

УДК 504.5:621.565.8

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.270421.28.748

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ВОДЯНОЇ ЗАВИСИ ДЛЯ ЗАХИСТУ ПРАЦІВНИКІВ ВІД ТЕРМІЧНОГО УРАЖЕННЯ

БІЛЯЄВ М. М.<sup>1</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,

БЕРЛОВ О. В.<sup>2\*</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,

БІЛЯЄВА В. В.<sup>3</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,

ВЕРГУН О. О.<sup>4</sup>, *канд. техн. наук, доц.*

<sup>1</sup> Кафедра гідравліки та водопостачання, Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. Акад. В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 273-15-09, e-mail: [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: [berlov.oleksandr@pgasa.dp.ua](mailto:berlov.oleksandr@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

<sup>3</sup> 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](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

<sup>4</sup> Кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-71, e-mail: [vergun.oksana@pgasa.dp.ua](mailto:vergun.oksana@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-4842-1069

**Анотація. Постановка проблеми.** Розглядається оцінювання ефективності використання водяної зависи для зменшення ризику термічного ураження людей під час пожежі. Ставиться задача визначення температурних полів під час подачі води для охолодження повітря. **Мета роботи** – розроблення числової моделі для розрахунку процесу розповсюдження крапель води в повітрі, їх випарювання для зменшення температури нагрітого повітря внаслідок пожежі. **Методика.** Для математичного моделювання процесу поширення крапель води в повітрі, теплового забруднення повітря застосовуються конвективно-дифузійне рівняння масопереносу, рівняння енергії та рівняння, що описує рух ідеальної рідини (модель потенціальної течії). Модель потенціальної течії дозволяє швидко визначити поле швидкості повітряного потоку в областях, що мають складну геометричну форму. Для числового інтегрування рівняння конвективно-дифузійного масопереносу та рівняння енергії застосовуються неявні різницеві схеми розщеплення. Для побудови різницевого аналога моделювальних рівнянь використовується фізичне розщеплення базових рівнянь. Для розв'язання задачі аеродинаміки – визначення поля потенціалу швидкості та компонент вектора швидкості повітряного потоку застосовуються метод Річардсона та схема умовної апроксимації. Розроблено інженерну методику розрахунку процесу випарювання краплі води, що базується на законі Срезневського. **Наукова новизна.** Розроблено ефективну числову модель, що дозволяє методом обчислювального експерименту визначати ефективність використання водяної зависи для зменшення рівня теплового забруднення атмосферного повітря внаслідок пожежі. Числова модель базується на інтегруванні фундаментальних рівнянь аеродинаміки, тепломасопереносу. Модель враховує найбільш суттєві фізичні фактори, що впливають на процес, який досліджується: рух нагрітого повітря, рух крапель води в повітрі, випарювання краплі тощо. **Практична значимість.** На базі побудованої моделі створено комп'ютерний код, що дозволяє швидко визначати температурні поля в повітрі з використанням водяної зависи. Числова модель буде корисна для проведення обчислювальних експериментів з метою науково обгрунованого вибору місця розташування водяної зависи під час пожежі. **Висновки.** Створено комп'ютерну програму (код), що дозволяє методом обчислювального експерименту досліджувати ефективність використання водяної зависи під час пожежі. Розроблена комп'ютерна програма може бути реалізована на комп'ютерах малої та середньої потужності. Наведені результати обчислювального експерименту.

**Ключові слова:** термічне ураження; робоча зона; числове моделювання; водяна зависа; пожежа

## SIMULATION OF A WATER CURTAIN APPLICATION TO PROTECT WORKERS FROM THERMAL INJURIES

BILIAIEV M.M.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

BERLOV O.V.<sup>2\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

BILIAIEVA V.V.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

VERGUN O.O.<sup>4</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Hydraulics and Water Supply, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryana Str., 49010, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056)273-15-09, e-mail: [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCIDID: 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup> Department of Workplace Safety and Health, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: [berlov@mail.pgasa.dp.ua](mailto:berlov@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

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

<sup>4</sup> Department of Ecology and Environmental Protection, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-71, e-mail: [vergun.oksana@pgasa.dp.ua](mailto:vergun.oksana@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-4842-1069

**Abstract. Problem statement.** The problem of evaluating the effectiveness of using the water curtain to reduce the risk of thermal injury to people in a fire is considered. The problem is to determine the temperature fields when supplying water for air cooling. **The purpose of the article.** Development of a numerical model for calculating the process of propagation of water droplets in the air, their evaporation to reduce the temperature of heated air due to fire. **Methodology.** For mathematical modeling of the process of propagation of water droplets in air, thermal air pollution, the convective-diffusion equation of mass transfer, the energy equation and the equation describing the motion of an ideal liquid (potential flow model) are used. The potential flow model allows you to quickly determine the field of air flow velocity in areas with a complex geometric shape. Implicit difference splitting schemes are used for numerical integration of the convective-diffusion mass transfer equation and the energy equation. Physical splitting of basic equations is used to construct a difference analogue of modeling equations. The Richardson method and the conditional approximation scheme are used to solve the aerodynamics problem of determining the velocity potential field and the components of the air velocity vector. An engineering method for calculating the process of evaporation of a drop of water based on Sreznevsky's law has been developed. **Scientific novelty.** An effective numerical model has been developed that allows the method of computational experiment to determine the efficiency of using the water curtain to reduce the level of thermal pollution of atmospheric air due to fire. The numerical model is based on the integration of the fundamental equations of aerodynamics, heat and mass transfer. The model takes into account the most significant physical factors that affect the process under study: the movement of heated air, the movement of water droplets in the air, evaporation of the droplet, and so on. **Practical significance.** Based on the built model, a computer code has been created that allows you to quickly determine the temperature fields in the air when using a water curtain. The numerical model will be useful when conducting computational experiments for the purpose of scientifically sound choice of the location of the water curtain in case of fire. **Conclusions.** A computer code has been created that allows a computational experiment to investigate the effectiveness of using a water curtain in a fire. The developed computer program can be implemented on low and medium power computers. The results of a computational experiment are presented.

**Keywords:** thermal damage; work area; numerical simulation; water curtain; fire

**Постановка проблеми.** Надзвичайні ситуації на підприємствах, транспорті супроводжуються появою вражаючих факторів [1; 4; 5]. Під час пожеж формується поле інтенсивного теплового забруднення атмосферного повітря. Це створює ризик термічного ураження працівників у робочих зонах, розташованих біля пожежі.

Тому значна увага приділяється проблемі захисту працівників від термічного ураження у випадку виникнення пожежі за допомогою різних засобів. Один із таких засобів – водяна завіса (рис. 1).

У рамках вказаної проблеми постає задача прогнозування ефективності використання водяної завіси у різних надзвичайних ситуаціях. Нижче розглянуто

побудову математичної моделі для розв'язання цієї задачі.



Рис. 1. Водяна завіса

**Аналіз останніх досліджень.** Пожежа – це надзвичайна ситуація, що створює ризик ураження людей внаслідок термічного впливу, ураження хімічно небезпечними продуктами горіння. Для оцінювання

наслідків цієї надзвичайної ситуації або інших досить поширені такі математичні моделі: емпіричні (або статистичні), аналітичні, числові [3; 7–13]. Емпіричні та аналітичні моделі дозволяють швидко здійснювати прогнозування, але вони мають обмежену зону застосування, бо не враховують низки важливих факторів. У зв'язку із цим особлива увага приділяється розробленню числових моделей, що мають широкий робочий діапазон.

В Україні як числові моделі частіше застосовують відомі комерційні пакети, що реалізують програмну реалізацію числових моделей, наприклад, різні версії пакета ANSYS. На жаль у нас приділяється дуже мало уваги розробленню авторських числових моделей. Тому розроблення таких моделей для розв'язання прикладних задач у галузі охорони праці – дуже актуальне наукове завдання.

**Мета статті** – побудова CFD моделі для оцінювання ефективності використання водяної зависи для зниження температури повітря біля місця пожежі.

**Методика.** Розглядається процес подачі води в повітря для зниження його температури. Зростання температури зумовлене рухом нагрітого повітря від місця пожежі до робочих зон. Для математичного моделювання цього процесу попередньо розглянемо сам процес випарювання краплі води, що потрапляє в повітря від насосної установки.

Нехай у повітрі міститься крапля води, що має діаметр  $D$ . Так, згідно з законом Срезневського [2], під час випарювання краплі її діаметр змінюється таким чином:

$$\frac{\partial D^2}{\partial t} = -k, \quad (1)$$

де  $D$  – діаметр краплі,  $t$  – час,  $k$  – параметр.

Модель (1) показує математичну залежність зміни діаметра краплі від часу у процесі випарювання.

Параметр  $k$  має вигляд [2]:

$$k = \frac{4\alpha D(T - T_k)}{\rho L}, \quad (2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $\rho$  – щільність рідини;  $L$  – теплота випарювання рідини;  $T$  – температура повітря;  $T_k$  – температура краплі.

Слід зазначити, що при русі краплі в нагрітому повітрі мають місце дуже складні процеси тепломасообміну: зміна температури краплі з часом, зміна її діаметра, випарювання, зміна концентрації водяного пару в повітрі біля краплі тощо. Тому дуже складно розрахувати ці процеси на базі системи рівнянь тепломасообміну. Також для розв'язання цих рівнянь потрібно використовувати експериментальні параметри для краплі, яка рухається. Ці параметри визначаються для певних умов експерименту і відомі приблизно.

Крім цього для розв'язання задач цього класу ми маємо дуже приблизні початкові дані – початковий діаметр крапель, швидкість струменів, швидкість повітря на різній висоті тощо. Тому, для побудови експрес-моделі будемо застосовувати інший підхід. Для цього здійснимо математичний аналіз залежності (2) та визначимо порядок величини  $k$ . Приймаємо такі дані:

$$\alpha = 115000 - 600000 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{с};$$

$$\rho = 1000 \text{ кг} / \text{м}^3;$$

$$L = 2260 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{кг};$$

$$T = 2273^\circ \text{C};$$

$$D = 10^{-4} \text{ м};$$

$$T_k = 373^\circ \text{C}.$$

Розраховуємо значення коефіцієнта  $k$ :

$$k = \frac{4\alpha D(T - T_k)}{\rho L} = \frac{4}{1000 \cdot 2260 \cdot 10^3} 600 \cdot 10^3 \cdot 10^{-4} \cdot 2000 = 0.2 \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

Це значення параметра  $k$  будемо враховувати далі для побудови алгоритму розв'язання задачі.

Розглянемо тепер процес розсіювання крапель води в повітрі. Для моделювання переносу крапель води в повітрі

використовується таке рівняння конвективно-дифузійного масопереносу [6]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-v_g)C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum Q_i \cdot \delta(x-x_i) \delta(y-y_i), \quad (4)$$

де  $C$  – концентрація водяних крапель (кількість крапель в одиниці об'єму);  $t$  – час;  $\mu_x, \mu_y$  – коефіцієнти атмосферної дифузії;  $(x_i, y_i)$  – координати місця подачі води;  $\delta(x-x_i) \delta(y-y_i)$  – дельта-функція Дірака;  $Q_i$  – інтенсивність подачі води;  $v_g$  – швидкість гравітаційного осадження краплі води;  $u, v$  – компоненти вектора швидкості повітряного потоку.

Параметри  $u, v$  визначаються шляхом розв'язання задачі аеродинамики (6).

Граничні умови для моделюючого рівняння (4):

$$1. \frac{\partial C}{\partial n} = 0 \text{ – на непроникливих межах (} n \text{ –}$$

одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні);

$$2. C = 0 \text{ – на межі, де потік втікає;}$$

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

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

Базовим рівнянням для розрахунку теплових полів, що формуються в повітрі під час пожежі, стає рівняння енергії [3]:

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

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

Граничні умови для рівняння (5):

1. На межі, де повітряний потік входить в область:

$$T = T_{in},$$

де  $T_{in}$  – фонові температура повітря.

2. На межі, де повітряний потік виходить із розрахункової зони:

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

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

$$3. \text{ На поверхні об'єктів } \frac{\partial T}{\partial n} = 0.$$

Початкова умова ( $t = 0$ ):  $T = T_0$ , де  $T_0$  – температура повітря там, де має місце пожежа, в іншій частині розрахункової області температура дорівнює фоновій.

Для моделювання руху повітряного потоку використовується рівняння аеродинаміки [6]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 P}{\partial^2 y} = 0, \quad (6)$$

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

де:  $P$  – потенціал швидкості.

Граничні умови:

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

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

відома швидкість повітря;

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

Для побудови методології розрахунку процесу зменшення температури повітря внаслідок випарювання краплі води будемо використовувати такий алгоритм:

1. Задаємо початкові дані: початковий діаметр краплі  $D^n$ , об'єм води, що потрапляє в повітря  $W$  за одиницю часу.

2. Визначаємо кількість крапель в об'ємі, що потрапляє в повітря від насоса:

$$n = \frac{6}{\pi \cdot D^3} W.$$

3. Числово інтегрується рівняння конвективно-дифузійного переносу водяних крапель у повітрі та визначається розподіл концентрації крапель води в розрахунковій області на момент часу  $t^n$ .

4. Розраховується поле температур шляхом числового розв'язання рівняння енергії.

5. У кожній різницевій комірці розраховується зміна діаметра крапель, на заданому часовому інтервалі  $dt$ . Для цього використовуються залежності (1). Для числового розв'язання рівняння (1) застосовується метод Ейлера. Ми отримуємо дані щодо нового значення діаметра крапель  $D^{n+1}$  на новому часовому кроці.

6. Обчислюється маса води, що була випарувана за проміжок часу  $dt$ :

$$m_i = \frac{1}{6} \pi \cdot (D^{3n} - D^{3n+1}) \cdot \rho.$$

7. Визначається зміна температури повітря внаслідок випарювання маси води  $m_i$ . Для цього використовується балансова залежність щодо зміни внутрішньої енергії в різницевій комірці:

$$cmT^{n+1} = cmT^n - Lm_i,$$

де:  $m$  – маса повітря в різницевій комірці ( $m = h_x \cdot h_y \cdot 1 \cdot \rho_a$ );

$h_x$  – різницевий крок у напрямі  $x$ ;

$h_y$  – різницевий крок у напрямі  $y$ ;

$\rho_a$  – щільність повітря (1,2 кг/м<sup>3</sup>);

$c$  – питома теплоємність (1 076 Дж/кг град.);

$T^n$  – температура повітря на момент часу  $t^n$ ;

$T^{n+1}$  – нове значення температури повітря на момент часу  $t^{n+1}$ .

З даної балансової залежності визначаємо нове значення температури повітря в кожній різницевій комірці для моменту часу  $t^{n+1}$ :

$$T^{n+1} = T^n - Lm_i / mc.$$

8. Розрахунок повторюється для нового часового кроку.

**Методика розв'язання.** Для проведення розрахунків із оцінювання ефективності використання водяної завіси потрібно знати

розподіл крапель води, температури повітря в кожній точці розрахункової області. Для цього потрібно проінтегрувати рівняння (4)–(6). Розглянемо методологію інтегрування. Числове інтегрування моделювальних рівнянь здійснюється на прямокутній різницевій сітці.

Для числового інтегрування рівняння Лапласа (6) використовуються дві різницеві схеми. Попередньо рівняння Лапласа записується так:

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

де  $t$  – фіктивний час.

Перший метод числового розв'язання – це метод Річардсона [4]. Розрахунок значення температури на новому часовому кроці здійснюється таким чином:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + Vt \frac{P_{i+1,j}^n - 2P_{i,j}^n + P_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + Vt \frac{P_{i,j+1}^n - 2P_{i,j}^n + P_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}. \quad (8)$$

Другий метод числового розв'язання – це схема умовної апроксимації [5]. Розрахункові залежності мають вигляд:

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

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

Процедура розрахунку за цими методами закінчується за виконання умови:

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

де  $\varepsilon$  – мале число. Для початку розрахунку приймаємо, що для моменту часу  $t = 0$  в розрахунковій області  $P = 0$ .

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку розраховуються таким чином:

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

Після розрахунку швидкості повітряного потоку починається розв'язання рівняння масопереносу та рівняння енергії. Зазначимо, що рівняння енергії (5) та рівняння масопереносу (4) однакові: це рівняння параболічного типу. Тому розглянемо побудову числової моделі тільки для рівняння (4).

Для розв'язання використовуємо неявну різницеву схему розщеплення. Спочатку виконаємо таке фізичне розщеплення:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0. \quad (9)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right). \quad (10)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum Q_i \cdot \delta(x - x_i) \delta(y - y_i). \quad (11)$$

Апроксимація здійснюється так [2; 5; 7]:

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

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

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

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

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

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

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

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

Схема розщеплення рівняння (9) така [2; 5; 7]:

– на першому кроці різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^k + L_y^+ C^k = 0; \quad (12)$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} = 0. \quad (13)$$

Метод Річардсона застосовується для числового розв'язання рівняння (10):

$$C_{i,j}^{n+1} = C_{i,j}^n + Vt \frac{C_{i+1,j}^n - 2C_{i,j}^n + C_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} \mu_x + Vt \frac{C_{i,j+1}^n - 2C_{i,j}^n + C_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \mu_y. \quad (14)$$

Для числового розв'язання рівняння (11) застосовується метод Ейлера [7].

Здійснено програмну реалізацію побудованої числової моделі. Для програмування використано FORTRAN.

**Результати.** Нижче наведено результати розв'язання модельної задачі на базі розробленої числової моделі та створеного комп'ютерного коду. Розглядається пожежа на території АЗС. Подача води здійснюється у двох місцях біля будівлі на території АЗС. На рисунку 2 показано схему розрахункової області.

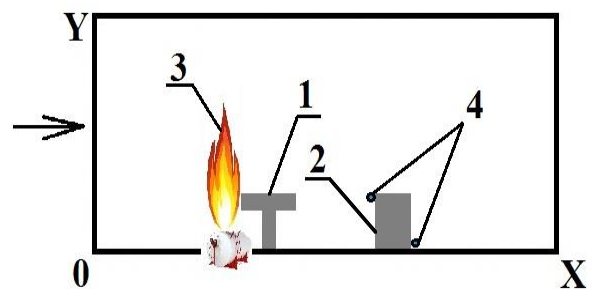


Рис. 2. Схема розрахункової області:  
1 – місце заправки; 2 – будівля; 3 – полум'я;  
4 – місце подачі води

На рисунках 3 і 4 показано поле температури в розрахунковій області для певного часу. Зазначимо, що число «0» відповідає фоновій температурі 20 °С. Кожне число показує температуру у відсотках, від максимальної температури  $T = 1100^\circ\text{C}$  + фонові температура 20 °С.



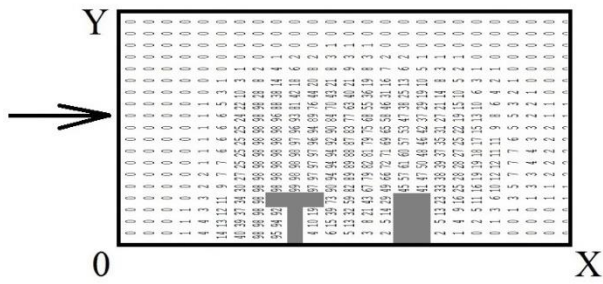


Рис. 3. Зона теплового забруднення (нема водяної завіси),  $t = 12$  сек

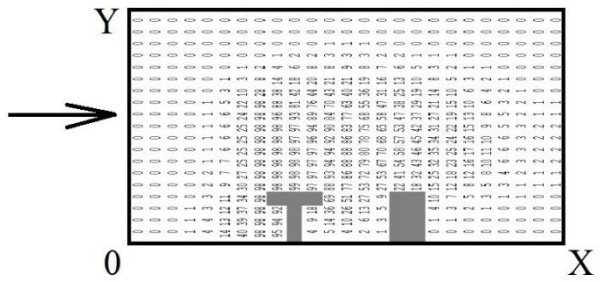


Рис. 4. Зона теплового забруднення (є водяна завіса),  $t = 12$  сек

Якщо проаналізувати поле температури на рисунку 3 (нема водяної завіси), бачимо,

що за будівлею температура повітря варіюється від 42 до 273 °С.

Якщо проаналізувати поле температури на рисунку 4 (є водяна завіса), стає видно, що за будівлею температура повітря варіюється від 20 до 31 °С. Таким чином, використання водяної завіси дозволяє суттєво зменшити температуру в зоні інтересу.

Зазначимо, що час розрахунку склав 2 секунди.

**Висновки.** 1. Розроблено багато-параметричну числову модель для оцінювання ефективності використання водяної завіси під час пожежі.

2. Розроблена модель базується на використанні рівнянь тепломасопереносу та рівняння руху повітряних мас.

3. Подальший розвиток цього напряму полягає у створенні тривимірної числової моделі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алымов В. Т., Тарасова Н. П. Техногенный риск : Анализ и оценка : учеб. пособ. для вузов. Москва : ИКЦ «Академкнига», 2004. 118 с.
2. Горшков В. И. Тушение пламени горючих жидкостей. Москва : Пожнаука, 2007. 268 с.
3. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Чердніченко Л. А. Оцінка ризику термічного ураження у випадку аварійного горіння. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. Вип. 6 (271–272). С. 54–60. URL: doi: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241120.54.698
4. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. Москва : Мир, 1980. 412 с.
5. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.
6. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст]. Київ : Наукова думка, 1997. 368 с.
7. Anthony Michael Barret. Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense : Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness. Dissertation. Pittsburg, Pennsylvania, USA, 2009. 123 p.
8. Biliaiev M. 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.
9. Chan W. R., Nazaroff W. W., Price P. N., Gadgil A. J. Effectiveness of Urban Shelter-in-Place. II : Residential Districts, 2008. 31 p. URL: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/928232> (Accessed 29 March 2014). URL: doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.059.
10. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool – ALOHA Software. *Quality of Life*. 8 (2). 2018. Pp. 38–45.
11. John S. Nasstrom, Gayle Sugiyama, Ronald L. Baskett, Shawn C. Larsen and Michael M. Bradley. The National Atmospheric Release Advisory Center (NARAC) Modeling and Decision Supports System for Radiological and NUCLEAR Emergency Preparedness and Response. *Int. J. Emergency Management*. No. 3, vol. 4. Pp. 1–32.
12. Lacombe J.-M., Truchot D., Duplantier S. Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. 2017. Pp. 1–5.
13. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Cejun Cao and others*. 2017. Vol. 9, iss. 11. URL: doi: 10.3390/su9112103

## REFERENCES

1. Alymov V.T. and Tarasova N.P. *Tekhnogennyy risk : Analiz i otsenka* [Technogenic risk : Analysis and evaluation]. *Uchebnoye posobiye dlya vuzov* [A manual for higher education institutions]. Moscow : IKTs "Akademkniga" Publ., 2004, 118 p. (in Russian).
2. Gorshkov V.I. *Tushenye plameny goryuchyx zhydkostey* [Extinguishing flames of flammable liquids]. Moscow : Pozhnauka Publ., 2007, 268 p. (in Russian).
3. Biliaiev M.M., Berlov O.V., Biliaieva V.V. and Cherednychenko L.A. *Ocinka riziku termichnogo urazhennya u vipadku avarijnogo gorinnya* [Assessment of risk of thermal injury in case of accidental burning]. *Visnik Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnictva ta arhitekturi* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. No. 6 (271–272), 2020, pp. 54–60. URL : doi: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241120. 54.698 (in Ukraine).
4. Roache P.J. *Vychislitel'naia gidrodinamika* [Computational Fluid Dynamics]. Moscow : Mir Publ., 1980, 446 p. (in Russian).
5. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow : Nauka Publ., 1983, 616 p. (in Russian).
6. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K. and Belyaev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modeling of pollution spreading in the environment]. Kyiv : Naukova dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian).
7. Anthony Michael Barret. *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense : Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. Dissertation. Pittsburg, Pennsylvania, USA, 2009, 123 p.
8. Biliaiev M. 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.
9. Chan W.R., Nazaroff W.W., Price P.N. and Gadgil A.J. Effectiveness of Urban Shelter-in-Place. II: Residential Districts, 2008, 31 p. URL: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/928232> (Accessed : 29 March 2014). doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.059.
10. Ilic P., Ilic S. and Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool – ALOHA Software. *Quality of Life*. Vol. 8 (2), 2018, pp. 38–45.
11. John S. Nastrom, Gayle Sugiyama, Ronald L. Baskett, Shawn C. Larsen and Michael M. Bradley. The National Atmospheric Release Advisory Center (NARAC) Modeling and Decision Supports System for Radiological and NUCLEAR Emergency Preparedness and Response. *Int. J. Emergency Management*. No. 3, vol. 4, 2007, pp. 1–32.
12. Lacombe J.M., Truchot D. and Duplantier S. Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, 2017, pp. 1–5. (in English)
13. Cao C., Li C., Yang Q. and Zhang F. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability*. No. 9 (11), 2017. URL : doi: 10.3390/su9112103.

Надійшла до редакції : 12.04.2021.