

УДК 62.403.3

В.Ю. Шевцов, В.Ю. Левченко

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара*

## **ОЦІНКА МОЖЛИВОГО УРАЖЕННЯ ВІД ВИБУХУ ПАЛИВНО-ПОВІТРЯНИХ СУМІШЕЙ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ СПЕЦІАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ ІНФРАСТРУКТУРИ**

Запропонована в статті методика розрахунку вражаючих факторів в залежності від енергії вибуху і відстані дозволяє передбачити як надійну відстань розташування цивільних споруд, так і розрахувати їх на міцність, забезпечуючу надійний захист персоналу конкретного об'єкта. Окрім того, дана методика дозволяє визначити можливі шляхи підвищення вибухобезпеки ППВ за умови головного критерію - «захист персоналу / мінімізація збитку».

*Ключові слова:* вибухобезпека, паливно-повітряна суміш, вибух, вибухозахист, критерії поразки повітряною ударною хвилею, оцінка вражаючих факторів вибуху, оцінка вибухостійкості, надлишковий тиск, питомий імпульс, фаза стиснення, фаза розрідження.

Предложенная в статье методика расчета поражающих факторов в зависимости от энергии взрыва и расстояния позволяет предсказать как надежное расстояние расположения гражданских сооружений, так и рассчитать их на прочность, обеспечивающую надежную защиту персонала конкретного объекта. Кроме того, данная методика позволяет определить возможные пути повышения взрывобезопасности ТВС при главном критерие - «защита персонала / минимизация ущерба».

*Ключевые слова:* взрывобезопасность, топливно-воздушная смесь, взрыв, взрывозащита, критерии поражения воздушной ударной волной, оценка поражающих факторов взрыва, оценка взрывоустойчивости, избыточное давление, удельный импульс, фаза сжатия, фаза разрежения.

The methodology for calculating the damaging factors proposed in the article depending on the energy of the explosion and the distance allows one to predict both the reliable distance of the location of civilian structures and their strength, which provides reliable protection for the personnel of a particular object. In addition, this technique allows you to identify possible ways to increase the explosion safety of fuel assemblies with the main criterion - "personnel protection / minimization of damage».

*Keywords:* explosion safety, fuel-air mixture, explosion, explosion protection, criteria for damage by an air shock wave, assessment of the damaging factors of an explosion, assessment of explosion resistance, overpressure, specific impulse, compression phase, rarefaction phase.

**Вступ.** При проектуванні спеціальних об'єктів інфраструктури, таких як військові склади, де зберігаються легкозаймисті летючі речовини, підприємства хімічної галузі, приміщення, де є ГБО з можливістю витоку газу, майстерні для практичних робіт студентів, студентські КБ і т.д., необхідно розробляти заходи

щодо захисту персоналу, будівель і устаткування від випадкових вибухів. Найбільш розповсюдженими на таких об'єктах є вибухи паливно-повітряних сумішей.

У даній роботі викладається методика розрахунку кількісних показників вражаючих факторів паливно-повітряних сумішей у відкритому об'ємі. Розглядається можливість їх застосування для оцінки вибухостійкості спеціальних об'єктів інфраструктури.

Питання вибухобезпеки технологічного обладнання досить добре вивчені і розроблені. Однак, дивлячись на останні події з вибухами військових складів в Україні можна зробити висновок, що цьому питанню не приділяється на практиці достатньої уваги, що призводить до дуже великих економічних втрат і, часто, до людських жертв. Так само вибухи паливно-повітряних сумішей можливі в різних майстернях і технічних студентських лабораторіях, де скупчення людей може бути максимально можливим. У цій статті аналізуються вибухи паливно-повітряних сумішей. Для оцінки їх вражаючої дії необхідна розробка надійної методики. Перед її викладом розглянемо деякі базові визначення і поняття. Як відомо, вибухобезпечність виробництв забезпечується виконанням системи заходів по вибухозахисту, вибухостійкості і вибухопопередженню. Під вибухостійкістю виробництва розуміють його здатність виконувати свої функції при впливі механічних факторів аварійного вибуху без порушення безпеки. Заходи по вибухозахисту спрямовані на запобігання впливу на людей небезпечних і шкідливих факторів вибуху і збереження матеріальних цінностей. Їх об'єднує таке поняття, як вибухопопередження, що являє собою систему заходів щодо запобігання можливості виникнення вибуху. Частина вищевказаних заходів повинна враховуватися при проектуванні як обладнання, так і самих спеціальних об'єктів інфраструктури з метою їх подальшої безпечної експлуатації. Потенційним джерелом аварійного вибуху на таких об'єктах є ємності для зберігання паливних і газових сумішей.

Прогнозування небезпеки аварійних вибухів можна проводити в кілька етапів:

- моделювання аварійних ситуацій в умовах конкретного виробництва;
- оцінки вражаючих факторів вибуху, особливо розрахункових навантажень і їх впливу на виробничий комплекс;
- аналізу міцності і стійкості об'єктів з урахуванням впливу вражаючих факторів вибуху;
- використання для розробки заходів основного критерію: «захист персоналу / мінімізація шкоди».

Для правильної оцінки небезпеки джерела потенційного вибуху і, відповідно, розробки заходів щодо підвищення вибухобезпеки необхідно виявити особливості даних вибухів. Для цього розглянемо процес протікання вибуху реципієнта. Як уже згадувалося вище, джерело вибуху розглядається як тара, в якій знаходиться паливо або скраплений газ під тиском. Руйнування резервуарів здійснюється внутрішнім тиском (тиском руйнування в разі газу)

або при механічному впливі на резервуар з паливом, яке може досягатися з найрізноманітніших причин.

### Визначення вражаючих факторів паливно-повітряної суміші

Основним вражаючим чинником при вибуху паливно-повітряних сумішей є повітряна ударна хвиля (ПУХ). Для визначення характеристик основного вражаючого фактора вибуху, необхідних для подальших розрахунків, розглянемо профіль повітряної ударної хвилі (рис. 1). В точку простору А ПУХ приходить через деякий час після вибуху. До її приходу в даній точці атмосферний тиск  $P_0$ . У момент приходу хвилі він стрибком підвищується до максимального значення ( $P_\phi$ ) у фронті ПУХ. Різниця між максимальним тиском і атмосферним називається надлишковим тиском  $\Delta P_\phi$  у фронті ПУХ. За фронтом ударної хвилі тиск  $P_\phi = F1 \cdot (\tau)$  швидко падає і через деякий час від моменту приходу фронту ударної хвилі воно стає нижче атмосферного, а потім за час  $\tau$  відновлюється до початкового значення. ПУХ складається з двох областей: фази стиснення і фази розрідження. Фаза стиснення - це час, протягом якого тиск в ПУХ зберігається вище атмосферного. Фаза розрідження - час, протягом якого тиск в ПУХ залишається нижче атмосферного. Вражаюча дія ПУХ визначається фазою стиснення, а фаза розрідження не відіграє суттєвої ролі. Вона, навпаки, лише підсилює дію фази стиснення. Після закінчення фази стиснення об'єкт потрапляє в фазу розрідження, в якій тиск, який чиниться на об'єкт, істотно зменшується, а тому і руйнування в цій фазі істотно менше, ніж у фазі стиснення. При практичних розрахунках тиск у фазі розрідження не враховується. Також ПУХ характеризується тиском швидкісного напору  $P_{\text{шв}} = F2 \cdot (\tau)$ , який утворюється в результаті гальмування мас повітря, наступних за фронтом ПУХ. Тим самим створюється динамічне навантаження, тобто швидкісний тиск. Він викликає перекидання і відкидання об'єктів. Надмірний тиск у фронті ПУХ  $\Delta P_\phi$  викликає ударну дію на об'єкт. Якщо значення  $\Delta P_\phi$  вище критичних величин, то в об'єкті виникають різні пошкодження і руйнування. Вражаюча дія ПУХ на будівельні конструкції і людей характеризується наступними параметрами: надлишковим тиском; тиском швидкісного напору повітря; імпульсом фази стиснення; тривалістю фази стиснення. Нижче наведені основні розрахункові формули параметрів вражаючих факторів. Надмірний тиск  $\Delta P_\phi$  [Па] розраховується як:

$$\Delta P_\phi = (P_\phi - P_0), \text{Па}, (1)$$

а його зміна в часі відображається графіком (рис. 1).

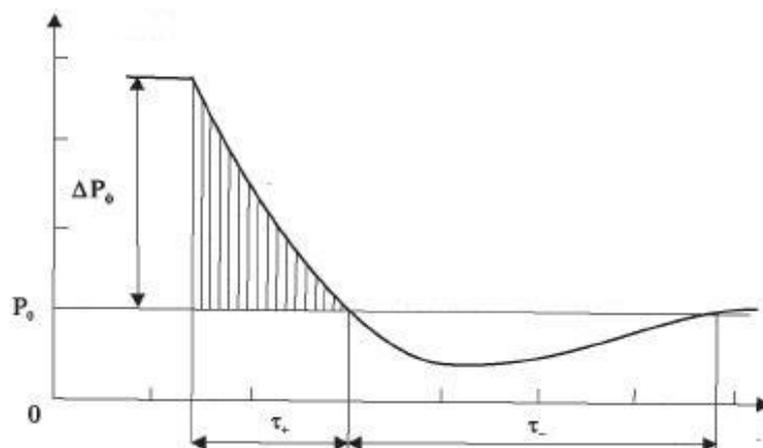


Рис. 1. Профіль ПУХ в координатах тиск-час(P-τ)

де  $\tau_+$  - час фази стиснення;  $\tau_-$  - час фази розрідження;  $P_0$  – тиск навколишнього середовища.

Для розрахунку вражаючих факторів від дії ПУХ необхідно знати, яка речовина призводить до вибуху, яка її маса, питома теплота згорання гомогенної суміші, який ступінь розширення продуктів згорання, швидкість розподілу фронту горіння і який режим горіння (детонація або дефлограція).

Для розрахунку візьмемо посудину з газовою ППС, а саме ацетилен масою речовини 150кг. Питома теплота згорання ацетилену в середньому дорівнює 49,9 кДж на кг. Розрахуємо енергозапас горючої суміші(2), знаючи, що на поверхні землі він збільшується приблизно в 2 рази:

$$E = 2 \cdot m_{нал} \cdot Q_{згор} = 9.98 \cdot 10^8 \text{ Дж} , \quad (2)$$

де  $m_{нал}$  - маса палива;  $Q_{згор}$  - питома теплота згорання речовини.

Швидкість розповсюдження фронту горіння приймаємо 300 м/с, ступінь розширення продуктів згорання для газових сумішей типових вуглеводнів приймаємо рівним 7 розрахунків. Зміну надлишкового тиску при дефлограційному режимі горіння, в залежності від відстані до точки вибуху, можна розрахувати по апроксимаційній залежності [3]:

$$\Delta P_m D(r) = p_0 \cdot \left( \frac{U}{c_0} \right)^2 \cdot \frac{\sigma - 1}{\sigma} \cdot \left[ 0.83 \cdot \frac{\sqrt[3]{E}}{r} - 0.14 \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{E}}{r} \right)^2 \right], \quad (3)$$

де  $U$  - швидкість розповсюдження фронту горіння;  $p_0$  - нормальний атмосферний тиск;  $\sigma$  - ступінь розширення продуктів згорання;  $c_0$  - швидкість звуку в повітрі,  $r$  - відстань від точки вибуху.

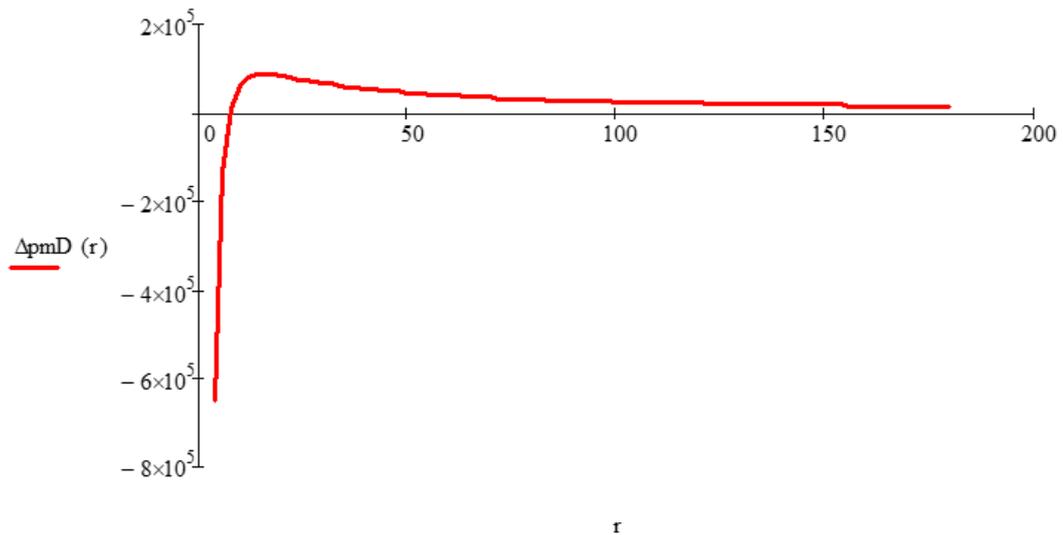


Рис. 2. Графік залежності надлишкового тиску від відстані

Другим дуже важливим показником при оцінці уражень є питомий імпульс фази стиснення. Знаходимо його по апроксимаційній залежності [4]:

$$iokr(r) = \frac{p_0}{c_0} \cdot \sqrt[3]{\frac{E}{p_0}} \cdot W \cdot (1 - 0.4 \cdot W) \cdot \left[ 0.06 \cdot \frac{\sqrt[3]{\frac{E}{p_0}}}{r} - 0.01 \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{\frac{E}{p_0}}}{r} \right)^2 + 0.0025 \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{\frac{E}{p_0}}}{r} \right)^3 \right], (4)$$

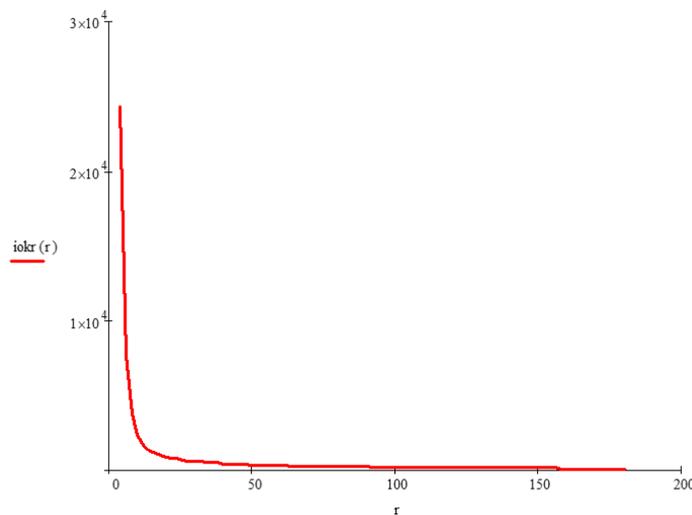


Рис. 3. Графік залежності питомого імпульсу від відстані

Для аналізу отриманих уражень спеціалістами з цивільної оборони були створені спеціальні таблиці, після чого була проведена оцінка ураження живої сили і можливість руйнування об'єктів інфраструктури (Табл. 1, 2).

В результаті проведених розрахунків для вибраної ємності були складені таблиці зон руйнувань (табл. 3) і ступенів уражень (табл. 4) з розподілом зон уражень незахищеного персоналу (рис.4,5).

Таблиця 1

**Характер враження незахищених людей від надлишкового тиску  $\Delta P_{\Phi}$** 

$\Delta P_{\Phi}$ , кПа	Враження (травми)	Характер враження
20...40	Легкі	Легка загальна контузія організму, тимчасове ушкодження слуху, удари і вивихи кінцівок
40...60	Середні	Серйозні контузії, пошкодження органів слуху, кровотеча з носа і вух, сильні вивихи і переломи кінцівок
60...100	Тяжкі	Сильна контузія всього організму, пошкодження внутрішніх органів і мозку, важкі переломи кінцівок. Можливі смертельні випадки
>100	Особливо тяжкі	Отримані травми дуже часто приводять до смерті

Таблиця 2

**Характер зон руйнувань від надлишкового тиску  $\Delta P_{\Phi}$** 

Зона руйнувань	Надлишковий тиск на фронті ПУХ $\Delta P_{\Phi}$ , кПа	Характеристика руйнувань
повних	>50	Повністю руйнуються житлові та промислові будівлі і споруди, а також протирадіаційні укриття і частина сховищ, які перебувають в районі центру вибуху. Утворюються суцільні завали. Руйнуються або пошкоджуються підземні комунально-енергетичні мережі.
сильних	30-50	Сильно руйнуються промислові будівлі і повністю руйнуються житлові будинки. Сховища та комунально-енергетичні мережі, як правило, зберігаються. В результаті руйнування будівель утворюються місцеві і суцільні завали
середніх	20-30	Будинки й споруди отримують середні руйнування, дерев'яні споруди повністю руйнуються, утворюються окремі завали і суцільні пожежі
слабких	10-20	Будинки й споруди отримують слабкі руйнування, утворюються окремі пожежі.

Таблиця 3

**Характеристика зон руйнувань в залежності від величини надлишкового тиску  $\Delta P_{\Phi}$**

Зона руйнувань	Надлишковий тиск на фронті ПУХ $\Delta P_{\Phi}$ , кПа	Відстань від центра вибуху
Повних	>50	До 50м
Сильних	30-50	Від 50м до 80м
Середніх	20-30	Від 80м до 125м
Слабких	10-20	Від 125м до 265м

Таблиця 4

**Характеристика ступеней ураження в залежності від величини надлишкового тиску  $\Delta P_{\Phi}$**

Ступінь ураження	Надлишковий тиск на фронті ПУХ $\Delta P_{\Phi}$ , кПа	Відстань від центра вибуху
Особливо тяжкі	>100	Характер вражень досягається на відстані до 25м
Тяжкі	60-100	От 25м до 40м
Середні	40-60	От 40м до 68м
Легкі	20-40	От 68 до 140м

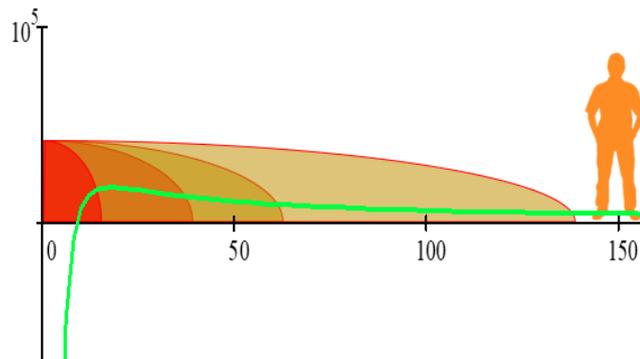


Рис. 4. Розподіл зон ураження незахищених людей

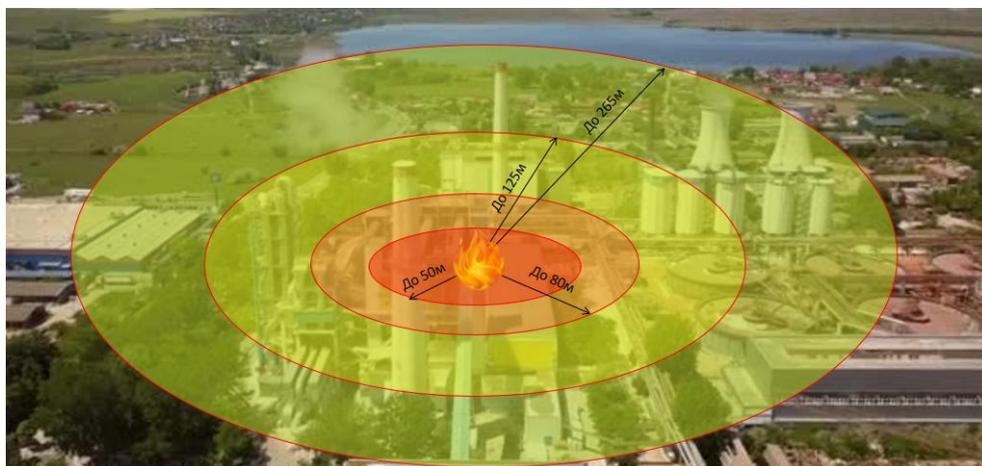


Рис. 5. Розподіл зон ураження інфраструктури

На рис.5 показаний розподіл зон надлишкового тиску вибуху. Також показаний розподіл полів надлишкового тиску вибуху на основі кількісних показників параметрів основного вражаючого фактора вибуху (рис. 4,5).

**Висновки.** Запропонована в статті методика розрахунку вражаючих факторів в залежності від енергії вибуху і відстані дозволяє передбачити як надійну відстань розташування цивільних споруд, так і розрахувати їх на міцність, забезпечуючу надійний захист персоналу конкретного об'єкта. Окрім того, дана методика дозволяє визначити можливі шляхи підвищення вибухобезпеки за умови головного критерію - «захист персоналу / мінімізація збитку». В результаті проведених досліджень слід виділити основні заходи по:

1) вибухозахисту виробництва шляхом підвищення вибухостійкості будівель, а також, по використанню додаткових захисних споруд, знижуючих розрахункові параметри впливу вражаючих факторів вибуху. За результатами проведеного прогнозування визначається, які об'єкти інфраструктури потрапляють в осередок враження;

2) допустимості руйнувань і плануванню відновлювальних робіт в максимально короткі терміни через оснащення будівель легкоскридними конструкціями і розрахунок допустимого відсотка скління будівель для попередження обвалення несучих конструкцій.

### **Бібліографічні посилання**

1. Засоби враження і боєприпаси: навчальний посібник. /А.В. Бабкін, В.А. Велданов та ін.; – М.: Вид-во МДТУ ім. М.Е. Баумана, 2008.- 984 с.

2. Основи фізики вибуху: навчальний посібник./ М.П. Михайлов.; БДТУ, 2005. - 144 с.

3. Методики оцінки наслідків аварій на небезпечних виробничих об'єктах: Збірник документів. - М.: ВАТ «НТЦ Промислова безпека», 2006. - 208 с.

4. Оперативне прогнозування стану об'єктів при аварії з вибухом. - М.: МЧС Росії, 2007. - 24 с.

*Надійшла до редколегії 07.11.2019*