

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 614.84.027.1

М. М. БЛЯЄВ^{1*}, О. В. БЕРЛОВ^{2*}, А. В. КОЗАЧИНА^{3*}, І. В. КАЛАШНІКОВ^{4*},
О. В. ШЕВЧЕНКО^{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@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{3*}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 0000-0002-6894-5532

^{4*}Харківське відділення філії «Проектно-вишуквальний інститут залізничного транспорту» АТ «Українська залізниця», вул. Котляра, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта uzr38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{5*}Головне управління ДСНС України у Дніпропетровській області, вул. Короленка, 4, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 744 25 87, ел. пошта dnipro@fireman.dp.ua, ORCID 0000-0001-9907-3610

ОЦІНКА РИЗИКУ ТЕРМІЧНОГО УРАЖЕННЯ ЛЮДЕЙ НА ПРОМИСЛОВИМУ ОБ'ЄКТІ В РАЗІ АВАРІЙНОГО ГОРІННЯ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ПАЛИВА

Мета. Ця робота передбачає розробку чисельної моделі для розрахунку зон термічного ураження людей у разі аварійного горіння твердого ракетного палива на території промислового об'єкта. **Методика.** Для розв'язання поставленої задачі – визначення зон термічного ураження людей на території промислового об'єкта – використано рівняння, що виражає закон збереження енергії. Для розрахунку поля швидкості повітряного потоку за наявності будівель на території промислового об'єкта, де має місце аварійна ситуація, використано модель потенціальної течії. Чисельне розв'язання двовимірного рівняння для потенціалу швидкості проведено за допомогою методу Лібмана. Під час використання цієї чисельної моделі враховано нерівномірне поле швидкості вітрового потоку, що формується біля промислових будівель. Для чисельного розв'язання рівняння енергії використано неявну різницеву схему розщеплення. Попередньо здійснено фізичне розщеплення двовимірного рівняння енергії на систему одновимірних рівнянь, що описують перенос температури в одному координатному напрямку. На кожному кроці розщеплення невідоме значення температури визначено за явною схемою біжучого рахунку. На базі побудованої чисельної моделі створено код за допомогою алгоритмічної мови FORTRAN. **Результати.** На основі розробленої чисельної моделі проведено обчислювальний експеримент для оцінки ризику термічного ураження людей на території промислового об'єкта, де виготовляють тверде ракетне паливо. Визначено зони, які є небезпечними для перебування персоналу. **Наукова новизна.** Розроблено ефективну чисельну модель, що дозволяє розраховувати зони термічного забруднення в разі аварійного горіння твердого ракетного палива. **Практична значимість.** На базі розробленої математичної моделі створено комп'ютерну програму, що дає можливість проводити серійні розрахунки для визначення зон термічного ураження під час надзвичайних ситуацій на території хімічно небезпечних об'єктів. Ця модель може бути використана під час розробки плану ліквідації аварійної ситуації (ПЛАС) для хімічно небезпечних об'єктів.

Ключові слова: ризик термічного ураження; аварійне горіння твердого ракетного палива; математичне моделювання

Вступ

На хімічно небезпечних об'єктах можливі різні аварійні ситуації, коли має місце не тільки викид хімічно небезпечних речовин [2, 5–7], а також аварійне загоряння різних речовин. Така надзвичайна ситуація може трапитися на Павлоградському хімічному заводі, де виготовляється та зберігається тверде ракетне паливо (ТРП) (рис. 1). При виникненні надзвичайних ситуацій дуже важлива оцінка ризику ураження людей [1, 8–13].

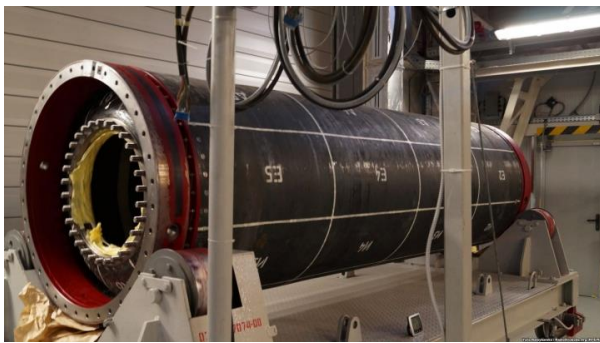


Рис. 1. Двигун ракети «Грім–2»: (https://zik.ua/ru/news/2018/03/07/raketniy_kompleks_grom_yspitayut_v_kontse_2019_goda_1280605)

Під час горіння твердого ракетного палива, крім концентрації хімічно небезпечних речовин, з'являється інший уражальний фактор – температура повітря поблизу місця аварії. У разі контакту людини з нагрітим повітрям з'являються опіки шкіри різного ступеня важкості, опіки дихальних шляхів, що може призвести до термічного ураження з летальним наслідком. У нашому дослідженні розглянуто методологію розв'язання задачі, що пов'язана з визначенням потенціального територіального ризику термічного ураження персоналу під час горіння твердого ракетного палива на промисловому об'єкті.

Як відомо, температура продуктів горіння твердого ракетного палива може бути дуже високою та залежить від типу палива. Через потужну емісію продуктів горіння палива та під впливом вітру зона термічного забруднення поширюється від місця аварії, з'являється ризик термічного ураження персоналу в робочих зонах, що розташовані на деякій довжині на промисловому майданчику. Тому для адекват-

ної оцінки ризику ураження людей на промислових майданчиках потрібно враховувати вплив цього небезпечного фактора на людей. Для розв'язання цієї задачі необхідно прогнозувати зміну температури повітря з часом у робочій зоні, оскільки ця задача належить до класу нестационарних задач. Слід зазначити, що на формування температурних полів на промисловому майданчику будуть впливати різні метеоситуації, як під час формування концентраційних полів. Тому для оцінки ризику термічного ураження персоналу на промисловому майданчику це потрібно враховувати в математичних моделях. Крім цього, складність розв'язання цієї задачі полягає в необхідності врахування впливу різних перешкод на формування теплових полів.

Мета

За основну мету ми ставимо розробку комп'ютерної моделі для експрес оцінки ризику термічного ураження людей на промисловому майданчику в разі аварійного загоряння ТРП.

Методика

На практиці важливо мати швидкі розрахункові математичні моделі для оцінки ризику термічного ураження персоналу, що дозволяють враховувати важливі фізичні фактори, які впливають на формування небезпечних зон. Тут потрібно відзначити, що розв'язання цього класу задач має декілька невизначеностей. Наприклад, температура повітря на місці горіння палива може мати в достатньо широкий діапазон – від 1 000 – 1 500 °С та більше. Точне значення практично не відомо. Тому під час побудови моделі прогнозування ризику термічного ураження людей зробимо деякі припущення: перше – що $c_p = c_v$; друге – будемо враховувати лише процеси теплопровідності та конвективного переносу тепла. Тоді для експрес оцінки ризику термічного ураження людей на промислових майданчиках у випадку екстремальних ситуацій, викликаних горінням твердого ракетного палива, будемо використовувати таке рівняння конвективного теплопереносу (двовимірна, планова модель, наближення Бусінеска) [3, 4]:

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

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

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

Постановка крайових умов для рівняння енергії (1) така:

1. На вході в розрахункову область:

$$T = T_{in},$$

де T_{in} – відома температура атмосферного 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 викиду продуктів горіння твердого палива задають температуру цих продуктів. Такий підхід можна використовувати під час проведення «пілотних», серійних розрахунків із метою швидкого визначення найбільш небезпечних зон термічного ураження персоналу. Інший підхід – задавати потужність емісії тепла на місце аварії, але для цього потрібно знати цю емісію для конкретного виду палива. У такому випадку в рівнянні енергії (1) додаємо доданок, аналогічно моделюванню точкового джерела емісії хімічно небезпечної речовини в рівнянні масопереносу.

Розв'язання рівняння енергії дозволяє отримати розподіл температури з часом у робочих зонах, що знаходяться поблизу місця, де виникла аварія на підприємстві. Ризик термічного ураження визначаємо з такої умови: якщо температура повітря в робочій зоні складає більше ніж задана температура ураження (наприклад – температура більше ніж 100°C , за якої має міс-

це повна денатурація білка), то в цій точці робочої зони беремо, що ризик ураження дорівнює 100 %.

Для чисельного розв'язання рівняння енергії використовуємо неявну різницеву схему розщеплення. На першому етапі здійснюємо розщеплення рівняння енергії на диференціальному рівні на послідовність таких рівнянь:

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

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

Далі для чисельного інтегрування одновимірних рівнянь енергії використовуємо неявну різницеву схему [4]:

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

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

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

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

Здійснимо апроксимацію похідних для рівнянь із системи (2)–(3):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) \approx a_x \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} -$$

$$-a_x \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- T^{n+1} + M_{xx}^+ T^{n+1};$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \approx a_y \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} -$$

$$-a_y \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- T^{n+1} + M_{yy}^+ T^{n+1};$$

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

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

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

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

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

Схему розщеплення для рівняння (2) запишемо так:

– 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 розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

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

Схема розщеплення для чисельного інтегрування рівняння (3) така:

– на першому кроці різницеве рівняння має вигляд:

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

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння буде таким:

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

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:

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

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

Граничні умови для рівняння (8) такі:

1) $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ – на твердих непроникливих границях;

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

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

Для чисельного розв'язання цього рівняння будемо використовувати метод Лібмана. У цьому випадку різницеве рівняння матиме вигляд:

$$\frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0.$$

Значення потенціалу швидкості в центрах різницевих комірок визначаємо так:

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

де $Z = \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2} \right)$.

Розрахунок за залежністю (9) закінчуємо, 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.

Для розрахунку за формулою (9) необхідно задати початкове значення потенціалу швидкості в розрахунковій області, беремо таке значення: $P_{i,j}^0 = 0$.

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку на сторонах розрахункових комірок розраховуємо так:

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

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

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Це поле швидкості повітряного потоку необхідно знати для розв'язання рівняння енергії, яке використовує параметри $u = f(x, y)$, $v = f(x, y)$.

Методологія оцінки потенціального територіального ризику термічного ураження персоналу на промисловому майданчику аналогічна методології оцінки потенціального територіального ризику токсичного ураження людини. Тобто на основі чисельного інтегрування базових рівнянь (рівняння енергії та рівняння для потенціалу швидкості) виконуємо прогноз формування температурних полів для різних метеоситуацій та ін., вірогідність яких відома, а далі визначаємо підзони, де значення температури повітря більше ніж температура ураження (цю температуру ураження задає користувач моделі), та друкуємо результати прогнозування ризику термічного ураження для конкретного моменту часу, з метою подальшого аналізу розмірів та швидкості формування зон ураження. Для оцінки ризику також можна враховувати вірогідність місця загоряння палива.

Для створення коду використано FORTRAN. У розроблений пакет програм ТН2, який є програмною реалізацією методології оцінки територіального ризику термічного ураження персоналу на відкритій місцевості, входять наступні підпрограми типу «SUBROUTINE»:

1. TEN1 – розрахунок поля швидкості повітря на промисловому майданчику (TEN1A – розрахунок поля швидкості повітря в робочому приміщенні).

2. TEN2 – розрахунок потенціалу швидкості.

3. TEN3 – розрахунок температурних полів та їх зміни з часом на промисловому майданчику.

4. TEN5 – друк результатів розрахунку.

5. TEN6 – розрахунок ризику термічного ураження персоналу на промисловому майданчику.

Для проведення розрахунків із метою визначення величини територіального ризику термічного ураження людей на промайданчику потрібно задати такі параметри:

1. Розміри розрахункової області.

2. Розміри будівель.

3. Геометричну форму будівель.

4. Параметри метеоситуації.

5. Температуру повітря на місці аварії.

6. Координати місця аварії.

7. Координати рецептора (робочої зони).

8. Вірогідність реалізації конкретної метеоситуації.

9. Розташування будівель на промисловому майданчику.

Результатом моделювання є матриця територіального ризику термічного ураження людей на майданчику для конкретного моменту часу після аварії або розподілу температурних полів на майданчику та їх зміна з часом.

Результати

Побудована чисельна модель була використана для оцінки потенціального ризику термічного ураження людей на промисловому майданчику Павлоградського хімічного заводу (рис. 2) в разі горіння твердого ракетного палива ракети «Грім–2».



Рис. 2. До розрахунку ризику термічного ураження персоналу на промисловому майданчику Павлоградського хімічного заводу (Googleimage): 1 – місце ймовірного аварійного горіння ракетного палива; 2 – робоча зона № 1; 3 – промислова будівля; 4 – робоча зона № 2

Під час проведення розрахунків узято, що на промисловому майданчику вірогідність швидкості вітру 3 м/с дорівнює 25 %, а вірогідність швидкості вітру 7 м/с дорівнює 75 %. Напрямок вітру показано на рисунку стрілкою. Узято, що температура продуктів горіння на місці аварії дорівнює 1 000 °С. Початкова температура повітря в розрахунковій області $T_0 = 20$ °С. Розмі-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

ри розрахункової області 290x268 м. Оцінку ризику термічного ураження працівників здійснюємо на базі двовимірного рівняння енергії, яке було розглянуто вище. Для нього взято: якщо температура повітря на промисловому майданчику становить більше ніж 100 °С, то рецептор потрапляє в зону ураження.

Нижче на рис. 3–5 наведено динаміку зміни температури повітря біля промислової будівлі за різні проміжки часу після виникнення аварійної ситуації. Дані наведено для швидкості вітру 3 м/с.

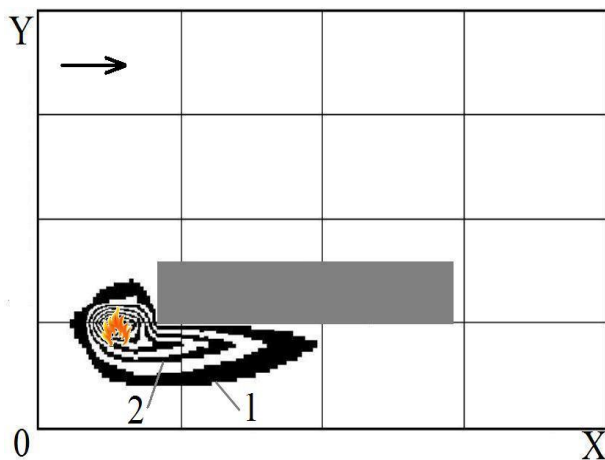


Рис. 3. Зона теплового забруднення (ізотерми) біля промислової будівлі, $t = 10$ сек:
 $1 - T = 100$ °С; $2 - T = 230$ °С

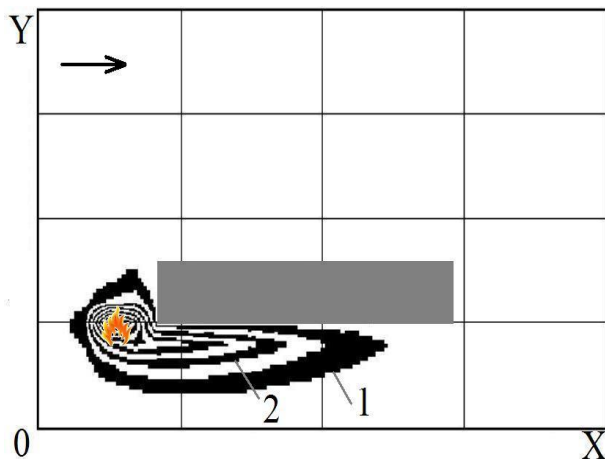


Рис. 4. Зона теплового забруднення (ізотерми) біля промислової будівлі, $t = 25$ сек:
 $1 - T = 102$ °С; $2 - T = 239$ °С



Рис. 5. Зона теплового забруднення (ізотерми) біля промислової будівлі, $t = 32$ сек:
 $1 - T = 103$ °С; $2 - T = 240$ °С; $3 -$ промислова будівля

Межа теплового забруднення, на рис. 3–5, що відзначена позначкою № 1, показує межу зони термічного ураження працівників, оскільки ця ізолінія відповідає значенню температури $T = 100$ °С. Як бачимо, зона теплового забруднення на промисловому майданчику постійно поширюється з часом та витягується вздовж промислової будівлі. Чітко видно, що біля стін будівлі створюються підзони з високим градієнтом температури.

Для більш зрозумілої оцінки можливого ризику термічного ураження людей на промисловому майданчику необхідно проаналізувати дані, що наведені нижче на рис. 6–9. На них показано зміну температури повітря в двох робочих зонах (ці робочі зони показано на рис. 2), які розташовані біля стінки промислової будівлі. Перша зона розташована на довжині близько 55 м від місця аварії, друга – на довжині близько 33 м від місця аварії.

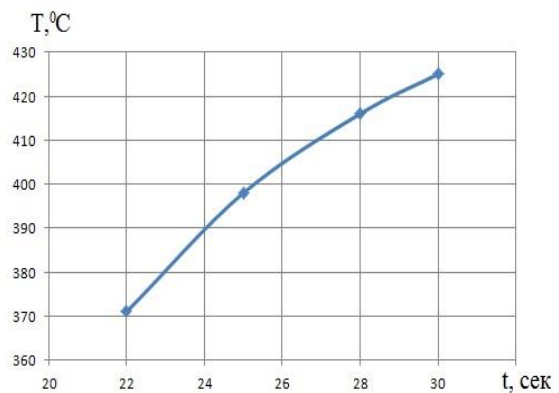


Рис. 6. Зміна температури повітря з часом у робочій зоні № 2

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

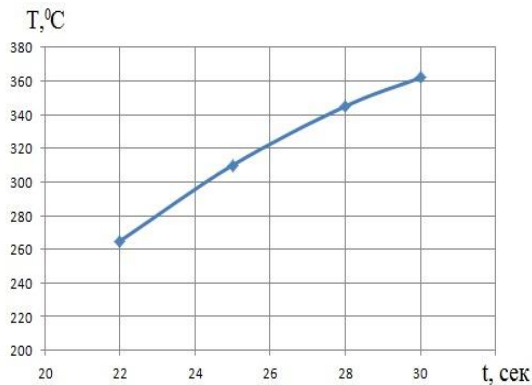


Рис. 7. Зміна температури повітря з часом у робочій зоні № 1

Як бачимо з наведених рис. 6 і 7, температура повітря дуже швидко зростає в обох робочих зонах та вже за 20 сек після початку аварійної емісії більше ніж у два рази перевищує порогове значення температури ураження. За таких значень температури повітря буде мати місце опік як шкіри людини, так і дихальних шляхів.

На рис. 8 і 9 зображено матриці потенційно територіального ризику термічного ураження людей на промисловому майданчику для різних моментів часу у випадку реалізації вказаних імовірних метеоситуацій.

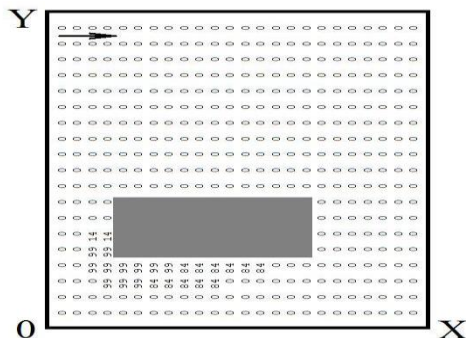


Рис. 8. Імовірність термічного ураження персоналу на промисловому майданчику на момент часу $t = 12$ с

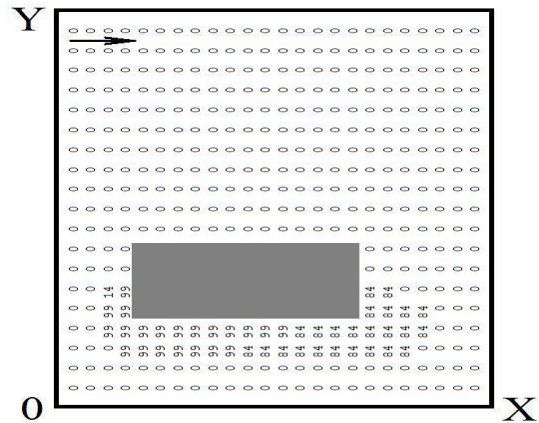


Рис. 9. Імовірність термічного ураження персоналу на промисловому майданчику на момент часу $t = 24$ с

Із наведених рис. 8 і 9 бачимо, що площа зони територіального ризику термічного ураження персоналу постійно змінюється з часом – збільшується в розмірах, тому ми говоримо про просторово-часову зміну територіального ризику термічного ураження персоналу на промисловому об'єкті. Для розглянутих метеоситуацій ризик термічного ураження персоналу вкрай високий, оскільки термічного ураження формується дуже швидко. Але ми бачимо, що за будівлю ризик термічного ураження людей для розглянутих моментів часу відсутній.

Відзначимо, що час розрахунку склав 4 сек.

Висновки

1. Запропоновано чисельну модель для прогнозування зон термічного ураження персоналу на території промислових об'єктів у разі аварійного горіння твердого ракетного палива.
2. Виконано оцінку ризику термічного ураження людей на промисловому об'єкті в разі аварійного горіння твердого ракетного палива.

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., Росточило Н. В. *Защита зданий от проникновения в них опасных веществ* : монография. Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. 136 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. Anjana N. S., Amarnath A., Harindranathan Nair M. V. Toxic hazards of ammonia release and population vulnerability assessment using geographical information system. *Journal of Environmental Management*. 2018. Vol. 210. P. 201–209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.021>
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., 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
8. 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9112103>
9. Ilić P., Ilić S., Stojanović Bjelić L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool-aloha software. *Quality of life*. 2018. Vol. 9 (1–2). P. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.7251/QOL1801038I>
10. Komatina D. I., Galjak J., Belošević S. Simulation of chemical accidents with acetylene in in «messer tehnogas» kraljevo plant by «aloha» software program. *Publication in Natural Sciences*. 2018. Vol. 8. Iss. 2. P. 19–26. DOI: <https://doi.org/10.5937/univtho8-18014>
11. 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. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph15081600>
12. Protective Action Criteria. A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta, 2017. URL: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (дата звернення: 15.10.2019).
13. Tumanov A., Gumenyuk V., Tumanov V. Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 90. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012027>

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

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

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

^{3*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

^{4*}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 uzpr38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{5*}Главное управление ГСЧС Украины в Днепропетровской области, ул. Короленко, 4, Днипро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 744 25 87, эл. почта dnipro@fireman.dp.ua, ORCID 0000-0001-9907-3610

ОЦЕНКА РИСКА ТЕРМИЧЕСКОГО ПОРАЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ОБЪЕКТЕ В СЛУЧАЕ АВАРИЙНОГО ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

Цель. Данная работа предусматривает разработку численной модели для расчета зон термического поражения людей при аварийном горении твердого ракетного топлива на территории промышленного объекта. **Методика.** Для решения поставленной задачи – определения зон термического поражения людей на территории промышленного объекта – использовано уравнение, выражающее закон сохранения энергии. Для рас-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

чета поля скорости воздушного потока при наличии зданий на территории промышленного объекта, где имеет место аварийная ситуация, использована модель потенциального течения. Численное решение двумерного уравнения для потенциала скорости проведено с помощью метода Либмана. При использовании этой численной модели учтено неравномерное поле скорости ветрового потока, формируемого у промышленных зданий. Для численного решения уравнения энергии использовано неявную разностную схему расщепления. Предварительно осуществлено физическое расщепление двумерного уравнения энергии на систему одномерных уравнений, описывающих перенос температуры в одном координатном направлении. На каждом шагу расщепления неизвестное значение температуры определено по явной схеме бегущего счета. На базе построенной численной модели создан код на алгоритмическом языке FORTRAN. **Результаты.** На основе разработанной численной модели проведен вычислительный эксперимент для оценки риска термического поражения людей на территории промышленного объекта, где изготавливают твердое ракетное топливо. Определены зоны, опасные для нахождения персонала. **Научная новизна.** Разработана эффективная численная модель, позволяющая рассчитывать зоны термического загрязнения в случае аварийного горения твердого ракетного топлива. **Практическая значимость.** На базе разработанной математической модели создана компьютерная программа, которая дает возможность проводить серийные расчеты для определения зон термического поражения при чрезвычайных ситуациях на территории химически опасных объектов. Данная математическая модель может быть использована при разработке плана ликвидации аварийной ситуации (ПЛАС) для химически опасных объектов.

Ключевые слова: риск термического поражения; аварийное горение твердого ракетного топлива; математическое моделирование

M. M. BILIAIEV^{1*}, O. V. BERLOV^{2*}, V. A. KOZACHYNA^{3*}, I. V. KALASHNIKOV^{4*},
O. V. SHEVCHENKO^{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», Prydniprovsk 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. «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 0000-0002-6894-5532

^{4*}Kharkiv Branch Office «Design and Research Institute of Railway Transport» of the Public Joint Stock Company «Ukrainian Railway», Kotliara St., 7, Kharkiv, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

^{5*}Main Department of State Service for Emergency Situations of Ukraine in Dnipropetrovsk region, Korolenka St., 4, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 744 25 87, e-mail dnipro@fireman.dp.ua, ORCID 0000-0001-9907-3610

RISK ASSESSMENT OF THERMAL DAMAGE TO PEOPLE AT INDUSTRIAL SITES IN CASE OF EMERGENCY BURNING SOLID PROPELLANT

Purpose. This work involves the development of a numerical model for the calculation of areas of thermal damage to people in the event of solid propellant burning at the industrial site. **Methodology.** An equation expressing the law of energy conservation was used to solve the problem of determining the areas of thermal shock of people at the industrial site. A potential flow model was used to calculate the airflow velocity field in the presence of buildings at the industrial site where an emergency occurs. The numerical solution of the two-dimensional equation for the velocity potential is derived using the Liebmann method. This numerical model takes into account the uneven velocity field of the wind flow that is formed near industrial buildings. An implicit difference splitting scheme was used to numerically solve the energy equation. The physical splitting of a two-dimensional energy equation into a system of one-dimensional equations describing the temperature transfer in one coordinate direction has been carried out previously. At each splitting step, the unknown temperature value is determined by an explicit point-to-point computation scheme. Based on the numerical model built, the code using the FORTRAN algorithm language is created. **Findings.** Based on the developed numerical model, a computational experiment was conducted to evaluate the risk of thermal damage to people at the industrial site where solid propellants are produced. The dangerous

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

areas for personnel are identified. **Originality.** An efficient numerical model has been developed to calculate the zones of thermal pollution in case of solid propellant burning. **Practical value.** Based on the developed mathematical model, a computer program was created, which allows performing serial calculations for determining the zones of thermal damage during emergencies at the chemically hazardous objects. The mathematical model developed can be used to design an emergency response plan for chemically hazardous objects.

Keywords: risk of thermal damage; emergency burning of solid propellant; mathematical modelling

REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk. Analiz i otsenka: uchebnoye posobie dlya vuzov.* Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya.* Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (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. Anjana, N. S., Amarnath, A., & Harindranathan Nair, M. V. (2018). Toxic hazards of ammonia release and population vulnerability assessment using geographical information system. *Journal of Environmental Management*, 210, 201-209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.021> (in English)
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., & 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)
8. 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). DOI: <https://doi.org/10.3390/su9112103> (in English)
9. Ilić, P., Ilić, S., & Stojanović Bjelić, L. (2018). Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life*, 9(1-2). DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.7251/QOL1801038I> (in English)
10. Komatina, D. I., Galjak, J., & Belošević, S. (2018). Simulation of chemical accidents with acetylene in «messer tehnogas» kraljevo plant by «aloha» software program. *Publication in Natural Sciences*, 8(2), 19-26. DOI: <https://doi.org/10.5937/univtho8-18014> (in English)
11. 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)
12. Government of Alberta. (2017). *Protective Action Criteria: A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations.* Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta. Retrieved from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
13. Tumanov, A., Gumenyuk, V., & Tumanov, V. (2017). Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 90, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012027> (in English)

Надійшла до редколегії: 30.09.2019

Прийнята до друку: 31.01.2020