

*І.А. Чуб, д.т.н., професор, нач. каф., НУЦЗУ,
В.В. Матухно, ад'юнкт, НУЦЗУ*

ПРОГНОЗУВАННЯ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ З ВИБУХОМ ХМАРИ ГАЗОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ

Наведено методику прогнозування наслідків надзвичайної ситуації з вибухом газоповітряної хмари в умовах нафтопереробного підприємства. Методика містить розрахунок параметрів вибуху та оцінку ймовірності пошкодження або руйнування будівель, споруд та технологічних установок.

Ключові слова: вибух, хмара газоповітряної суміші, прогноз наслідків.

Постановка проблеми. Надзвичайні ситуації (НС), пов'язані з аваріями на технологічному обладнанні та установках підприємств нафтопереробної галузі, характеризуються великими об'ємами викидів вибухонебезпечних речовин, утворенням хмар газоповітряних сумішей (ГПС) і, як наслідок, вибухами, що приводять до руйнування або пошкодження будівель, споруд, установок.

Мінімізація втрат та збитків від техногенної ЧС, що супроводжується викидом ГПС та вибухом, можливе тільки на основі реалізації комплексу задач прогнозування її розвитку та можливих наслідків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на значну практичну потребу, в Україні на даний час відсутній єдиний теоретико-методологічний підхід до побудови методів, що забезпечують прогнозування розвитку та можливих наслідків вибуху хмар ГПС в умовах промислового об'єкту з урахуванням особливостей забудови території, режиму вибуху, характеристик вибухонебезпечних речовин.

Нормативний документ [1] містить загальну методику розрахунку основних параметрів (надлишкового тиску та імпульсу хвилі тиску) вибуху газоповітряної або пароповітряної хмари, що утворилася в результаті НС з викидом вибухонебезпечної речовини при розгерметизації технологічної установки. Але при цьому не враховується режим вибуху та склад вибухонебезпечної суміші.

Іноземні джерела, наприклад, [3, 4] при розрахунку основних параметрів вибуху беруть за основу його тротиловий еквівалент та розглядають, як правило, детонаційний режим. Проте, як свідчать статистичні дослідження, при вибухах хмар ГПС у (80...90) % випадків реалізується дефлаграційний механізм вибухового перетворення.

Постановка завдання та його вирішення. *Мета статті* – розробка методики прогнозування наслідків вибуху хмари газоповітряної

суміші, що виникла в результаті руйнування ємності для зберігання в умовах нафтопереробного заводу (НПЗ).

Для кількісної оцінки параметрів повітряних ударних хвиль при вибухах ГПС розглянемо повне руйнування обладнання, що містить горючу речовину в газоподібній фазі, викид цієї речовини в навколишнє середовище, утворення хмари ГПС, вибухове перетворення ГПС.

У статті розглядається утворення хмари ГПС з горючої речовини (газу) одного виду. Для розрахунку параметрів ударних хвиль під час вибуху хмари ГПС враховувалися наступні вихідні дані:

- характеристики горючого газу;
- середня концентрація горючого газу в суміші;
- стехіометрична концентрація горючого газу з повітрям;
- маса горючого газу, що міститься в хмарі;
- питома теплота згоряння горючого газу;
- інформація про навколишній простір.

Прогнозування наслідків вибуху хмари ГПС складається з наступних основних етапів:

- визначення маси горючого газу в хмарі;
- визначення ефективного енергозапасу ГПС в хмарі;
- визначення режиму вибухового перетворення ГПС у хмарі;
- розрахунок максимального надлишкового тиску та імпульсу повітряних вибухових хвиль для різних режимів;
- оцінка вражаючого впливу вибуху хмари ГПС.

Прогнозування наслідків вибуху хмари ГПС. На відкритому технологічному майданчику НПЗ в результаті надзвичайної ситуації з повною розгерметизацією ємності, що містить скраплений пропан, стався викид 8 тонн газу з утворенням хмари ГПС. Для оцінки максимально можливих наслідків НС прийнято, що в хмару перейшло практично вся кількість викинутого скрапленого пропану. Масова концентрація газу в хмарі склала $0,14 \text{ кг/м}^3$, об'єм хмари – близько 57 тис.м^3 . Займання хмари призвело до дефлаграційного вибуху.

НС сталася влітку, в денний час, в ясну безвітряну погоду. На відстані 80 м, 100 м і 135 м від місця вибуху розміщуються споруди та відкриті технологічні установки підприємства.

Потрібно визначити ймовірність їх пошкодження (руйнування) при вибуху хмари ГВП.

Дані для розв'язання задачі:

- | | |
|---|---------|
| • вибухонебезпечна речовина | пропан; |
| • агрегатний стан суміші | газова; |
| • концентрація газу в суміші, c_r , кг/м^3 | 0,14; |
| • маса газу в хмарі, M_r , кг | 8000; |

- питома теплота згоряння газу q_{Γ} , Дж/кг $4,64 \cdot 10^7$;
- навколишній простір відкритий;
- відстані до сусідніх об'єктів, м 80, 100, 135.

Розрахунки будемо виконувати відповідно до рекомендацій [4].

Розрахунок основних параметрів вибуху хмари ГПС. Визначаємо ефективний енергозапас E хмари ГПС

$$E = 2M_{\Gamma} q_{\Gamma} c_{\text{ст}}/c_{\Gamma},$$

де $c_{\text{ст}}$ – стехіометрична концентрація пропану в суміші з повітрям, $c_{\text{ст}} = 0,077$ кг/м³. Отримуємо

$$E = 2M_{\Gamma} q_{\Gamma} c_{\text{ст}}/c_{\Gamma} = 2 \cdot 8000 \cdot 4,64 \cdot 10^7 \cdot 0,077 / 0,14 = 4,1 \cdot 10^{11} \text{ Дж.}$$

Розраховуємо величину швидкості V_{Γ} фронту полум'я при вибуху хмари ГПС

$$V_{\Gamma} = k_1 M_{\Gamma}^{1/6},$$

де k_1 – константа, $k_1 = 43$ [4]. Отримуємо

$$V_{\Gamma} = k_1 M_{\Gamma}^{1/6} = 43 \cdot 8000^{1/6} = 192 \text{ м/с.}$$

Такі параметри відповідають дефлаграційному режиму вибухового перетворення хмари ГПС.

Визначаємо безрозмірні відстані R_{xi} до сусідніх об'єктів за формулою [5]

$$R_{xi} = r_i / (E/P_0)^{1/3},$$

де r_i – відстань до i -го об'єкта, м; P_0 – нормальний атмосферний тиск, $P_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па. Отримуємо

$$\begin{aligned} r_1 = 80 \text{ м,} & \quad R_{x1} = r_1 / (E/P_0)^{1/3} = 80 / (4,1 \cdot 10^{11} / 1,01 \cdot 10^5)^{1/3} = 0,50; \\ r_2 = 100 \text{ м,} & \quad R_{x2} = r_2 / (E/P_0)^{1/3} = 100 / (4,1 \cdot 10^{11} / 1,01 \cdot 10^5)^{1/3} = 0,63; \\ r_3 = 135 \text{ м,} & \quad R_{x3} = r_3 / (E/P_0)^{1/3} = 135 / (4,1 \cdot 10^{11} / 1,01 \cdot 10^5)^{1/3} = 0,85. \end{aligned}$$

Розраховуємо основні параметри вибуху хмари ГПС при швидкості горіння 192 м/с, до яких відносяться параметри повітряних ударних хвиль вибуху – надмірний тиск ΔP і імпульс хвилі тиску I .

1. Визначаємо безрозмірні величини тиску P_{1xi} і імпульсу I_{1xi} для дефлаграційного вибуху за значеннями безрозмірних відстаней R_{xi} , $i = 1, 2, 3$, використовуючи наступні формули [5]

$$P_{xi} = \frac{V_{\Gamma}^2}{C_0^2} \cdot \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left(\frac{0,83}{R_{xi}} - \frac{0,14}{R_{xi}^2} \right);$$

$$I_{xi} = \frac{V_{\Gamma}}{C_0} \cdot \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left(1 - \frac{0,4V_{\Gamma}}{C_0} - \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \left(1 - \frac{0,06}{R_{xi}} + \frac{0,01}{R_{xi}^2} - \frac{0,0025}{R_{xi}^3} \right);$$

де C_0 – швидкість звуку в повітрі; $C_0 = 340$ м/с; σ – ступінь розширення продуктів згорання, для газоповітряних сумішей приймається $\sigma = 7$.

Результати розрахунків зводимо в табл. 1.

2. Для безрозмірних відстаней R_{xi} , $i = 1, 2, 3$, визначаємо величини P_{2xi} і I_{2xi} , які відповідають режиму детонації і для випадку газоповітряної суміші розраховуються за співвідношенням [5]

$$P_{2xi} = \exp(-1,1240 - 1,660 \cdot \ln R_{xi} + 0,2600 \cdot \ln^2 R_{xi});$$

$$I_{2xi} = \exp(-3,4217 - 0,898 \cdot \ln R_{xi} - 0,0096 \cdot \ln^2 R_{xi}).$$

Результати розрахунків зводимо в табл. 1.

3. Визначаємо остаточні значення безрозмірних величин P_{xi} і I_{xi} , $i = 1, 2, 3$, для трьох об'єктів

$$P_{xi} = \min(P_{1xi}, P_{2xi}); \quad I_{xi} = \min(I_{1xi}, I_{2xi}).$$

4. Після визначення безрозмірних величин тиску P_{xi} і імпульсу I_{xi} обчислюємо відповідні їм розмірні величини надлишкового тиску ΔP і імпульсу I в повітряній ударної хвилі на відстанях 80 м, 100 м і 135 м від місця вибуху за формулами [5]

$$\Delta P = P_{xi} \cdot P_0;$$

$$I = I_{xi} \cdot (P_0)^{2/3} \cdot E^{1/3} / C_0.$$

Результати розрахунків зводимо в табл. 1.

Табл. 1. Результати розрахунку основних параметрів вибуху хмари ГПС

i	r_i , м	R_{xi}	Режим вибуху				Надлишковий тиск, ΔP , Па	Імпульс хвилі тиску, I , Па·с
			Дефлаграція		Детонація			
			P_{1xi}	I_{1xi}	P_{2xi}	I_{2xi}		
1	80	0,5	0,35	0,0496	0,85	0,052	$4,4 \cdot 10^4$	$2,84 \cdot 10^4$
2	100	0,63	0,29	0,0427	0,74	0,049	$2,8 \cdot 10^4$	$2,04 \cdot 10^4$
3	135	0,85	0,23	0,0368	0,68	0,041	$1,9 \cdot 10^4$	$1,37 \cdot 10^4$

Використовуючи дані табл. 1, можна виконати оцінку вражаючої дії вибуху хмари ГПС.

Оцінка вражаючого впливу вибуху хмари ГПС. Реальний розподіл простору, в якому діють фактори ураження, на дві частини (одна – зона ураження, інша – зона стійкості) не має чіткої межі. Наближення параметрів вибухової хвилі на межі небезпечної зони викликає наростання ймовірності заданого рівня поразки від 0 до 100%. При перевищенні певної величини надлишкового тиску ΔP і імпульсу I досягається 100% ймовірність поразки. Ця типова особливість діаграм поразки не дозволяє точно оцінити рівень збитку на основі виділення декількох фіксованих зон ураження. Більш точну оцінку дає визначення ймовірності досягнення того чи іншого рівня збитку за допомогою пробіт-функції [6].

Оцінка ймовірності пошкодження промислових будівель і споруд, при яких можливо їх відновлення, визначається пробіт-функцією виду

$$Pr_1 = 5 - 0,26 \ln V_1,$$

де параметр V_1 знаходиться з урахуванням величини надлишкового тиску ΔP і імпульсу I у вибуховій хвилі

$$V_1 = (17500/\Delta P)^{8,4} + (290/I)^{9,3}.$$

Оцінка ймовірності руйнування промислових будівель і споруд, при яких вони підлягають знесенню, визначається пробіт-функцією виду

$$Pr_2 = 5 - 0,22 \ln V_2,$$

де параметр V_2 визначається виразом

$$V_2 = (40000/\Delta P)^{7,4} + (460/I)^{11,3}.$$

Використовуючи отримані величини ΔP та I , знаходимо значення відповідних пробіт-функцій для трьох заданих об'єктів і зводимо результати в табл. 2.

Зв'язок пробіт-функції Pr_1 з ймовірністю $p, \%$, того чи іншого рівня ураження від вибуху хмари ГПС визначається по [5, табл. 3]. Знайдені ймовірності ураження зводимо в табл. 2.

Табл. 2. Результати розрахунку ймовірностей пошкодження або руйнування будівель, споруд та технологічних установок при вибухах хмар ГПС

і	$r_i, \text{ м}$	Пробіт-функція		Ймовірність	
		Pr_1	Pr_2	пошкодження будівлі, %	руйнування будівлі, %
1	80	6,48	4,91	93	47
2	100	6,06	4,47	86	28
3	135	5,84	4,12	80	19

Висновки. Викладена методика дозволяє оцінити наслідки НС з вибухом хмари ГПС, яка стала наслідком аварійного викиду вибухонебезпечного газу з технологічного обладнання НПЗ. Оцінка виконується з урахуванням характеристик горючого газу, режиму вибухового перетворення, параметрів хмари та інформації про навколишній простір.

ЛІТЕРАТУРА

1. НАПБ Б.03.002-2007. Норми визначення категорій приміщень, будівель та зовнішніх установок за вибухопожежній та пожежній небезпеці. – Київ, 2007.
2. Чуб І.А. Прогнозування наслідків можливої надзвичайної ситуації при формуванні програми розвитку територіальних систем техногенної безпеки / І.А. Чуб, В.М. Попов // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2015. – Вип. 22. – С.99-105. [Електронний ресурс]. Режим доступу:<http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol22/Popov.pdf>.
3. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: Сб. документов. Серия 27. – Выпуск 2. – Колл. авт. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 208 с.
4. Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта. Приказ Ростехнадзор 15.07.2013 г. №306 .
5. РД 03-409-01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2014. – 38 с.
6. Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. Т. 1: Пер. с англ. / Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, Ю. Н. Тюрина. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 510 с.

И.А. Чуб, В.В. Матухно

Прогнозирование последствий чрезвычайной ситуации при взрыве облака газо-воздушной смеси

Приведена методика прогнозирования последствий чрезвычайной ситуации при взрыве газо-воздушного облака в условиях нефтеперерабатывающего предприятия. Методика содержит расчет параметров взрыва и оценку вероятности повреждения или разрушения зданий, сооружений и технологических установок.

Ключевые слова: Взрыв, облако газо-воздушной смеси, прогноз последствий.

I.A. Chub, V.V. Matukhno

Predicting the effects of an emergency during the explosion a cloud of gas-air mixture

The technique of predicting the effects of an emergency situation in the explosion of gas-air clouds in a refinery. The methodology includes the calculation of the explosion parameters and evaluating the possibility of damage to or destruction of buildings, structures and technological installations.

Keywords: explosion, a cloud of gas-air mixture, weather effects.