

*В.М. Сирих, к.т.н., доцент, НУЦЗУ,
О.В. Тарахно, к.т.н., доцент, нач. кафедри, НУЦЗУ*

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЕКСПЕРТНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ АВАРІЙНИХ ВИБУХІВ В ОБМЕЖЕНОМУ ОБ'ЄМІ

(представлено д-ром техн. наук Куценком Л.М.)

У роботі наводяться основні положення експертного дослідження версії виникнення аварійних вибухів ємностей, що знаходяться під тиском.

Ключові слова: аварійний вибух, розпад газодинамічного розриву, вибухонебезпечна суміш, фізичний вибух, BLEVE.

Постановка проблеми. Дослідження аварійних вибухів обладнання, яке знаходилося під тиском, з метою визначення причини їх виникнення є однією із найбільш складних задач пожежно-технічної експертизи. Це обумовлюється наслідками вибухів, під час яких на великих площах руйнуються будівельні конструкції, знищується обладнання, змінюється первісний стан об'єкту, що викликає певні труднощі при дослідженні таких подій.

Відсутність в експертних установах України нормативно затвердженої методики дослідження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з вибухами різноманітних апаратів та ємностей, не дозволяє у повному обсязі та за короткі терміни провести пожежно-технічну експертизу. Наявна методична база визначення причини пожежі не вирішує дану проблему через невизначеність методологічних підходів для проведення дослідження аварійних вибухів. Це призводить до того, що при проведенні експертизи такого роду вибухів різними спеціалістами їх висновки щодо виду та причини настання небезпечної події суттєво різняться, а іноді суперечать один одному.

Тому обґрунтування методологічних основ, на підставі яких можливе створення уніфікованої методики дослідження причини виникнення аварійних вибухів в обмеженому об'ємі, є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прогнозуванню наслідків внутрішніх аварійних вибухів, які мають місце під час горіння газо-, паро та пилоповітряних сумішей на виробництвах присвячена робота [1]. При цьому у якості основних показників наслідків аварійних вибухів розглядаються характер та об'єм руйнування будівельних конструкцій і будинків (споруд), що очікується. Результати математичного моделювання динаміки пожеж та вибухів, які отримані російсь-

кими вченими в останній третині ХХ століття, наведені в [2]. Узагальнені дані про особливості виникнення, розвиток та наслідки пожеж і вибухів, що залежать від властивостей речовин та матеріалів, джерел запалювання, умов протікання процесу, розкриті у роботі [3]. Зокрема розглядаються загальні закономірності розвитку аварійних вибухів у приміщеннях та методи зниження вибухових навантажень до безпечного рівня. Організаційні, методичні та правові основи виконання судових експертиз техногенних вибухів (СЕТВ) у загальному вигляді наведені в [4]. Розкривається предмет, об'єкт, задачі та класифікація СЕТВ. Однак, проблема визначення причини виникнення аварійних вибухів в обмеженому об'ємі (ємностях) у наведених роботах не досліджується.

Постановка завдання та його вирішення. Експертне дослідження версії виникнення аварійного вибуху ємності або іншого обладнання, що знаходилися під тиском, доцільно починати з його ідентифікації відносно механізму настання небезпечної події, її динаміки та наслідків. Всі вибухи за механізмом виникнення та утворення небезпечних факторів (наслідків вибуху) можна класифікувати на фізичні, хімічні та комбіновані. Механізми виникання хімічних вибухів на відкритому просторі і в приміщеннях, а також алгоритми їх експертного дослідження докладно наведені у роботах [6] та [7]. Дана робота присвячена питанням експертного дослідження фізичних вибухів обладнання, що знаходиться під тиском, як самостійної надзвичайної події, так і комбінованого вибуху.

Фізичні вибухи виникають, як правило, внаслідок руйнування оболонки апаратів, трубопроводів, ємностей (балонів, резервуарів), що знаходяться під значним тиском. Навіть за наявності в обладнанні негорючих газів (діоксиду карбону, фреону тощо) аварійні вибухи призводять до катастрофічних наслідків. Це обумовлюється можливістю виникнення такого фізичного явища як розпад газодинамічного розриву. Даний процес супроводжується виникненням за межами обладнання повітряної ударної хвилі, а також проникненням всередину ємностей хвилі розрідження. Унаслідок вивільнення енергії, яка накопичується при стисненні газів, ємність розривається на окремі фрагменти. Як відомо [5], під час довільного розпаду газодинамічного розриву можливі їх три ситуації.

Перша ситуація – газодинамічний розрив розпадається на дві ударні хвилі, що поширюються в обидві сторони від початкового розриву і на контактний розрив. Така ситуація виникає під час зіткнення двох мас газу, що рухаються назустріч одна одній із великою швидкістю, якщо виконується умова

$$u_1 - u_2 > (P_2 - P_1) \sqrt{\frac{2/\rho_1}{P_1(\gamma_1 - 1) + P_2(\gamma_1 + 1)}}, \quad (1)$$

де P_1, P_2 – тиск газових середовищ (тиск першого газового середовища P_1 менший, ніж тиск другого газового середовища P_2); u_1, u_2 – швидкість руху газів першого та другого середовищ; ρ_1 – густина газу першого середовища; γ_1 – коефіцієнт адиабати першого газового середовища.

На практиці подібні аварії можуть виникати на виробничих установках внаслідок порушення умов ведення технологічних процесів. Одним із етапів дослідження версії виникнення вибуху за наведеною причиною є вивчення роботи технологічної автоматики.

Друга ситуація – розрив розпадається на ударну хвилю і хвилю розрідження, що рухаються в протилежні сторони, і на контактний розрив. На практиці така ситуація реалізується при руйнуванні оболонки ємності із наступним зіткненням газів, одного що знаходився під тиском, та другого – навколишнім газовим середовищем. Це найбільш типовий сценарій розвитку аварійного вибуху ємностей як з горючими, так і з негорючими речовинами, який реалізується за наступної умови

$$-\frac{2c_{s2}}{\gamma_2 - 1} \left(1 - \frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\gamma_2 - 1}{2\gamma_2}} < u_1 - u_2 < (P_2 - P_1) \sqrt{\frac{2/\rho_1}{P_1(\gamma_1 - 1) + P_2(\gamma_1 + 1)}}, \quad (2)$$

де γ_2 – коефіцієнт адиабати другого газового середовища; c_{s2} – швидкість поширення звуку в другому газовому середовищі.

Руйнування ємностей зі скрапленими газами та легкокиплячими рідинами, що знаходяться під тиском, також супроводжується виникненням ззовні повітряної ударної хвилі і проникненням всередину ємності хвилі розрідження. Це викликає скипання рідкої фази в сосуді та інтенсивне пароутворення. У результаті вивільнення енергії фазового переходу та енергії, що накопичилася при стисненні речовини, оболонка ємності руйнується з розльотом осколків на великі відстані.

Під час дослідження версії виникнення фізичного вибуху ємності за наведеної умови вивчаються обставини, що призвели до її реалізації.

Третя ситуація – газодинамічний розрив розпадається на дві хвилі розрідження, що поширюються у протилежні сторони. При цьому відбувається розліт газів. При досить великій швидкості розльоту тиск у хвилях розрідження падає до нуля і на місці довільного розриву виникає область без газу, що розширюється – вакуум.

Динаміка аварійного вибуху ємностей за наявності в них стиснутих горючих газів суттєво відрізняється від наведених вище сценаріїв розвитку фізичних вибухів. Розпад газодинамічного розриву при руйнуванні таких ємностей призводить не тільки до утворення повітряної ударної хвилі і зон розрідження, але і до виникнення хімічного вибуху (детонації або дефлаграції залежно від газодинамічних умов поширення зони горіння).

Розрив ємності із стиснутими газами і легкокиплячими рідинами в осередку пожежі з виникненням хвилі тиску отримав назву BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion, вибух парів, що розширюються, при скипанні рідини). Миттєве надходження в навколишній простір крапель вуглеводневих рідин призводить до утворення на їх поверхнях горючої суміші, яка загоряється. Сукупність крапель, які горять, утворюють вогневу кулю.

При дослідженні версії виникнення фізичного та комбінованого вибухів, які обумовлюється BLEVE, визначають потенційну можливість такого явища для конкретної речовини, що знаходилася в ємності. Для цього розраховують частку речовини, що миттєво випаровується за даної температури, за формулою

$$\xi_T = \frac{H_T - H_{T_{\text{кип}}}}{\Delta H_{\text{вип}}} = \frac{c_p (T - T_{\text{кип}})}{\Delta H_{\text{вип}}}, \quad (3)$$

де ξ_T – частка рідини, що миттєво випаровується за температури T ; H_T – питома ентальпія рідини за температури T ; $H_{T_{\text{кип}}}$ – питома ентальпія рідини за температури $T_{\text{кип}}$ за атмосферного тиску; $\Delta H_{\text{вип}}$ – питома теплота випаровування в точці кипіння за атмосферного тиску; c_p – питома теплоємність рідкої фази; $T_{\text{кип}}$ – температура кипіння речовини за атмосферного тиску; T – температура рідкої фази (за наявності в ємності запобіжного пристрою величину T визначають за формулою

$$T = \frac{B}{A - \lg P_k} - C_A + 273, \text{ K},$$

де P_k – тиск спрацювання запобіжного пристрою; A , B , C_A – константи Антуана, визначаються за довідниковою літературою.

Якщо $\xi < 0,35$, BLEVE не виникає. При $\xi > 0,35$ ймовірність виникнення даного явища велика.

Потужність вибуху ємності з перегрітими легкозаймистими та горючими рідинами або зрідженими вуглеводневими газами визначається тротиловим еквівалентом, а ступінь руйнування конструкцій

об'єкту обумовлюється надлишковим тиском ΔP та імпульсом i в ударній хвилі, які можна розрахувати за формулами:

$$\Delta P = P_0 \left(0,8 \frac{m_{\text{пр}}^{0,33}}{r} + 3 \frac{m_{\text{пр}}^{0,66}}{r^2} + 5 \frac{m_{\text{пр}}}{r^3} \right), \text{ кПа}, \quad (4)$$

$$i = 123 \frac{m_{\text{пр}}^{0,66}}{r}, \quad (5)$$

де P_0 – атмосферний тиск, кПа; r – відстань від центру ємності, м;

$m_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{eff}}}{Q_{\text{ТНТ}}}$ – приведена маса або тротильовий еквівалент вибуху (маса

тринітротолуолу, що викликає подібний ступінь руйнування), кг; $Q_{\text{ТНТ}} = 4,52 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ – теплота вибуху тринітротолуолу; E_{eff} – ефективна енергія вибуху при розширенні середовища, яке знаходиться в ємності, розраховують за формулою

$$E_{\text{eff}} = V \frac{P_p - P_0}{\gamma - 1}, \quad (6)$$

де γ – коефіцієнт адіабати газового середовища, що розширяється; V – об'єм резервуару, що руйнується; P_p – тиск, за якого руйнується резервуар.

Необхідно відмітити, що в практиці дослідження вибухів часто зустрічаються неоднозначні ситуації щодо механізму їхнього виникнення та розвитку. Аналіз обставин розвитку небезпечної події із застосуванням розрахункових методів дає змогу вирішити цю проблему.

Висновок. Наведені в даній роботі теоретичні положення механізму виникнення та розвитку фізичних та комбінованого вибухів в обмеженому об'ємі дають підстави для розробки уніфікованої методики їх експертного дослідження. Застосування в експертній практиці такої методики дозволить у короткі терміни провести відповідні дослідження та визначити причину виникнення вибуху.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пилюгин Л.П. Прогнозирование последствий внутренних аварийных взрывов. – М.: Пожнаука, 2010. – 380 с.
2. Брушлинский Н.Н. Моделирование пожаров и взрывов / Н.Н. Брушлинский, А.Я. Корольченко. – М.: ВНИИПО, 2000. – 492 с.
3. Таубкин С.И. Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. – М.: ВНИИПО, 1999. – 600 с.

4. Таубкин И.С. Судебная экспертиза техногенных взрывов. - М.: Юрлитинформ, 2009. – 592 с.

5. Зельдович Я.Б. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 492 с.

6. Тарахно О.В. Проблемні питання дослідження вибухів газоповітряних сумішей при проведенні пожежно-технічних експертиз / О.В. Тарахно, В.М. Сирих, Р.В. Тарахно // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: УГЗУ, 2009.– Вып. 25. – С. 175-180.

7. Тарахно О.В. Експертне дослідження версії виникнення вибуху газоповітряної суміші у приміщенні / О.В. Тарахно, В.М. Сирих, Р.В. Тарахно // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ, 2010. – Вып. 27. – С. 198-205.

V.N. Syrykh, E.V. Tarachno

Методологические основы экспертного исследования аварийных взрывов в ограниченном объеме

В работе приводятся основные положения экспертного исследования версии возникновения аварийных взрывов объемов, находящихся под давлением.

Ключевые слова: аварийный взрыв, распад газодинамического разрыва, взрывоопасная смесь, физический взрыв, BLEVE.

V.N. Syrykh, E.V. Tarachno

Expert research methodological bases of emergency explosions in closed volume

Basic provisions of expert research of the physical explosions of the volumes being under pressure are given in work.

Keywords: emergency explosion, disintegration of a gasdynamic gap, explosive mix, physical explosion, BLEVE.