орієнтовані на оцінку ризику токсичного ураження людей під час аварійних викидів токсичних речовин. Водночас актуальною є також задача прогнозування ризику термічного ураження людей під час виникнення аварійних ситуацій. Особливо це важливо для випадків, коли виникає пожежа всередині промислових цехів, де перебуває значна кількість працівників. Ризик термічного ураження може, наприклад, бути у випадку аварійного спалахування твердого ракетного палива в цехах. Температура продуктів горіння твердого ракетного палива є дуже високою. У зв'язку з потужною емісією нагрітих продуктів горіння палива зона термічного забруднення поширюється по цеху та з'являється ризик термічного ураження персоналу в робочих зонах. Для оцінки ризику термічного ураження персоналу необхідно мати математичні моделі.

Мета



Рис. 1. Твердопаливний двигун ракети «Грім–2» в робочому приміщенні (<https://allkharkov.ua/news/state/grom-grianet-v-etom-gody.html>)

У роботі передбачено розробити чисельну модель для оцінки ризику термічного ураження людей в робочому приміщенні в разі аварійного загоряння твердого ракетного палива (ТРП) для ракети «Грім–2» (рис. 1).

Методика

Для оцінки ризику термічного ураження людей у робочому приміщенні у випадку аварійного горіння твердого ракетного палива будемо використовувати рівняння конвективного теплопереносу (двовимірна, планова модель, наближення Бусінеска) [4, 7]:

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

де T – температура повітря; u, v – компоненти вектора швидкості повітряного потоку в приміщенні; $a = (a_x, a_y)$ – коефіцієнти температуропровідності; x_i, y_i – декартові координати; t – час.

Постановка крайових умов для рівняння енергії (1) така [7]:

1. На вході в розрахункову область:

$$T = T_{in},$$

де T_{in} – відома температура повітря (наприклад, $T_{in} = 20^\circ\text{C}$).

2. На границі виходу потоку 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 границях $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$.

Для моменту часу $t=0$, тобто на момент початку розрахунку, ставимо умову $T = T_0$, де T_0 – відома температура повітря в розрахунковій області, наприклад $T_0 = T_{in}$. На місце горіння твердого палива задають температуру продуктів горіння [7].

Шляхом розв'язання рівняння (1) можемо визначити розподіл температури в робочих зо-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

нах, що знаходяться в цеху. Важливо те, що можна отримати нестационарне розв'язання задачі – дані зміни розподілу температури в цеху з часом. Ризик термічного ураження [7] визначають із такої умови: якщо температура повітря в робочій зоні складає більше ніж 100 °С, за якої має місце повна денатурація білка, то в цій точці робочої зони припускають, що ризик ураження дорівнює 100 %.

Для чисельного розв'язання рівняння (1) здійснюємо розщеплення рівняння енергії на диференціальному рівні на послідовність таких рівнянь [5, 7]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (3)$$

Далі для чисельного інтегрування одновимірних рівнянь енергії використовуємо неявну різницеву схему [5, 7]. Виконаємо такі перетворення:

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

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

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

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

Здійсимо подальшу апроксимацію похідних для рівнянь із системи (2), (3) [7]:

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

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

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

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

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

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

Схему розщеплення для рівняння (2) запишемо так [5, 7]:

– на першому кроці різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{T_{i,j}^k - T_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ T^k = M_{xx}^+ T^k + M_{xx}^- T^n; \quad (4)$$

– на другому кроці різницеве рівняння набуде вигляду:

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- T^{n+1} = M_{xx}^+ T^n + M_{xx}^- T^{n+1}. \quad (5)$$

Схема розщеплення для чисельного інтегрування рівняння (3) буде такою:

– на першому кроці отримаємо різницеве рівняння:

$$\frac{T_{i,j}^k - T_{i,j}^n}{\Delta t} + L_y^+ T^k = M_{yy}^+ T^k + M_{yy}^- T^n; \quad (6)$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння матиме вигляд:

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^k}{\Delta t} + L_y^- T^{n+1} = M_{yy}^+ T^n + M_{yy}^- T^{n+1}. \quad (7)$$

Невідоме значення температури T на кожному кроці розщеплення (4) – (7) розраховуємо за формулою біжучого рахунку.

Поле швидкості повітряного потоку u, v , за наявності перешкод на промисловому майданчику, визначаємо на базі моделі потенціалу руху [2, 3, 7]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0; \quad (8)$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

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

Граничні умови для рівняння (8) такі [2, 3, 7]:

- 1) $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ – на твердих границях;
- 2) $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$ – на границі, де потік входить за

допомогою системи вентиляції, V_n – відома швидкість повітря;

3) $P = \text{const}$ – на границі виходу потоку з розрахункової області.

Для чисельного розв'язання цього рівняння будемо використовувати схему умовної апроксимації [5]. Різницеві рівняння розщеплення в цьому випадку такі [5]:

– на першому кроці розщеплення:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right]; \quad (9)$$

– на другому кроці розщеплення:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right]. \quad (10)$$

Невідомі значення потенціалу швидкості $P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}$, $P_{i,j}^{n+1}$ на кожному кроці розщеплення (9), (10) визначаємо за методом біжучого рахунку.

Розрахунок за залежностями (9), (10) закінчується, коли [7]:

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

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.

Для початку розрахунку необхідно задати «початкове» значення потенціалу швидкості

в розрахунковій області, під час проведення розрахунку беремо значення $P_{i,j}^0 = 0$.

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку розраховуємо на сторонах розрахункових комірок так [3, 7]:

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

Після розрахунку компонент швидкості виконуємо розв'язання рівняння енергії, де це поле використовується.

Розглянемо алгоритм розв'язання задачі з визначення потенціального ризику термічного ураження персоналу в цеху [1, 2, 7]. По-перше, на базі чисельного інтегрування базових рівнянь (рівняння енергії та рівняння для потенціалу швидкості) виконуємо розрахунок розподілу температури в цеху для різних аварійних ситуацій. Під час оцінки ризику припускаємо, що вірогідність кожної аварійної ситуації – відома. Після розрахунку поля температур для різних сценаріїв аварії в цеху комп'ютерна програма визначає зони, де значення температури повітря більше ніж температура ураження. Потім друкуємо результати прогнозу ризику термічного ураження для конкретного моменту часу. У цій статті розглянуто різну вірогідність місця загоряння ракетного палива в цеху.

Чисельне розв'язання всіх різницевих рівнянь було запрограмоване. Під час створення комп'ютерного коду для моделювання процесу теплового забруднення повітря використано FORTRAN.

Результати

Побудована чисельна модель була використана для оцінки потенціального ризику термічного ураження людей в цеху, де знаходиться тверде ракетне паливо ракети «Грім-2». У випадку екстремальної ситуації, яка призводить до горіння твердого ракетного палива всередині цеху, може виникнути ефект «доміно» – загорання палива сусіднього ракетного двигуна.

Схему розрахункової області наведено на рис. 2. Стрілка на рисунку показує напрям руху повітря в цеху. Під час проведення розрахунків була поставлена задача визначення рівня температурного забруднення в цеху з часом та в робочій зоні (позиція № 2 на рис. 2). Крат-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

ність повітрообміну в цеху дорівнює $k_p=15$. Початкова температура повітря в цеху становить $20\text{ }^\circ\text{C}$. Ми припускали, що температура продуктів горіння на місці аварії дорівнює $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ [7]. Для проведення розрахунків було враховано вплив корпусів двигунів у цеху на формування температурних полів. Нижче на рис. 3 й 4 наведено динаміку зміни температури повітря в цеху за різні проміжки часу після виникнення аварійної ситуації.

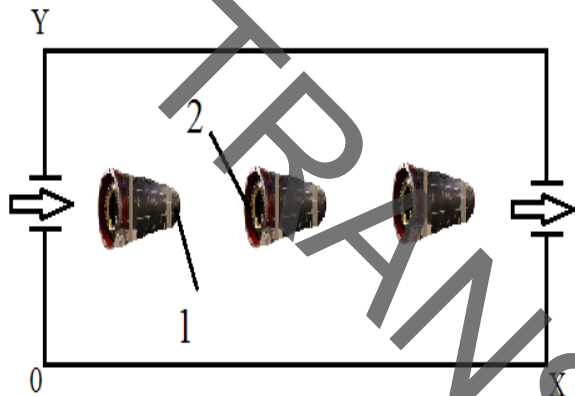


Рис. 2. Схема розрахункової області
1 – місце загорання палива в цеху; 2 – твердопаливні двигуни ракети «Грім-2»

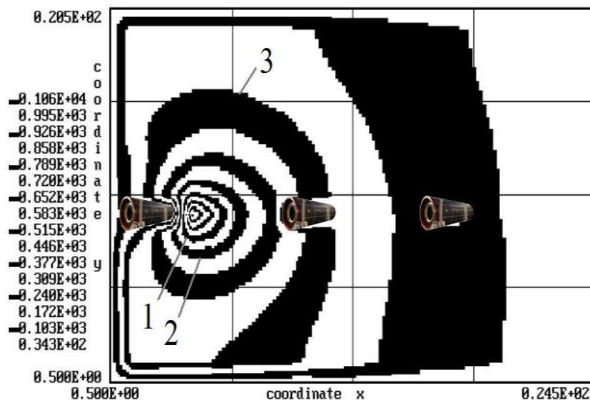


Рис. 3. Зона теплового забруднення (ізотерми) всередині цеху, $t = 11\text{ с}$:
1 – $T = 789\text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $T = 625\text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $T = 377\text{ }^\circ\text{C}$

Аналіз наведених рисунків показує, що зона термічного забруднення формується дуже швидко в цеху. Біля джерела емісії утворюється зона з високим градієнтом температури.

На рис. 5 показана зміна температури з часом у робочій зоні.

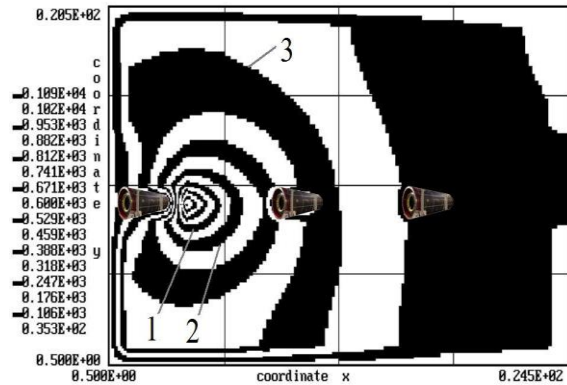


Рис. 4. Зона теплового забруднення (ізотерми) всередині цеху, $t = 15\text{ с}$:
1 – $T = 812\text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $T = 671\text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $T = 388\text{ }^\circ\text{C}$

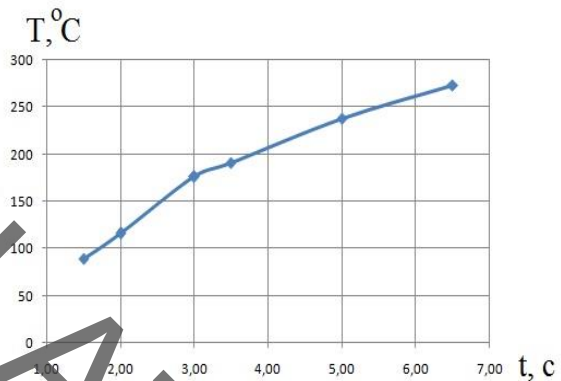


Рис. 5. Зміна температури повітря з часом у робочій зоні

Як бачимо з наведеного рисунка, температура повітря дуже швидко зростає в робочій зоні. За 7 сек вона майже досягає значення $270\text{ }^\circ\text{C}$, тобто виникає ризик не тільки термічного ураження персоналу, а й виникнення ефекту «доміно» – загорання сусіднього ракетного двигуна, який розташований на відстані 5 м від двигуна, де почалося загорання. На рис. 7, 8 показані результати розв'язання іншої задачі з оцінки ризику термічного ураження персоналу в цеху. При цьому розглянуто ситуацію, коли в цеху розташовано декілька твердопаливних двигунів (рис. 6), та подальшу вірогідність екстремальної ситуації – імовірність загорання двигуна в зоні № 1 дорівнює 25 %, а зоні № 2 – 75 %.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

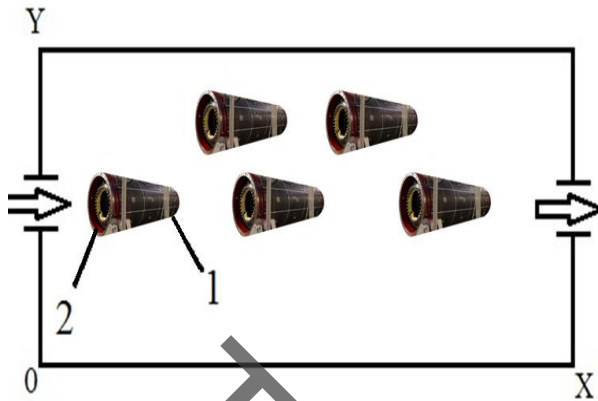


Рис. 6. Схема розрахункової області (цех, де розташовані твердопаливні двигуни):
1 – місце загорання № 1 (імовірність загорання 25 %); 2 – місце загорання № 2 (імовірність загорання 75 %)

На рис. 7, 8 зображено матриці потенційного територіального ризику термічного ураження людей у цеху для різних моментів часу в разі реалізації вказаних імовірних ситуацій.

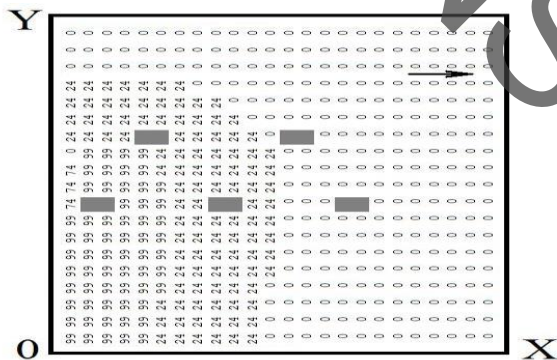


Рис. 7. Імовірність термічного ураження персоналу в цеху на момент часу $t = 12$ с

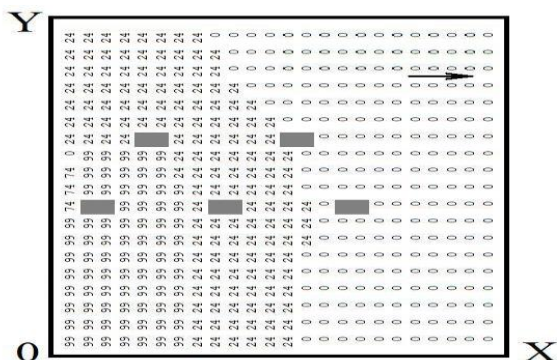


Рис. 8. Імовірність термічного ураження персоналу в цеху на момент часу $t = 24$ с

Із наведених рисунків, бачимо що для розглянутих ситуацій ризик термічного ураження персоналу в цеху екстремально високий, бо зона термічного ураження формується дуже швидко.

Потрібно відзначити, що затрати комп'ютерного часу на розв'язання задачі становлять близько 5 с.

Наукова новизна та практична значимість

Побудовано комп'ютерну модель для експрес-оцінки потенціального ризику термічного ураження людей в цеху в разі аварійного горіння твердого ракетного палива. Розроблено код, що дозволяє швидко моделювати формування температурних полів у цеху у випадку аварійного горіння твердого ракетного палива та на базі цієї інформації визначати зони потенціального термічного ураження працівників.

Розроблена комп'ютерна програма може бути використана для оцінки ризику термічного ураження на підприємствах хімічної промисловості в разі виникнення аварійних ситуацій.

Висновки

1. Запропоновано комп'ютерну модель для прогнозування ризику термічного ураження працівників у цеху в разі виникнення надзвичайної ситуації, що призводить до горіння твердого ракетного палива.

2. На основі даних комп'ютерного моделювання можна зробити висновок, що під час виникнення в цеху надзвичайної ситуації буде мати місце смертельне термічне ураження працівників.

3. Формування зон термічного ураження в цеху буде проходити дуже швидко, тому необхідно розробляти заходи щодо збереження життя працівників.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алымов В. Т., Тарасова Н. П. *Техногенный риск. Анализ и оценка* : учеб. пособие для вузов. Москва : Академкнига, 2004. 118 с.
2. Беляев Н. Н., Гунько Е. Ю., Кириченко П. С., Мунтян Л. Я. *Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте*. Кривой Рог : Р. А. Козлов, 2017. 127 с.
3. 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.
4. Марчук Г. И. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. Москва : Наука, 1982. 320 с.
5. Самарский А. А. *Теория разностных схем*. Москва : Наука, 1983. 616 с.
6. Berlov O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1 (61). С. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60953>
7. Biliaiev M. M., Berlov O. V., Kozachina V. A., Kalashnikov I. V., Shevchenko O. V. Risk assessment of thermal damage to people at industrial sites in case of emergency of burning solid propellant. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 1 (85). С. 7–16. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/200752>
8. Biliaiev M. M., Kharytonov M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C : Environmental Security*. Dordrecht, 2012. P. 87–91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15
9. Boris J., Patnaik G., Obenschain K., Moses A., Obenschain M.-Y., Theodore Y., Delaney J., Donnelly J. Fast and accurate prediction of windborne contaminant plumes for civil defense in cities. *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*. 2010. P. 1–9.
10. Cao C., Li C., Yang Q., Zhang F. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability*. 2017. Vol. 9. Iss. 11. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9112103>
11. Ilić P., Ilić S., Stojanović Bjelić 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/QOL18010381>
12. Komatina D. Ilić, Galjak J., Belošević S. Simulation of chemical accidents with acetylene in «messer tehnogas» kraljevo plant by «aloha» software program. *The University Thought - Publication in Natural Sciences*. 2018. Vol. 8. Iss. 2. P. 19–26. DOI: <https://doi.org/10.5937/univtho8-18014>
13. Lacombe J.-M., Truchot D., Duplantier S. Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. *18 International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (HARMO 18)* (Bologne, Oct 2017). Bologne, 2017. P. 821–825.
14. Lee H., Sohn J.-R., Byeon S.-H., Yoon S., Moon K. Alternative Risk Assessment for Dangerous Chemicals in South Korea Regulation : Comparing Three Modeling Programs. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018. Vol. 15. Iss. 8. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph15081600>
15. Sideris G. M., Christolis M. N., Markatos. N. C. Numerical simulation of pollutants dispersion around an electric-arc-furnace in case of an accidental release. *Biodiversity International Journal*. 2020. Vol. 4. Iss. 1. P. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.15406/bij.2020.04.00164>

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, А. В. БЕРЛОВ^{2*}, В. В. БЕЛЯЕВА^{3*}, В. А. КОЗАЧИНА^{4*},
И. В. КАЛАШНИКОВ^{5*}

^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Каф. «Безопасность жизнедеятельности», ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, эл. почта berlov@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{3*}Каф. «Аэрогидромеханика и энергомасоперенос», Днепропетровский национальный университет имени Олеса Гончара, просп. Гагарина, 72, Днепро, Украина, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

^{4*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

^{5*}Харьковское отделение филиала «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта» АО «Українська залізниця», ул. Котляра, 7, Харьков, Украина, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, эл. почта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

АВАРИЙНОЕ ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА: ОЦЕНКА РИСКА ПОРАЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ В РАБОЧЕМ ПОМЕЩЕНИИ

Цель. Эта работа предусматривает разработку компьютерной модели для расчета риска термического поражения людей в цехе при аварийном горении твердого ракетного топлива. **Методика.** Для расчета поля температуры в цехе, с целью определения зон термического поражения работников в помещении, использовано уравнение, выражающее закон сохранения энергии. На базе этого моделирующего уравнения рассчитано поле температур в цехе при наличии источника эмиссии тепла – горящего твердого ракетного топлива. Расчет поля скорости воздушного потока в цехе, с учетом расположения препятствий на пути распространения тепловой волны, проведен на базе модели безвихревого движения воздуха – уравнения потенциала скорости. Численное решение уравнения для потенциала скорости выполнено с помощью двухшаговой конечноразностной схемы условной аппроксимации. Для численного решения уравнения энергии использована разностная схема расщепления. На первом этапе построения разностной схемы выполнено расщепление двумерного уравнения энергии на систему одномерных уравнений. Каждое одномерное уравнение позволяет рассчитать изменение температуры в одном координатном направлении. Для определения температуры использована схема бегущего счета. При проведении вычислительного эксперимента учтен воздухообмен в помещении. Оценку риска термического поражения персонала в помещении выполнено для различных вероятностей места аварийного горения твердого ракетного топлива. **Результаты.** С помощью разработанной численной модели выполнено прогнозирование зон потенциального риска термического поражения персонала в цехе для различных аварийных ситуаций. **Научная новизна.** Построена компьютерная модель для экспресс-оценки потенциального риска термического поражения людей в цехе в случае аварийного горения твердого ракетного топлива. **Практическая значимость.** Разработан код, позволяющий быстро моделировать формирования температурных полей в цехе при аварийном горении твердого ракетного топлива, и на базе этой информации определять зоны потенциального термического поражения работников. Разработанная компьютерная программа может быть использована для оценки риска термического поражения на предприятиях химической промышленности в случае возникновения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: численное моделирование; риск поражения; аварийное горение твердого ракетного топлива; тепловое загрязнение воздуха

M. M. BILIAIEV^{1*}, O. V. BERLOV^{2*}, V. V. BILIAIEVA^{3*}, V. A. KOZACHYNA^{4*},
I. V. KALASHNIKOV^{5*}

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Dep. «Life Safety», Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24a, Dnipro, Ukraine 49600, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail berlov@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{3*}Dep. «Fluid Dynamics, Energy and Mass Transfer», Oles Honchar Dnipro National University, Haharina Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

^{4*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

^{5*}Kharkiv Branch Office «Design and Research Institute of Railway Transport» of the Ukrainian Railway PJSC, Kotliara St., 7, Kharkiv, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380

EMERGENCY BURNING OF SOLID ROCKET PROPELLANT: DAMAGE RISK ASSESSMENT TO PEOPLE IN THE WORKPLACE

Purpose. This work includes the development of a computer model to calculate the risk of thermal damage to people in the shop in case of emergency burning of solid rocket propellant. **Methodology.** To calculate the temperature field in the shop in order to determine the zones of thermal damage to workers in the building, the equation expressing the law of energy conservation was used. Based on this modeling equation, the temperature field in the shop is calculated in the presence of a source of heat emission – burning solid rocket propellant. To calculate the velocity field of air flow in the shop, taking into account the location of obstacles in the path of heat wave propagation, we used the model of vortex-free air motion – the equation of the velocity potential. A two-step finite difference scheme of conditional approximation is used to numerically solve the equation for the velocity potential. A difference splitting scheme was used to numerically solve the energy equation. At the first stage of construction of the difference splitting scheme of the two-dimensional energy equation into the system of one-dimensional equations is performed. Each one-dimensional equation allows you to calculate the temperature change in one coordinate direction. The point-to-point computation scheme is used to determine the temperature. When conducting a computational experiment, the air exchange in the building is taken into account. The risk assessment of thermal damage to personnel in the building is performed for different probabilities of the place of emergency combustion of solid rocket propellant. **Findings.** Using numerical model prediction of the potential risk areas of thermal damage to staff in the shop for a variety of emergency situations was performed. **Originality.** A computer model for rapid assessment of the potential risk of damage to people in the shop in case of emergency burning of solid rocket propellant was constructed. **Practical value.** The authors developed a code that allows you to quickly simulate the temperature fields formation in the shop in case of emergency burning of solid rocket propellant and to identify potential areas of thermal damages to workers based on this information. The developed computer program can be used to assess the risk of thermal damage in the chemical industry in case of emergency.

Keywords: numerical modeling; risk of damage; emergency burning of solid rocket propellant; thermal pollution of air

REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk. Analiz i otsenka: uchebnoe posobie dlya vuzov.* Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., Kirichenko, P. S., & Muntyan, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogennogo riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte.* Krivoi Rog: Kozlov R. A. (in Russian)
3. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede.* Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
4. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey srede.* Moscow: Nauka. (in Russian)
5. Samarskiy, A. A. (1983). *Teoriya raznostnykh skhem.* Moscow: Nauka. (in Russian)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

6. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60953> (in English)
7. Biliaiev, M. M., Berlov, O. V., Kozachina, V. A., Kalashnikov, I. V. & Shevchenko, O. V. (2020). Risk assessment of thermal damage to people at industrial sites in case of emergency of burning solid propellant. *Science and Transport Progress*, 1(85), 7-16. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/200752> (in English)
8. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2012). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*, 87-91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)
9. Boris, J., Patnaik, G., Obenschain, K., Moses, A., Obenschain, M.-Y., Theodore, Y., Delaney, J. & Donnelly, J. (2010). Fast and accurate prediction of windborne contaminant plumes for civil defense in cities. *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*, 1-9. (in English)
10. Cao, C., Li, C., Yang, Q., & Zhang, F. (2017). Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability*, 9(11), 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9112103> (in English)
11. 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)
12. Komatina, D. Ilić, Galjak, J., Belošević, S. (2018). Simulation of chemical accidents with acetylene in «messer tehnogas» kraljevo plant by «aloha» software program. *The University Thought-Publication in Natural Sciences*, 8(2), 19-26. DOI: <https://doi.org/10.5937/univtho8-18014> (in English)
13. Lacombe, J. M., Truchot, D. & Duplantier S. (2017). Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. *8 International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (HARMO 18)* (pp. 821-825). Bologne, Italy. (in English)
14. Lee, H., Sohn, J.-R., Byeon, S.-H., Yoon, S., & Moon, K. (2018). Alternative Risk Assessment for Dangerous Chemicals in South Korea Regulation: Comparing Three Modeling Programs. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(8), 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph15081600> (in English)
15. Sideris, G. M., Christolis, M. N., Markatos, N. C. (2020). Numerical simulation of pollutants dispersion around an electric-arc-furnace in case of an accidental release. *Biodiversity International Journal*, 4(1), 50-57. DOI: <https://doi.org/10.15406/bij.2020.04.00164> (in English)

Надійшла до редколегії: 30.01.2020

Прийнята до друку: 02.06.2020