6. Pierre-Emmanuel Novac, Ghouthi-Boukli Hacene, A.Pegatoquet, B.Miramond, V.Gripon - Quantization and Deployment of Deep Neural Networks on Microcontrollers, France, 2021.
7. Quantization aware training URL: https://www.tensorflow.org/model_optimization/guide/quantization/training?hl=ru
8. Quantization Aware Training with TensorFlow Model Optimization Toolkit - Performance with Accuracy. URL: https://blog.tensorflow.org/2020/04/quantization-aware-training-with-tensorflow-model-optimization-toolkit.html

# МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ПОВІТРЯНИХ МАС НАД РОЗЛИВОМ РІДИНИ, ЩО ГОРИТЬ

**Олійник Володимир Вікторович, Басманов Олексій Євгенович**
Національний університет цивільного захисту України

Значна кількість надзвичайних ситуацій, що виникають в хімічній, переробній промисловості і на транспорті, починаються з аварійного розливу горючих рідин [1]. Основна небезпека розливу горючої рідини полягає у її спалахуванні. Наслідком теплового впливу пожежі на сусідні технологічні об’єкти є перетворення їх поверхні у джерело запалення, якщо їх температура досягає температури самоспалахування горючої рідини. Це призводить до розповсюдження пожежі, зокрема на резервуари або цистерни з нафтопродуктами. Каскадне розповсюдження пожежі характеризується значними матеріальними збитками і людськими жертвами.

Небезпека теплового впливу пожежі на сусідні об'єкти визначається тепловим потоком від факела та часом впливу. У свою чергу тепловий потік залежить від температури полум'я, ступеня його чорноти та геометричних характеристик: форми, довжини, кута нахилу. Тому оцінка теплового впливу пожежі на технологічні об'єкти або рухомий склад потребує оцінок променевої і конвекційної складових теплового потоку від пожежі. В [2] показано, що неврахування конвекційної складової теплопередачі від пожежі може призвести до помилки 20% при прогнозуванні часу досягнення резервуаром небезпечної температури. Це означає необхідність врахування конвекційної складової теплового потоку від пожежі розливу.

В [3] розглянуто горіння розливу рідини, що займає область Ω, розташовану в площині XOY (рис. 1). Розігріте повітря і продукти горіння, що утворились в зоні горіння, здіймаються вертикально вгору в напрямку осі OZ, захоплюючи сусідні нерухомі маси повітря. Внаслідок чого потік розширюється, а його швидкість зменшується. Швидкість потоку на висоті z = 0:

$$u_z(x,y,0,t)=\begin{cases}u_0,(x,y)\in\Omega\\ 0,(x,y)\notin\Omega.\end{cases}, \qquad (1)$$

де $u_0 = \mathrm{const}$ – початкова швидкість, що залежить від типу горючої рідини.

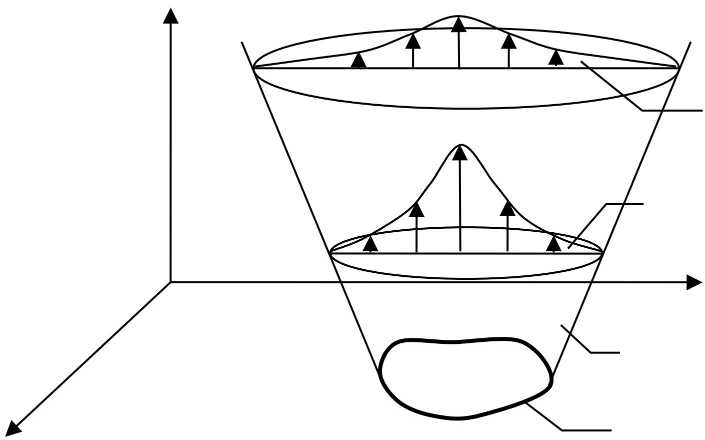

Рис. 1. Висхідний потік на розливом рідини, що горить: 1 – розлив горючої рідини; 2 – висхідний потік над осередком горіння; 3 – розподіл швидкостей у потоці на висоті $z_1$; 4 – розподіл швидкостей у потоці на висоті $z_2 > z_1$

Якщо розглядати повітря і продукти горіння, як Ньютонівську рідину, що не стискається, то її рух може бути описаний рівнянням Нав'є-Стокса:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \dfrac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \dfrac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \dfrac{\partial u_x}{\partial z} = -\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial P}{\partial x} + \nu\left(\dfrac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \dfrac{\partial^2 u_x}{\partial z^2}\right), \\ \dfrac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \dfrac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \dfrac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \dfrac{\partial u_y}{\partial z} = -\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial P}{\partial y} + \nu\left(\dfrac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \dfrac{\partial^2 u_y}{\partial z^2}\right), \\ \dfrac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \dfrac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \dfrac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \dfrac{\partial u_z}{\partial z} = -\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial P}{\partial z} + \nu\left(\dfrac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \dfrac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}\right), \end{cases} \qquad (2)$$

де $u(u_x, u_y, u_z)$ – вектор швидкості руху повітря у певній точці; P – тиск; υ – кінематична в'язкість повітря, м$^2$/с, ρ – густина повітря. Будемо вважати, що тиск є сталим по всьому об'єму (P = const), а рух потоку визначається висхідною швидкістю $u_z$ і вітром, направленим горизонтально. Таким чином, $u_x = const$; $u_y = const$.

Це дозволяє спростити систему рівнянь (2):

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} = \nu\left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}\right) - u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} - u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} - u_y \frac{\partial u_z}{\partial y},$$

$$z > 0,\ t > 0. \qquad (3)$$

Отримане рівняння (3) є нелінійним диференціальним рівнянням другого порядку параболічного типу, яке разом з крайовою умовою (1) і початковою умовою

$$u_z(x, y, z, 0) = 0 \qquad (4)$$

задає розподіл швидкостей у напівпросторі $z > 0$ в довільний момент часу t.

Перехід до нових змінних

$$\begin{cases} \xi = x - u_x t, \\ \eta = y - u_y t \end{cases} \qquad (5)$$

дозволяє спростити рівняння (3):

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) - w\frac{\partial w}{\partial z} \qquad (6)$$

де

$$w(\xi, \eta, z, t) = u_z(\xi + u_x t, \eta + u_y t, z, t). \quad (7)$$

Тоді початкова і крайова умови набувають вигляду

$$w(\xi, \eta, z, 0) = 0, \quad (8)$$

$$w(\xi, \eta, 0, t) = \begin{cases} u_0, (\xi + u_x t, \eta + u_y t) \in \Omega, \\ 0, (\xi + u_x t, \eta + u_y t) \notin \Omega. \end{cases} \quad (9)$$

Отримане диференціальне рівняння містить коефіцієнт кінематичної в'язкості, який істотно залежить від температури повітряного потоку. В свою чергу температура потоку нелінійно пов'язана з його швидкістю. Така залежність унеможливлює аналітичний розв'язок диференціального рівняння. Для цього в [3] використовується метод скінчених різниць, в основі якого лежить заміна частинних похідних скінченими різницями. Це дозволяє перейти від диференціального рівняння (6) з початковою умовою (8) і крайовою умовою (9) до рівняння в скінчених різницях. В якості області, в якій розглядається розподіл швидкостей і температур, може бути обраний скінчений паралелепіпед. Аналіз отриманого розв'язку показує, що вітер нахиляє висхідний потік, але кут нахилу не є сталим. Він збільшується з віддаленням від осередку горіння. Це відбувається внаслідок втрати швидкості і охолодження висхідного потоку.

**Список джерел**


1. Raja S., Tauseef S. M., Abbasi T. Risk of Fuel Spills and the Transient Models of Spill Area Forecasting // Journal of Failure Analysis and Prevention. 2018. Vol. 18. P. 445–455. Doi: https://doi.org/10.1007/s11668-018-0429-1
2. Abramov Y., Basmanov O., Salamov J., Mikhayluk A. Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank // Naukovyi Visnyk NHU. 2018. Vol. 2. P. 95-100. Doi: https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-2/12
3. Abramov Y., Basmanov O., Oliinik V., Khmyrov I., Khmyrova A. Modeling the convective component of the heat flow from a spill fire at railway accidence // EUREKA: Physics and Engineering. 2022. Vol. 6. P. 128-138. Doi: https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002702