

УДК 504.5:614.84

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.281221.7.809

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ САМОНАГРІВАННЯ НАСИПУ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ З МЕТОЮ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ПОЧАТКУ ПОЖЕЖІ

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.*,  
КОЗАЧИНА В. А.<sup>4</sup>, *канд. техн. наук, доц.*

<sup>1</sup> Кафедра гідравліки та водопостачання, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010, 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, Дніпро, 49600, 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, Дніпро, 49000, 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 гідравліки та водопостачання, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпро, 49010, Україна, тел. +38 (056) 273-15-09, e-mail: [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Розглядається задача прогнозування динаміки нагріву насипу рослинної сировини внаслідок дії мікроорганізмів. Діяльність мікроорганізмів приводить до локального підвищення температури в насипу рослинної сировини, що приводить, з часом, до виникнення пожежі на елеваторі. Оцінювання проміжку часу на протязі якого може виникнути пожежа на елеваторі є задачею особливо актуальною. *Мета роботи.* Розробка чисельної багато параметричної моделі для розрахунку процесу нагріву насипу рослинної сировини на елеваторі з метою визначення часу коли можливе виникнення пожежі у сховищі. *Методика.* Для математичного моделювання процесу нагріву насипу рослинної сировини застосовується двовимірне рівняння теплопереносу (рівняння енергії). Дане рівняння враховує можливість розрахунку поля температури при наявності в насипу рослинної сировини шарів з різними тепловими властивостями. Для чисельного інтегрування двовимірного рівняння теплопереносу використовуються дві кінцево-різницевої схеми. Для побудови першої кінцево-різницевої схеми здійснюється аналітичне розщеплення моделюючого рівняння теплопереносу на два кроки. На кожному кроці розщеплення невідоме значення температури визначається за явною схемою «розрахунку, що біжить». Друга кінцево-різницева схема є явною схемою для чисельного інтегрування двовимірного рівняння теплопереносу. *Наукова новизна.* Розроблена ефективна чисельна модель, що дозволяє оперативно, методом обчислювального експерименту визначати, як змінюється, з часом, поле температури всередині насипу рослинної сировини з метою визначення часу можливої пожежі на елеваторі. Модель враховує найбільш суттєві фізичні фактори, що впливають на процес нагріву насипу рослинної сировини. *Практична значущість.* На базі розробленої моделі створена комп'ютерна програма, що дозволяє в режимі реального часу визначати температурне поле всередині насипу рослинної сировини на елеваторі. Чисельна модель буде корисна для аналізу ризику виникнення пожежі на елеваторах та розробки заходів для зменшення виникнення цієї екстремальної ситуації. *Висновки.* Створена чисельна модель та комп'ютерна програма, що реалізує її на комп'ютері, що дозволяє методом обчислювального експерименту досліджувати динаміку нагріву насипу рослинної сировини та прогнозування часу виникнення можливої пожежі. Розроблена комп'ютерна програма може бути реалізована на комп'ютерах малої та середньої потужності. Представлені результати обчислювального експерименту.

**Ключові слова:** *теплоперенос; насип рослинної сировини; чисельне моделювання; кінцево-різницевої схеми*

## NUMERICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF SELF-HEATING OF PLANT RAW MATERIALS FOR THE PURPOSE OF DETERMINING THE TIME OF THE FIRE INITIATION

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.*,  
KOZACHYNA V.A.<sup>4</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Hydraulics and Water Supply, Dniprovskiy National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +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> Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: [berlov.oleksandr@pgasa.dp.ua](mailto:berlov.oleksandr@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., Dnipro, 49000, 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 Hydraulics and Water Supply, Dniprovskiy National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

**Abstract. Problem statement.** The problem of forecasting the dynamics of heating the embankment of vegetable raw materials due to the action of microorganisms is considered. The activity of microorganisms leads to a local increase in temperature in the embankment of vegetable raw materials, which leads, over time, to a fire in the elevator. Estimating the period of time during which an elevator fire may occur is a particularly important task. **The purpose of the article.** Development of a numerical multi-parametric model for calculating the process of heating the embankment of vegetable raw materials in the elevator in order to determine the time when a fire may occur in the storage. **Methodology.** A two-dimensional heat transfer equation (energy equation) is used for mathematical modeling of the heating process of an embankment of plant raw materials. This equation takes into account the possibility of calculating the temperature field in the presence of layers with different thermal properties in the plant material embankment. For the numerical integration of the two-dimensional heat transfer equation, two finite-difference schemes are used. To construct the first finite-difference scheme, the analytical splitting of the modeling heat transfer equation into two steps is carried out. At each step of the splitting, the unknown temperature value is determined according to an explicit “running calculation” scheme. The second finite difference scheme is an explicit scheme for the numerical integration of the two-dimensional heat transfer equation. **Scientific novelty.** An effective numerical model has been developed that allows to quickly determine how the temperature field inside the embankment of plant raw materials changes with time by the method of a computational experiment in order to determine the time of a possible fire at the elevator. The model takes into account the most significant physical factors affecting the heating process of the plant material embankment. **Practical significance.** On the basis of the developed model, a computer program was created that allows in real time to determine the temperature field inside the embankment of plant raw materials on the elevator. The numerical model will be useful for analyzing the risk of fire in elevators and developing measures to reduce the occurrence of this extreme situation. **Conclusions.** A numerical model and a computer program that implements it on a computer have been created, which allows the method of computational experiment to study the dynamics of heating the embankment of vegetable raw materials and predict the time of possible fire. The developed computer program can be implemented on low and medium power computers. The results of a computational experiment are presented.

**Keywords:** *heat transfer; mound of plant materials; numerical modeling; finite difference schemes*

**Постановка проблеми.** Коло екстремальних ситуацій, що з’являються на різного роду об’єктах дуже велике – це миттєві викиди хімічно небезпечних речовин, аварійні розливи токсичних речовин, вибухи, пожежі тощо [1–5; 9–15]. Тому, в останній час підвищений інтерес до дослідження наслідків таких екстремальних ситуацій. До такого кола задач відносяться пожежі на елеваторах. На цих об’єктах є значний ризик виникнення пожежі внаслідок самонагрівання насипу рослинної сировини (рис. 1).

Причиною цього є мікробіологічні процеси, що мають місце в сировині. Тепло, що виділяється в одній з частин сировини, наколюється внаслідок малої теплопровідності сировини.



Рис. 1. Пожежа на елеваторі  
(<https://korrespondent.net/ukraine/3979822-pozhar-na-elevatore-v-zhmerynke-lykvydyrovan>)

При досягненні певної температури в сировині виникає пожежа. Тому, значний науковий інтерес мають задачі, розв'язок яких спрямовано на прогнозування процесу самонагрівання рослинної сировини з метою визначення часу можливої пожежі на елеваторі. Нижче розглянута побудова математичної моделі для рішення цієї важливої задачі.

**Аналіз останніх досліджень.** Для моделювання процесів тепломасопереносу, що з'являються при екстремальних ситуаціях використовується декілька математичних моделей [2–5]. Слід відзначити, що пожежа на підприємствах може бути наслідком іншої екстремальної ситуації, наприклад – аварійний розлив рідини. З іншого боку – пожежа, як первинна причина, може «ініціювати» ряд небезпечних ситуацій: вибух, емісія токсичних газоподібних речовин в повітря. Тому існує досить значна кількість математичних моделей, що використовуються для опису «причини» екстремальної ситуації та її «наслідків» [2–5].

По-перше – це емпіричні моделі, що дозволяють швидко оцінювати ризик термічного або токсичного ураження працівників. На другому місці, по складності, знаходяться аналітичні моделі, що дозволяють дослідити процес з урахуванням найбільш важливих параметрів. Але ці моделі не можуть врахувати, наприклад, складну геометричну форму об'єкта, що моделюється. Для деяких задач використання аналітичних моделей є недоцільним. На третьому місці знаходяться чисельні та CFD моделі, що, найчастіше, реалізовані у вигляді комерційних пакетів програм (наприклад пакет ANSYS CFX). Вартість таких пакетів дуже висока. Наприклад, пакет ANSYS CFX коштує порядку 800 тис. доларів США та за періодичне оновлення пакету також потрібно платити гроші. Чисельне моделювання на базі пакету ANSYS CFX може тривати тиждень або більш того, що є досить незручним для проведення, наприклад, первинних, оцінюючих

розрахунків. Але можливості методу чисельного моделювання дуже високі та такий підхід дозволяє, в ряду випадків, перевершити можливості фізичного моделювання.

На підставі аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що в Україні існує дефіцит чисельних моделей, тому для аналізу та прогнозування наслідків екстремальних ситуацій важливим є розробка таких моделей.

**Мета статті.** Побудова чисельної моделі для прогнозування часу можливого загорання насипу рослинної сировини.

**Методика.** Розглядається процес нагріву насипу рослинної сировини внаслідок дії мікроорганізмів.

При побудові математичної моделі враховується:

1. Складна геометрична форма насипу рослинної сировини.
2. Нерівномірність коефіцієнту теплопровідності в «тілі» насипу.
3. Можливість завдання будь-якого місця появи нагріву сировини в «тілі» насипу.

Для математичного моделювання поля температури в насипу рослинної речовини використовується наступне рівняння теплопровідності [4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \sum \frac{Q_i}{\rho_k c_k} \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i), \quad (1)$$

де  $T$  – температура в насипу;  $a_x$ ,  $a_y$  – коефіцієнти температуропровідності;  $t$  – час;  $Q$  – інтенсивність « $i$ »-го джерела емісії тепла в насипу сировини;  $\rho_k, c_k$  – густина та теплоємність « $k$ »-го шару сировини;  $\delta(x - x_i), \delta(y - y_i)$  – дельта-функція Діраку, що показує координати  $x_i, y_i$  місця розташування джерела емісії тепла в насипу.

Таким чином, дане рівняння теплопровідності враховує, що область дослідження складається з різних шарів, які мають різні теплофізичні параметри. Наприклад, при наявності двох різних шарів

коефіцієнти теплопровідності визначаються так:

$$a_1 = \frac{k_1}{\rho_1 \cdot c_1}, \quad a_2 = \frac{k_2}{\rho_2 \cdot c_2}, \quad (2)$$

де  $k_1, k_2$  – коефіцієнти теплопровідності кожного шару.

При наявності шарів з різними теплофізичними параметрами на межі цих шарів ставиться умова «ідеального» теплового контакту.

**Методика рішення.** Для побудови чисельного розв'язку рівняння (1) використовується прямокутна різницева сітка. Температура середовища розраховується в середині різницевої комірки. Форма насипу моделюється за допомогою маркерів [8], тобто, виділяється набір різницевої комірки, що «відповідають» фізичній межі насипу. На цій межі задається гранична умова першого роду, тобто,  $T = \text{const}$ , що характеризує температуру навколишнього середовища, де знаходиться насип (приймається  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). На нижній межі розрахункової області має місце гранична умова – «теплоізована стінка». Початкова умова: при  $t = 0$  всередині насипу приймається  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . За допомогою маркерів також задається місце, де, внаслідок мікробіологічних процесів, збільшується температура сировини.

Для чисельного розв'язку моделюючого рівняння використовується дві різницеві схеми. Перша різницева схема розщеплення має вигляд [7]:

$$\frac{T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[ \frac{-T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{-T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right] + \frac{\sum Q_k}{2\delta q} \delta_i,$$

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[ \frac{T_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{T_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right] + \frac{\sum Q_k}{2\delta q} \delta_i,$$

де параметр  $\delta_i = 1$ , якщо в різницевій комірці є джерело емісії тепла та  $\delta_i = 0$  – якщо ні;  $\delta_q = \rho_k c_k$ .

Визначенні невідомого значення температури на кожному кроці знаходиться

за явною формулою «розрахунку, що біжить».

Друга різницева схема [6] для розрахунку значення температури всередині насипу має вигляд:

Перший крок:

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

Другий крок:

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \Delta t \sum \frac{Q_i}{\rho_k c_k} \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i).$$

Тобто, на першому кроці визначається поле температури, що формується в сировині, з часом, внаслідок процесу теплопровідності, а на другому кроці, визначається зміна температури в сировині внаслідок дії джерела емісії тепла (мікробіологічні процеси).

Здійснена програмна реалізація побудованих чисельних моделей. Для програмування був використаний FORTRAN.

**Результати.** Нижче наведені результати рішення модельної задачі на базі розробленої чисельної моделі та створеного комп'ютерного коду «PILE-2».

Схема розрахункової області (насип рослинної сировини) показана на рисунку 2.

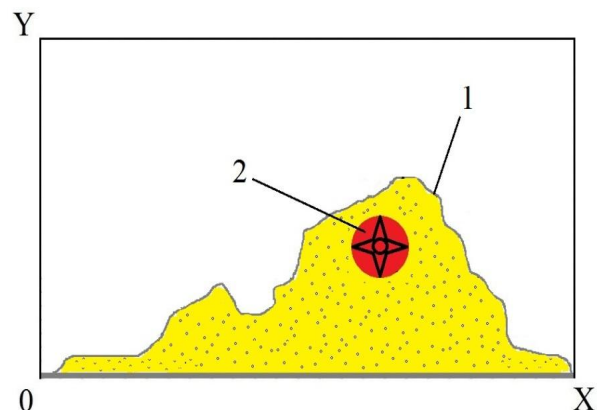


Рис. 2. Схема розрахункової області: 1 – границя насипу; 2 – джерело емісії тепла

Розрахунок здійснювався при таких даних: довжина насипу 19 м, максимальна висота насипу 2,3 м; джерело емісії

знаходиться на висоті 1,4 м; розміри розрахункової області 28 м×4,9 м; коефіцієнт теплопровідності середовища

$$0,09 \text{ Вт/м/град}; \quad \rho \cdot c = 8,5 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{град}};$$

$$Q = 60 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}. \text{ «Вогнище», що емітує тепло має}$$

розміри 1,1 м×0,2 м. Дуже важливо відзначити, що границя насипу рослинної сировини має складну геометричну форму, що враховується в чисельній моделі процесу теплопереносу.

Нижче на рисунках показано поле температури в насипу для різних моментів часу. Кожне число показує значення температури у відсотках від максимальної температури  $T_{\text{max}}$  в «вогнищі», що розташовано в насипу. Положенню «вогнища» відповідає число «99».

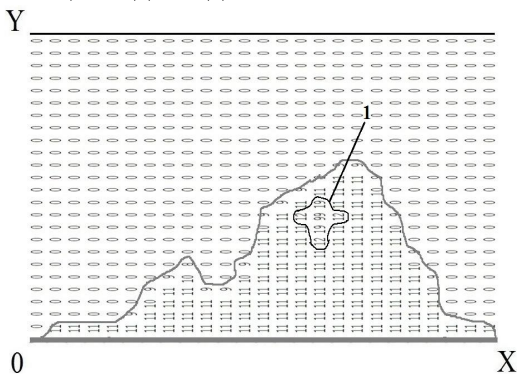


Рис. 3. Поле температури в насипу рослинної сировини,  $t = 5,49$  діб,  $T_{\text{max}} = 172^\circ \text{C}$  :  
1 – зона максимальної температури

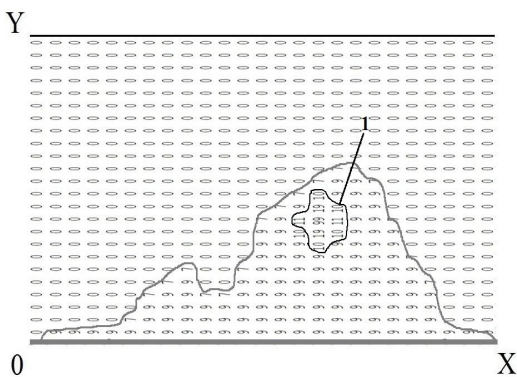


Рис. 4. Поле температури в насипу рослинної сировини,  $t = 6,59$  діб,  $T_{\text{max}} = 203^\circ \text{C}$  :  
1 – зона максимальної температури

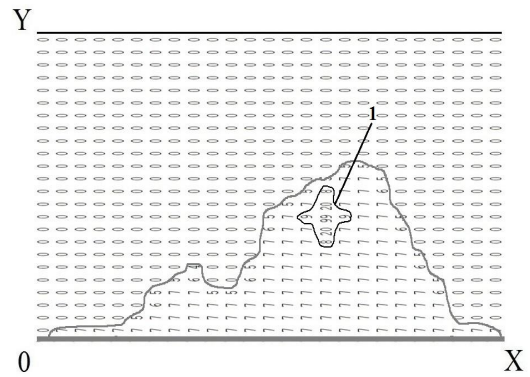


Рис. 5. Поле температури в насипу рослинної сировини,  $t = 8,79$  діб,  $T_{\text{max}} = 264^\circ \text{C}$  :  
1 – зона максимальної температури

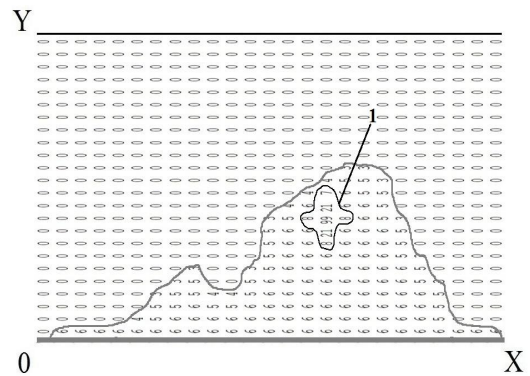


Рис. 6. Поле температури в насипу рослинної сировини,  $t = 10,99$  діб,  $T_{\text{max}} = 325^\circ \text{C}$  :  
1 – зона максимальної температури

На рисунках показано поле температури в розрахунковій області для певного часу. Відзначимо, що число «0» відповідає зоні навколишнього середовища (температура  $20^\circ \text{C}$ ). Кожне число в розрахунковій області показує температуру в відсотках, від максимальної температури  $T_{\text{max}}$ .

Як можна бачити з наведених рисунків, зона підвищеної температури збільшується з часом та має складну геометричну форму.

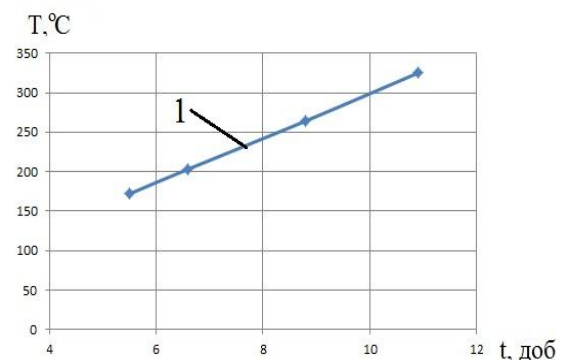


Рис. 7. Зміна максимальної температури в насипу з часом

На рисунку 7 показано, як змінюється максимальна температура сировини в рослинному насипу з часом.

Якщо прийняти, що займання сировини починається при температурі середовища порядку 180...200 °С, то з рисунку 7 можна бачити, що ймовірний час займання дорівнює приблизно 6 дб.

#### Висновки.

1. Розроблено багато-параметричну чисельну модель для розрахунку динаміки нагріву насипу рослинної сировини

внаслідок дії мікроорганізмів всередині насипу.

2. Розроблена модель базується на використанні двовимірного рівняння тепломасопереносу та дозволяє врахувати складну геометричну форми насипу.

3. Отримання прогнозних даних на базі даної моделі потребує декілька секунд комп'ютерного часу.

Подальший розвиток даного напрямку потрібно спрямувати на створення тривимірної чисельної моделі теплопереносу в насипу.

### 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. Виноградов А. Г. Развитие научных основ систем защиты работников от мощных тепловых излучений водяными завесами: дисс. Черкассы, 2017. 360 с.
3. Горшков В. И. Тушение пламени горючих жидкостей. Москва : Пожнаука, 2007. 268 с.
4. Моделирование пожаров и взрывов. Под общ. ред. Н. Н. Брушлинского и А. Я. Корольченко. Москва : «Пожнаука», 2006. 482 с.
5. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Чередниченко Л. А. Оцінка ризику термічного ураження у випадку аварійного горіння. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. Вип. 6 (271-272). С. 54–60. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241120.54.698.
6. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. Москва : Мир, 1980. 412 с.
7. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.
8. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Киев : Наукова думка, 1997. 368 с.
9. 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.
10. 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.
11. 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). doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.059.
12. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool. ALOHA Software. *Quality of Life*. Vol. 9. 2018. Pp. 38–45.
13. John S. Nasstrom, Gayle Sugiyama, Ronald L. Baskett, Shawn C. Larsen and Michael M. Bradley (2007). The National Atmospheric Release Advisory Center (NARAC) Modeling and Decision Supports System for Radiological and NUCLEAR Emergency Preparedness and Response. *Int. J. Emergency Management*. № 3, vol. 4. Pp. 1–32.
14. 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.
15. Cejun Cao and oth. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. 2017. Vol. 9, iss.11. 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 «Akademkniга», 2004, 118 p. (in Russian).
2. Vinogradov A.G. *Razvitie nauchnykh osnov sistem zashchity rabotnikov ot moshchnykh teplovykh izluchenij vodyanyimi zavesami: dissertatsiya* [Development of scientific foundations of systems for protecting workers from powerful thermal radiation by water curtains: dissertation]. Cherkassy, 2017, 360 p. (in Russian).
3. Gorshkov V.I. *Tushenye plameny goryuchykh zhydkostej* [Extinguishing flames of flammable liquids]. Moscow: Pozhnauka Publ., 2007, 268 p. (in Russian).

4. Brushlinsky N.N. and Korolchenko A.Ya. *Modelirovanie pozharov i vzryvov* [Simulation of fires and explosions]. Moscow: Pozhnauka Publ., 482 p. (in Russian).
5. 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 Prydniprov's'koï derzhavnoi akademii budivnictva ta arhitekturi* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Vol. 6 (271-272), 2020, pp. 54–60. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241120.54.698. (in Ukraine).
6. Roache P.J. *Vychislitel'naia gidrodinamika* [Computational Fluid Dynamics]. Moscow: Mir Publ., 1980, 446 p. (in Russian).
7. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow: Nauka Publ., 1983, 616 p. (in Russian).
8. 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).
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool. ALOHA Software. *Quality of Life*. Vol. 9, 2018, pp. 38–45. doi:10.5937/univtho8-18014.
13. 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, 2007, pp. 1–32.
14. 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.
15. Cao C., Li C., Yang Q. and Zhang F. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability*. Vol. 9, iss. 11, 2017. doi: 10.3390/su9112103.

Надійшла до редакції: 03.11.2021.