

## РОЗРАХУНОК ДОВЖИНИ ПРЕДЕТОНАЦІЙНОЇ ДІЛЯНКИ

Волков В.Е., канд. фіз.-мат. наук, доцент  
Одеська національна академія харчових технологій, Одеса

*Розглянуто проблему розрахунку (оцінки) довжини преддетонаційної ділянки, яка є однією з найважливіших проблем сучасної вибухобезпеки та вибухозахисту. Запропоновано схему розрахунку довжини преддетонаційної ділянки, що базується на побудованій раніше теорії гідродинамічної нестійкості та структури хвиль горіння. В свою чергу запропонована схема є основою для інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (СППР) з питань вибухобезпеки.*

*Problem of the calculation (evaluation) of the detonation induction distance, which is one of the most important among the up-to-date explosion-proof and blast-safe problems, is considered. The calculating scheme for the detonation induction distance, which is based on the theory for the combustion waves hydrodynamical instability and structure, is proposed. In its turn the proposed scheme forms the basis for the intellectual decision support systems (DSS) on the explosion-proof problems.*

Ключові слова: вибух, вибухобезпека, горіння, полум'я, дефлаграція, детонація, преддетонаційна ділянка, прийняття рішень.

Проблеми вибухобезпеки завжди були й лишаються надзвичайно актуальними. Особливо це стосується зернопереробних підприємств, тому що технології переробки зерна так чи інакше ведуть до створення у значній кількості виробничого пилу з органічних палих речовин [1].

Усі вибухові процеси, що мають за основу неконтрольоване окислення різних палих речовин із виділенням великої кількості теплової енергії, в залежності від швидкості та механізму їх проходження, поділяються на дві групи: дефлаграційні та детонаційні [2,3].

Дефлаграція (розвинена дефлаграція) – це особливий тип горіння, коли полум'я розповсюджується з достатньо високою, проте дозвуковою швидкістю. При цьому створюються досить сильно стиснуті гази, які можуть здійснювати значну механічну роботу. Надмірний тиск має порядок до кількох атмосфер [2,3].

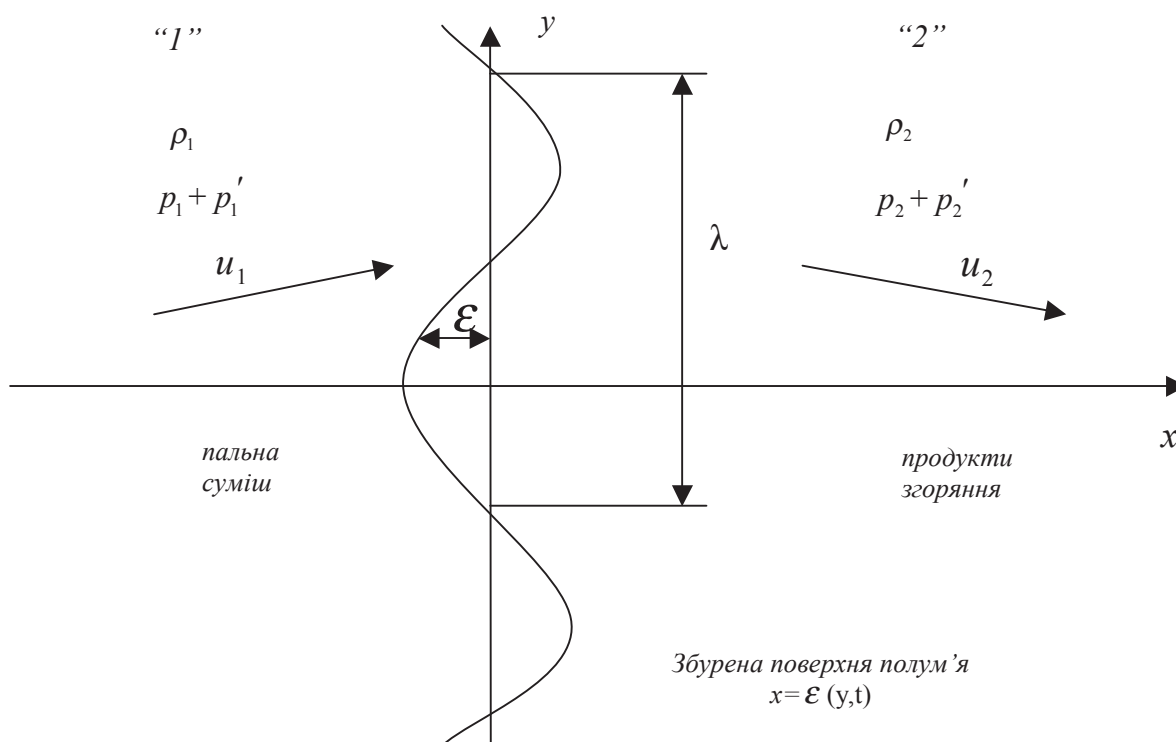
Більш руйнівним вибуховим процесом є детонація – розповсюдження горіння з надзвуковою швидкістю, тобто розповсюдження в палий суміші самопідтримуваної ударної хвилі [2,3]. Ударна хвиля, що завжди розповсюджується з надзвуковою швидкістю, стрибкоподібно підвищує температуру суміші до величини, яка перевищує мінімальну температуру її запалення, і викликає таким чином екзотермічну реакцію, енерговиділення якої підтримує ударну хвилю (в протилежному випадку затухання останньої було б неминучим).

Утворення як дефлаграційних, так і детонаційних вибухових хвиль, в природних (без штучного ініціювання) умовах, які наближені до виробничих, обумовлено нестійкістю нормального горіння (процесу розповсюдження ламінарного полум'я) [2,3]. Як наслідок розвитку внутрішньої нестійкості полум'я, процес горіння автотурбулізується і рух полум'я прискорюється: відбувається шпарке збільшення швидкості фронту горіння у порівнянні з ламінарними режимами. Прискорене полум'я, діючи подібно до поршня у відомій газодинамічній задачі [4,5], створює перед собою ударну хвилю [5]. Ця ударна хвиля може запалити газ (детонація), а якщо таке не відбудеться, може мати досить високу інтенсивність (розвинена дефлаграція) [2,3]. Між початком розповсюдження полум'я та виникненням – у разі розвинення нестійкості процесу горіння – минає певний час, за який фронт полум'я переміщується на певну відстань, яку називають преддетонаційною ділянкою [6]. Слід зауважити, що хоча така ділянка носить назву преддетонаційної, на її краю може виникати як детонація, так і сильна дефлаграційна ударна хвиля. Оцінити довжину преддетонаційної ділянки є однією з важливіших проблем вибухобезпеки, бо така оцінка дає змогу проектувати принаймні вибухобезпечні об'єкти, які можуть бути при цьому пожежонебезпечними.

Мета цього дослідження полягає в розробці схеми розрахунку довжини преддетонаційної ділянки.

Нестійкість та комірчаста структура полум'я досліджені нами у ряді наукових праць [7-10].

Плоске полум'я в необмеженому просторі розглядається або як поверхня розриву [9], або як зона скінченної довжини [7,8]. В обох випадках лінеаризовані збурення в задачі про стійкість мають (по одній з просторових координат і по часу) один і той самий експоненційний вигляд (рис. 1).



**Рис. 1 – Нестационарний потік середовища крізь збурену поверхню плоского полум'я**

Тому що будь-яке лінеарізоване збурення по координаті  $y$  можливо представити рядом (або інтегралом) Фур'є, тобто отримати його накладенням елементарних хвиль типу  $\exp(ihy)$ , то достатньо досліджувати тільки таке рішення для довільного хвильового числа  $h > 0$ , де

$$h = 2\pi / \lambda \quad (1)$$

і, відповідно,

$$\lambda = 2\pi / h, \quad (2)$$

а  $\lambda > 0$  – довжина хвилі збурення. Припущення про експоненційну залежність від часу  $t$  дає наступний вираз для  $\mathcal{E}$ :

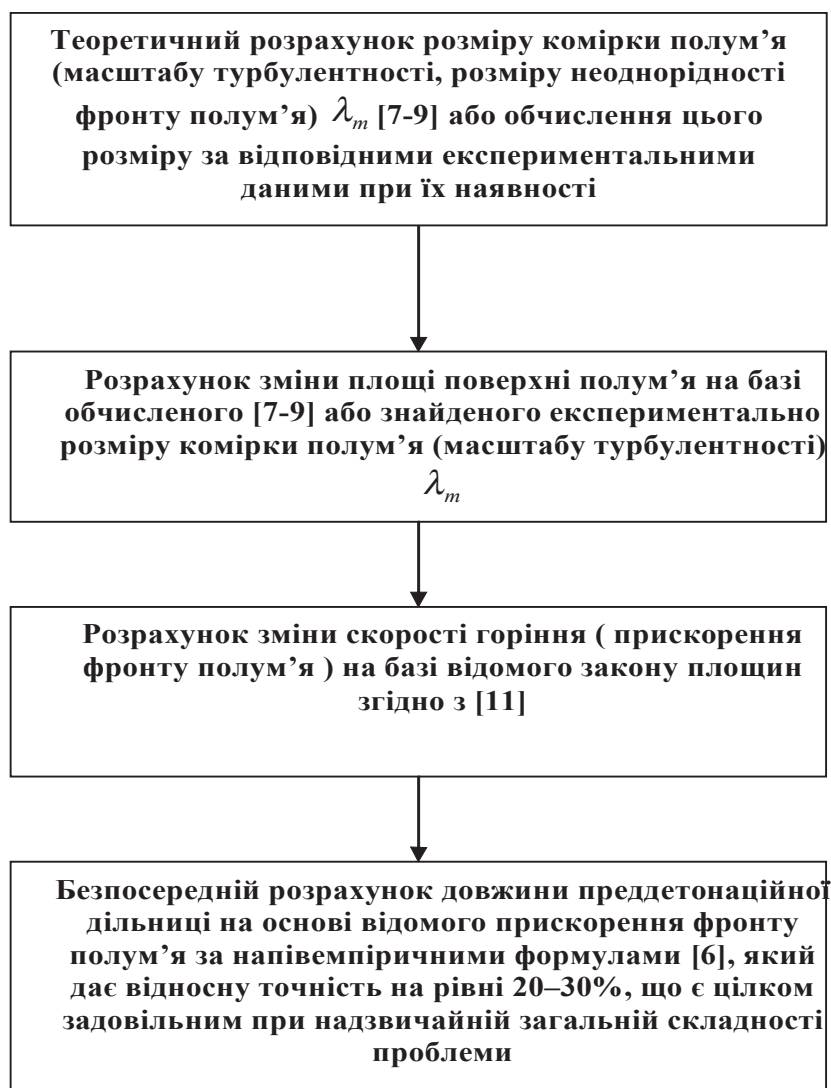
$$\mathcal{E}(y, t) = A_{00} h^{-1} \exp(ihy - i\omega t), \quad (3)$$

де додатне значення  $h$  забезпечує обмеженість величини  $\mathcal{E}$  при  $|y| \rightarrow +\infty$ .

Відомий висновок Л.Д. Ландау (1944) про абсолютну нестійкість розривної схеми полум'я, що розповсюджується в ідеальній рідині, може служити тільки якісним поясненням явищ, котрі спостерігаємо [3]. Проте кількісне погодження теоретичних результатів і експериментальних вимірювань вимагає врахування кількох стабілізуючих факторів, а саме: в'язкості, стислості, а також ефекту зміни довжини зони горіння під впливом збурень. Урахування цих факторів [7–9] дає змогу оцінити середній розмір неоднорідностей фронту (комірок) полум'я, що спостерігаються експериментально, довжиною хвилі  $\lambda_m$  збурення, яке максимально швидко зростає з часом. При цьому величина  $\lambda_m$  визначається аналітично.

Зміна площі фронту горіння відбувається за законом площин [11]. На базі знання закону зміна площі фронту полум'я, в свою чергу, дає змогу за допомогою напівемпіричних формул [6] обчислювати довжину преддетонаційної дільниці.

Таким чином, розрахунок довжини преддетонаційної дільниці відбувається за схемою, зображеною на рис.2.



**Рис.2 – Схема розрахунку довжини преддетонаційної ділянки**

Наведену вище схему розрахунку довжини преддетонаційної ділянки покладено в основу систем підтримки прийняття рішень з питань вибухобезпеки та вибухозахисту [12–14], в основу яких покладено як класичну модель прийняття рішень, так і модель прийняття рішень в умовах невизначеності [15,16], яка базується на теорії нечітких множин та нечіткій логіці [17-19].

Вірний розрахунок довжини преддетонаційної ділянки дає змогу уникнути помилок при проектуванні вибухонебезпечних об'єктів. Подібної помилки було припущено, наприклад, при проектуванні елеватора «DE BRUCE» ( Хайсвілл, США ), який вибухнув 8 червня 1998 р. [20]. Як показав аналіз причин вибуху [21-23], елеватор був занадто «розтягнутий» уздовж (828,5 м), що дало змогу полум'ю «розігнатися», тому пожежа, що виникла на одному з кінців елеватора перетворилася на вибух ( навіть не дефлаграційний, а детонаційний ): довжина елеватора в даному випадку була набагато більшою ніж розрахована довжина преддетонаційної ділянки.

### Література

1. Васильев Я.Я., Семенов Л.И. Взрывобезопасность на предприятиях по хранению и переработке зерна. – М.: Колос. – 1983. – 224 с.
2. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. – М.: Изд-во АН СССР.– 1963.–256 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т.: Т. VI. Гидродинамика. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.– 1986. – 736 с.
4. Овсянников Л.В. Лекции по основам газовой динамики. - М: Гл. ред. Физ.-мат. лит.– 1981.– 368 с.
5. Черный Г.Г. Газовая динамика. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.– 1988. – 424 с.
6. Нетлетон М. Детонация в газах. – М.: Мир.– 1989. – 280 с.
7. Асланов С.К., Волков В.Э. Интегральный метод анализа устойчивости ламинарного пламени. – Физика горения и взрыва, 1991, №5. – С. 160-166.
8. Aslanov S., Volkov V. On the Instability and Cell Structure of Flames. – Archivum combustionis, 1992, Vol.12, Nr. 1-4. – P. 81-90.
9. Волков В.Э., Рыбина О.Б. Об устойчивости плоской стационарной волны медленного горения в сжимаемой среде. – Дисперсные системы. XXI научная конференция стран СНГ 20-24 сентября 2004 г., Одесса. Тезисы докладов. – Одесса: "Астропринт", 2004. – С. 75-76.
10. Волков В.Э. Неустойчивость пламени в цилиндрических трубах и взрывные процессы на зерноперерабатывающих предприятиях //Зернові продукти і комбікорми, 2007. – №1, березень 2007. – С. 43-45.
11. Зверев И.Н., Смирнов Н.Н. Газодинамика горения. – М.: Изд-во МГУ.– 1987.–307 с.
12. Волков В.Э. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений по вопросам взрывобезопасности //Зернові продукти і комбікорми, 2007. – №2, червень 2007. – С. 44-47.
13. Волков В.Э. Теоретические основы построения систем интеллектуальной поддержки принятия решений по вопросам взрывобезопасности //Информационные системы и технологии: Тез. докл. II-го семинара. – Одесса. – 2004. – С. 6-7.
14. Волков В.Э., Макоед Н.А. Теория нечетких множеств в экспертных системах по вопросам взрывобезопасности //Тез. докл. международной научно-практической конференции «Пищевые технологии-2006». – Одесса.– 2006. – С. 157.
15. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Под ред. Р.Р. Ягера. – М.: Радио и связь, 1986.– 408 с.
16. Энта Ё. Теория нечетких решений: Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Под ред. Р.Р. Ягера. – М.: Радио и связь, 1986. Часть IV. Практические задачи. – С. 301-312.
17. Zadeh L.A. Fuzzy Sets. //Information and Control, 1965. – Vol. 8. – P. 338-353.
18. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М: Мир, 1976. – 165 с.
19. Мелихов А.Н., Бернштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 272 с.
20. Kauffman C.W. The DeBruce Grain Elevator Explosion //Seventh International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions: Thirteenth International Colloquium on Dust Explosions & Eighth Colloquium on Gas, Vapor, Liquid, and Hybrid Explosions. St. Petersburg, Russia. July 7-11, 2008. – St. Petersburg, 2008. – Vol.3. – P. 3-26.
21. Волков В.Э. Причины взрыва элеватора “DE BRUCE” //Дисперсные системы: Тез. докл. XXIII-ей научной конференции стран СНГ. – Одесса. – 2008. – С. 67-68.
22. Волков В.Э., Попов А.С., Тришин Ф.А. Анализ причин взрыва элеватора “DE BRUCE” //Зернові продукти і комбікорми, 2008. – №3, вересень 2008. – С. 40-44.
23. Волков В.Э., Попов А.С., Тришин Ф.А. Теоретический анализ причин взрыва элеватора “DE BRUCE” // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – Одеса, 2008. – Вип. 34. Т.1. – С. 288-291.