

Д.П. Дубінін, к.т.н., ст. викладач, НУЦЗУ,  
А.А. Лісняк, к.т.н., доцент, нач. каф., НУЦЗУ

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИБУХУ ЗАРЯДУ З СУМІШІ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПРОТИПОЖЕЖНОГО БАР'ЄРУ

(представлено д.т.н. Кривцовою В.І.)

У роботі приведена математична модель вибуху зарядів з суміші вибухонебезпечних газів. При цьому дана модель дозволяє досліджувати процеси, які відбуваються при вибуху зарядів з суміші вибухонебезпечних газів. Встановлені початкові і граничні умови, які необхідні для проведення чисельного розрахунку вибуху заряду з суміші вибухонебезпечних газів при створенні протипожежного бар'єру.

**Ключові слова:** математична модель, протипожежний бар'єр, заряд з суміші вибухонебезпечних газів, конденсовані вибухові речовини.

**Постановка проблеми.** Проблема збереження лісів, відкритих територій, сільськогосподарських угідь від вогню останніми роками набула особливої гостроти у зв'язку з підвищенням температури повітря, відсутністю опадів, сильними вітрами. Математичне моделювання є одним із основних сучасних методів дослідження. Використання математичного апарату і сучасної обчислювальної техніки дозволяють скоротити матеріальні затрати на дослідження різних складних процесів щодо боротьби з природними пожежами. Розглянемо можливість застосування відомих моделей для дослідження ударної дії вибуху заряду з суміші вибухонебезпечних газів за рахунок створення протипожежного бар'єру для локалізації природної пожежі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В даний час існує чимала кількість робіт [1–3] в яких розглядаються математичні моделі, що описують різні процеси і параметри, характерні для локалізації природних пожеж за рахунок створення протипожежних бар'єрів. У роботі [1] розроблена математична модель взаємодії ударних хвиль з рослинністю і фронтом природних пожеж стосовно конденсованих вибухових речовин. Стосовно вибуху зарядів з суміші вибухонебезпечних газів, відома модель вимагає удосконалення, що викликано зміною початкового розподілу термодинамічного стану продуктів вибуху заряду з суміші вибухонебезпечних газів в порівнянні із станом продуктів вибуху конденсованих вибухових речовин. Крім того, рішення задачі не може бути отримане в автотельному вигляді, як це зроблено в роботі [1], оскільки розширення продуктів детонації заряду з суміші вибухонебезпечних газів не підкоряється законам сильного вибуху.

**Постановка завдання та його вирішення.** Метою роботи є визначення математичної моделі для розгляду процесів, що виникають при вибуху зарядів з суміші вибухонебезпечних газів.

Враховуючи відмінність термодинамічних властивостей продуктів детонації від повітря тому постановка задачі здійснювалася для суміші, що складається умовно з двох компонентів – газоподібних продуктів детонації і повітря. Математична модель вибуху заряду з суміші вибухонебезпечних газів у фітоценозі має вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho + \rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v}{\partial y} + \frac{\partial \rho u w}{\partial z} = f_x, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial (\rho + \rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial \rho v w}{\partial z} = f_y, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho u w}{\partial x} + \frac{\partial \rho v w}{\partial y} + \frac{\partial (\rho + \rho w^2)}{\partial z} = f_z, \quad (4)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial [(E + P)u]}{\partial x} + \frac{\partial [(E + P)v]}{\partial y} + \frac{\partial [(E + P)w]}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

де  $f_x = -sc_d \cdot \rho u \sqrt{u^2 + w^2}$ ;  $f_z = -sc_d \cdot \rho w \sqrt{u^2 + w^2}$  – проекція сили опору на осі координат ( $sc_d$  – параметр, що характеризує силу опору одиниці об'єму фітоценозу);  $\rho$ ,  $T$ ,  $P$  – густина, температура і тиск газової фази, відповідно;  $e$  – внутрішня енергія одиниці маси газової фази;  $t$  – час;  $u$ ,  $w$  – компоненти вектора швидкості газового потоку  $\vec{q}$ ;  $x$ ,  $z$  – координати в декартовій системі координат вздовж земної поверхні;  $R_a$  – масові швидкості утворення компонентів газової фази;  $c_a$  – масова концентрація утворення газової фази;  $s$  – питома поверхня фітомаси пологів лісу;  $c_d$  – емпіричний коефіцієнт опору пологів лісу;  $N$  – кількість компонентів суміші газів;  $v$  – складова вектора швидкості газового потоку  $\vec{q}$  по осі ОХ;  $y$  – декартова координата по осі, перпендикулярній земній поверхні;  $E$  – повна енергія одиниці об'єму суміші газів.

Закон переносу компонентів суміші з урахуванням швидкості дифузії має вид

$$\frac{\partial (\rho Q)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u Q)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v Q)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w Q)}{\partial z} = \rho_{Qt}, \quad (6)$$

де  $Q$  – відносна масова щільність домішки (відношення щільності газоподібної речовини домішки до щільності суміші),  $\rho_{Qt}$  – інтенсивність зміни щільності домішки внаслідок дифузії (відповідно до закону Фіка –  $\rho_{Qt} = \text{div}(\rho \mathfrak{D} \text{grad} Q)$ );  $\mathfrak{D}$  – коефіцієнт дифузії, що визначався по методиці М.Е. Берлянда [4].

На відміну від моделі [1], в запропонованій моделі (1-5) враховані процес дифузії і сила вітру, що дозволяє досліджувати переміщення газових мас на стадіях надзвукового та дозвукового розширення продуктів вибуху.

Представляє інтерес порівняти ефективність ударної дії, що виникає від вибуху шнурових зарядів на основі конденсованих вибухових речовин і зарядів з суміші вибухонебезпечних газів. У першому випадку умови розміщення заряду з суміші вибухонебезпечних газів відповідали умовам дослідження створення протипожежних бар'єрів з використанням шнурових зарядів у роботі [1] (рис.1). Така постановка спрямована на порівняння ефективності створення протипожежних бар'єрів із застосуванням зарядів різних типів. Дане порівняння буде коректним в разі використання в розрахунках зарядів з рівним значенням запасеної енергії на одиницю довжини заряду, тому у роботі [5] була розрахована енергія вибуху шнурового заряду, застосованого для локалізації природних пожеж, а заряд з суміші вибухонебезпечних газів було підібрано так, щоб володів тією ж енергією вибуху.

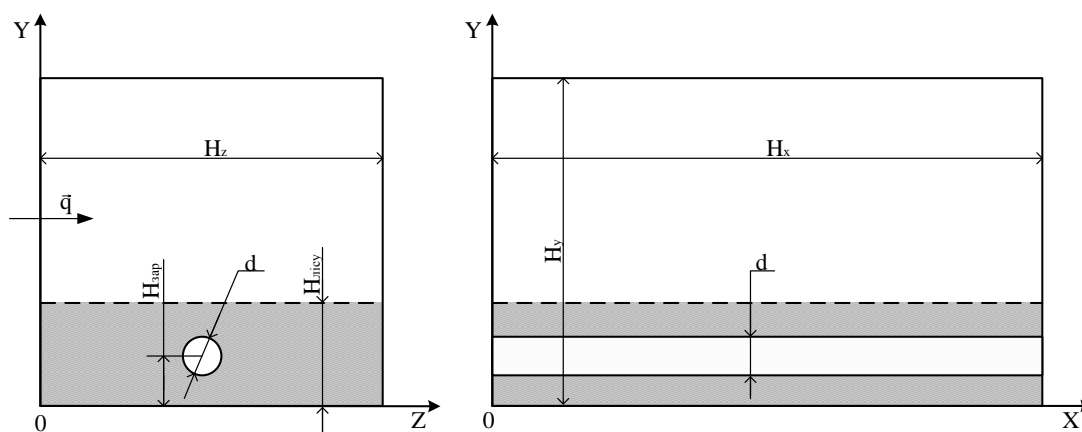
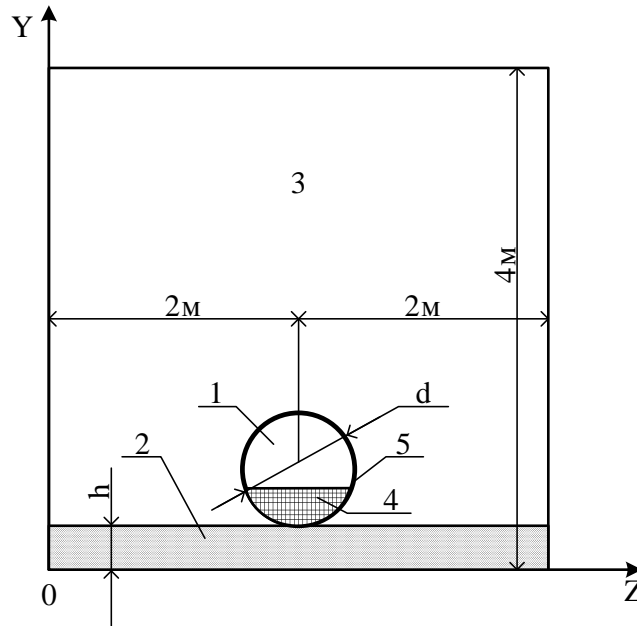


Рис. 1. Розміщення заряду з суміші вибухонебезпечних газів поверх наземного горючого матеріалу на висоті 1,5 м

Розрахункова область включає рослинний масив із однорідними властивостями по висоті дерев, розташований в ньому заряд з суміші вибухонебезпечних газів і частина приземного шару атмосфери. Швидкість набігаючого потоку вітру задавалася рівною  $q_z = 3$  м/с як середня швидкість вітру для м. Харкова і Харківської області [6]. Для проведення моделювання за рисунком 1, початкові і граничні умови задачі газодинамічного розширення продуктів вибуху заряду у фітоценозі при створенні протипожежного бар'єру візьмемо з [1].

З практичної точки зору підвішування заряду є трудомістким процесом. Більш того, значний відсоток розповсюдження природних пожеж відбувається за рахунок низової пожежі. Тому представляє інтерес створення протипожежного бар'єру на земній поверхні. Для цього заряд з суміші вибухонебезпечних газів необхідно розташовувати безпосередньо

поверх наземного горючого матеріалу. В цьому випадку в розташування заряду має вид (рис. 2).



**Рис. 2.** Розміщення заряду з суміші вибухонебезпечних газів на наземному горючому матеріалі: 1 – продукти детонації, 2 – шар рослинності, 3 – повітря, 4 – місце розрахунку, 5 – початкова межа розміщення продуктів детонації,  $h$  – товщина шару покриву,  $d$  – діаметр заряду

Розмір області моделювання уздовж осі  $OZ$  дорівнює 4 м. У розрахунковій області, обмеженої діаметром  $d$ , у осередках 4 на початковий момент часу параметри газу відповідають стану продуктів детонації, яка виникла в результаті миттєвого вибуху.

Для початкових умов з одним зарядом з суміші вибухонебезпечних газів досліджувалися розрахункові варіанти з діаметром заряду  $d = \{0,95; 1,3; 1,8\}$ . Коефіцієнт опору середовища в разі реалізації вибуху в листяному і змішаному лісі, а також поверх наземного горючого матеріалу може відрізнитися від коефіцієнта опору середовища для молодого густого хвойного лісу. Тому, в моделі коефіцієнт опору мав значення  $sc_d = \{0,5; 0,6; 0,7\}$ . Товщина шару наземного горючого матеріалу приймалася рівною  $h = 0,1$  м.

Таким чином, початкові умови мають наступний вид:

В області детонації заряду з суміші вибухонебезпечних газів

$$\left(y - h - \frac{d}{2}\right)^2 + \left(z - \frac{H_z}{2}\right)^2 < \frac{d^2}{4}, \quad 0 < x < H_x, \quad (7)$$

приймалося:  $P|_{t=0} = 1,4$  МПа;  $T|_{t=0} = 3480$  К;  $\gamma|_{t=0} = 1,267$ ,  $u|_{t=0} = 0$ ;  $v|_{t=0} = 0$ ;  $w|_{t=0} = 0$ ;  $N|_{t=0} = 1$ .

В області повітряного простору

$$h < y < H_y, \quad 0 < x < H_x, \quad 0 < z < H_z, \quad \left(y - h - \frac{d}{2}\right)^2 + \left(z - \frac{H_z}{2}\right)^2 \geq \frac{d^2}{4}, \quad (8)$$

приймалося:  $P|_{t=0} = 0,1$  МПа;  $T|_{t=0} = 293$  К;  $\gamma|_{t=0} = 1,4$ ;  $u|_{t=0} = 0$ ;  $v|_{t=0} = 0$ ;  $w|_{t=0} = 3$  м/с;  $N|_{t=0} = 0$ .

В області фітоценозу

$$0 < y < h, \quad 0 < x < H_x, \quad 0 < z < H_z, \quad (9)$$

приймалося:  $P|_{t=0} = 0,1$  МПа;  $T|_{t=0} = 293$  К;  $\gamma|_{t=0} = 1,4$ ;  $u|_{t=0} = 0$ ;  $v|_{t=0} = 0$ ;  $w|_{t=0} = 0$  м/с;  $N|_{t=0} = 0$ .

Таким чином, граничні умови мають наступний вид. Земна поверхня в розрахунках представлялася у вигляді множини непроникних ділянок, які у сукупності моделюють розрахункову область поверхонь [7]. На цих поверхнях виконувалася умова не протікання:  $q\vec{n} = 0$ , де  $\vec{n}$  – вектор нормалі до даної поверхні.

При постановці граничних умов вважається, що витратна складова швидкості вітру не перевершує швидкість звуку. Набігаючий потік газоподібної речовини на вході певної ділянки визначається величинами:

$$\text{– повної ентальпії } I_{00} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2), \quad (10)$$

$$\text{– функції ентропії } S_0 = \frac{P}{\rho^\gamma}, \quad (11)$$

– відносною масовою густиною домішки  $Q$  ( $Q \leq 1$ , при надходженні газоподібної речовини домішки).

Моделювання обривання рослинного горючого матеріалу в результаті вибуху заряду з суміші вибухонебезпечних газів за рахунок створення протипожежного бар'єру зроблено в постановці задачі миттєвого вибуху. У такому разі точка ініціювання детонації не впливає на результати моделювання, оскільки не впливає на початковий розподіл параметрів продуктів вибуху. Ширина протипожежного бар'єру залежатиме від енергії вибуху, яка, у тому числі, визначається діаметром і розташуванням заряду з суміші вибухонебезпечних газів.

**Висновки.** В запропонованій моделі враховані процес дифузії і сила вітру, що дозволяє досліджувати переміщення мас на пізніх стадіях розширення продуктів вибуху та розглядати процеси, що виникають при вибуху зарядів з суміші вибухонебезпечних газів. Приведені початкові і граничні умови, які дозволяють провести чисельний розрахунок вибуху заряду з суміші вибухонебезпечних газів для створення протипожежного бар'єру та порівняти їх ефективність застосування.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – М.: Наука, 1992. – 408 с.
2. Абрамов Ю.А. Моделирование пожаров, их обнаружения, локализации и тушения / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов, А.А. Тарасенко. – Х.: НУГЗУ, 2011. – 927 с.
3. Гербут Ф.Ф. Лісова пірологія / Ф.Ф. Гербут, – Ужгород: УНУ ГФ, 2012. – 103 с.
4. Фізика / І.Є. Лопатинський, І.Р. Зачек, Г.А. Ільчук, Б.М. Романишин. – Л.: Афіша, 2005. – 385 с.
5. Говаленков С.В. Математическое моделирование параметров взрыва объемно-шлангового заряда в пологе леса. / С.В. Говаленков, Д.П. Дубинин // Системи обробки інформації: – Х., 2011. – № 2 (92). – С. 282-285.
6. Статистические данные про погоду и климат Харькова. – Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/34300.htm>.
7. Дубінін Д.П. Моделювання вибухової хвилі з урахуванням впливу рослинності при лісових пожежах / Д.П. Дубінін, С.В. Говаленков // Проблемні питання службово-бойового застосування сил охорони правопорядку на сучасному етапі: науково-практична конференція, 4 – 5 березня 2008 р.: тези доповідей. – Х., 2008. – С. 257-258.

*Получено редколлегией 17.10.2016*

Д.П. Дубинин, А.А. Лисняк

### **Математическое моделирование взрыва заряда из смеси взрывоопасных газов для создания противопожарного барьера**

В работе приведена математическая модель взрыва зарядов из смеси взрывоопасных газов. При этом данная модель позволяет исследовать процессы, происходящие при взрыве зарядов из смеси взрывоопасных газов. Установлены начальные и граничные условия, которые необходимы для проведения численного расчета взрыва заряда из смеси взрывоопасных газов при создании противопожарной барьера.

**Ключевые слова:** математическая модель, противопожарный барьер, заряд из смеси взрывоопасных газов, конденсированные взрывчатые вещества.

D.P. Dubinin, A.A. Lisnyak

### **Mathematical modeling of the explosion of the charge of a mixture of explosive gases to create fire barriers**

The paper provides a mathematical model of the explosion of charges of a mixture of explosive gases. Furthermore, this model allows us to investigate processes occurring in the explosion of the charge of a mixture of explosive gases. Established initial and boundary conditions, which are necessary for the numerical calculation of the charge of the explosion of a mixture of explosive gases to create fire barriers.

**Keywords:** mathematical model, fire barrier, the charge of a mixture of explosive gases, condensed explosives.