

Чуб І.А.<sup>1</sup>, Новожилова М.В.<sup>2</sup>, Матухно В.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор, начальник кафедри пожежної профілактики в населених пунктах, Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна

<sup>2</sup>Д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри економічної кібернетики та інформаційних технологій, Харківський національний університет будівництва і архітектури, Україна

<sup>3</sup>Ад'юнкт Національного університету цивільного захисту України, м. Харків, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ З ВИБУХОМ ХМАРИ ГАЗОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ

Розглянуто побудову математичної моделі задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку газонафтопереробного підприємства, на якому можливо виникнення надзвичайної ситуації, що супроводжується вибухом хмар газоповітряних сумішей. У якості об'єкту вивчення обрано технологічний блок як групу апаратів із визначеними властивостями. Проведено визначення кількісної оцінки вибухонебезпеки технологічного блоку на основі енергетичного показника. Формалізовано вплив вибуху на певному технологічному апараті на сусіднє обладнання за допомогою вагових функцій, що моделюють нелінійну залежність від особливостей забудови території, а саме відстаней між обладнанням технологічного блоку, режиму вибуху, характеристик вибухонебезпечних речовин. Визначена аналітична залежність величини впливу ударної хвилі на сусідні технологічні об'єкти від взаємної орієнтації цих об'єктів та радіусів зон руйнування. В результаті задача мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку зведена до оптимізаційної задачі розміщення технологічного обладнання блоку, сформована система геометричних обмежень на область припустимих рішень задачі. Проведено аналіз векторного критерію якості задачі розміщення, що розглядається. Використання результатів застосування оптимізаційної задачі розміщення технологічного обладнання блоку дає можливість знизити вибухонебезпеку блоку та є підставою для подальшого дослідження.

**Ключові слова:** вибух, хмара газоповітряної суміші, мінімізація рівня вибухонебезпеки, оптимізаційна задача розміщення

### НОМЕНКЛАТУРА

ГНПЗ – газонафтопереробне підприємство;

ГПС – газоповітряні суміші;

НС – надзвичайна ситуація;

ПНО – потенційно-небезпечні об'єкти.

## **ВСТУП**

Зростаюче в останні роки число надзвичайних ситуацій (НС) на газонафтопереробних підприємствах (ГНПП) свідчить про те, що існуюча структура нормативної бази в галузі техногенної безпеки не дозволяє достовірно оцінити рівень їх небезпеки. Надзвичайні ситуації на цих об'єктах характеризуються великими об'ємами викидів вибухонебезпечних речовин, утворенням хмар газоповітряних сумішей (ГПС), вибухами та пожежами, які приводять до руйнування або пошкодження будівель, споруд, установок.

Науково обґрунтоване ранжування рівнів потенційної небезпеки технологічних установок необхідно для вирішення проблем забезпечення безпеки на всіх стадіях життєвого циклу підприємства. Діюча нормативна база в Україні містить не всі необхідні практичні рекомендації щодо визначення рівня та забезпечення вибухобезпеки об'єктів газонафтопереробки. При цьому слід відмітити складність та трудомісткість методик, відсутність статистичних даних, що дають кількісну оцінку рівню вибухонебезпеки технологічного обладнання та методики їх аналізу.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває задача розробки ефективних методів кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки об'єктів газонафтопереробної галузі та методів його зниження на основі комплексного аналізу кількісних характеристик надзвичайних ситуацій з вибухами хмар газоповітряних сумішей.

## **1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ**

Основною структурною одиницею будь-якого ГНПП є технологічний блок. В роботі [1] під технологічним блоком розуміють групу апаратів (технологічного обладнання), які можуть бути відключені (ізолювані) від технологічної системи підприємства (виведені з технологічної схеми) без небезпечних змін режиму роботи суміжного технологічного обладнання. Таким чином, рівень вибухонебезпеки підприємства в цілому є адитивною функцією від рівнів вибухонебезпеки окремих технологічних блоків.

*Метою статті* є побудова та аналіз математичної моделі задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП, на якому можливі вибухи хмар газоповітряних сумішей, з урахуванням особливостей забудови території, режиму вибуху, характеристик вибухонебезпечних речовин тощо.

## **2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ**

Аналізу фізичних процесів, що відбуваються при вибухах хмар ГПС, які утворилися при руйнуванні технологічного обладнання, та їх впливу на навколишнє середовище присвячено багато робіт вітчизняних та закордонних дослідників [2-7].

Роботи [2, 3] містять результати математичного моделювання вибухів хмар

газоповітряних та пароповітряних сумішей. У теорії вибуху розрізняють детонаційний та дефлаграційний механізми вибухового перетворення. Перший з них – це вибух, при якому запалення наступних шарів вибухової речовини відбувається в результаті стиснення і нагрівання ударною хвилею, такою, що ударна хвиля і зона хімічної реакції йдуть нерозривно одна за одною з постійною надзвуковою швидкістю. Дефлаграційним є вибух з енерговиділенням в об'ємі хмари горючих газоподібних сумішей і аерозолів при поширенні екзотермічної хімічної реакції з дозвуковою швидкістю.

У роботах [4-7] розглядаються питання визначення кількісних характеристик детонаційних та дефлаграційних вибухів вуглеводневих газів та їх сумішей з повітрям в умовах відкритого простору.

Питання аналізу наслідків цих вибухів ГПС у відкритому просторі досліджені меншою мірою. В Україні на даний час відсутній єдиний підхід до прогнозування можливих наслідків вибуху хмар ГПС на об'єктах газонафтопереробки. Вітчизняний нормативний документ [8] містить методику визначення параметрів вибуху хмари ГПС, яка виникла при НС з викидом вибухонебезпечної речовини в результаті розгерметизації устаткування. Але дана методика не враховує склад вибухонебезпечної суміші та режим її вибуху.

Закордонні джерела [9, 10] при визначенні наслідків вибуху рекомендують розглядати детонаційний режим. Але за статистичними даними до 90% вибухів хмар ГПС відбувається за дефлаграційним механізмом.

У роботі [11] розглядаються питання надійності технологічного обладнання потенційно-небезпечних об'єктів (ПНО) та дається аналіз причин виникнення НС, пов'язаних з відмовами технологічного обладнання.

Низка робіт [12-14] присвячена розробці теоретичних засад та методологічного забезпечення оптимізації розміщення технологічного обладнання та інших джерел вибухо- та пожежонебезпеки для зниження рівня техногенної небезпеки ПНО. У роботі [13] пропонується методика підвищення вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП при вибухах хмар ГПС шляхом моделювання раціонального розміщення обладнання. Проте її застосування при розгляді реальних НС обмежене відсутністю врахування дрейфу хмари ГПС під дією вітру в умовах забудови технологічної площадки блоку.

Аналіз рівня вибухонебезпеки технологічного блоку в умовах НС з викидами хмар ГПС та розробка методу її зниження передбачає визначення критерію  $\Lambda$  кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки блоку [1]. При цьому критерій  $\Lambda$  є інтегральним, побудова якого виконується на базі часткових критеріїв  $\Lambda_i$ , що кількісно характеризують рівні вибухонебезпеки технологічного обладнання (апаратів) різних типів у складі блоку.

У зв'язку з цим при структурній та параметричній ідентифікації часткових критеріїв

$\Lambda_i$  та обмежень задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП, що розглядається, є доцільним урахування особливостей забудови території, режиму вибуху, характеристик вибухонебезпечних речовин.

### 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Проведемо визначення кількісної оцінки вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП. Покладемо, що технологічний блок, що є об'єктом дослідження, містить  $I$  одиниць технологічного обладнання (апаратів).

Приймаємо, що кожна  $i$ -а одиниця технологічного обладнання (апарату) технологічного блоку ГНПП, що розглядається у даному дослідженні, може бути п'яти типів ( $n = 1, 2, \dots, 5$ ) – колонне ( $n=1$ ), ємнісне ( $n=2$ ), насосне ( $n=3$ ), теплообмінне ( $n=4$ ) та пічне ( $n=5$ ), рівень небезпеки яких є різним. Це обумовлено особливостями технології, кількістю та видом вибухонебезпечних речовин тощо.

Вважаємо також, що технологічний блок працює в штатному режимі, якщо усе обладнання справне, а режим НС настає при виході з ладу (повному руйнуванні) хоча б одного апарата, що супроводжується викидом всього вмісту вибухонебезпечної речовини.

В загальному випадку руйнування технологічного апарата супроводжується НС трьох видів: пожежа, вибух, викид.

Нехай  $\Lambda_i$  – частковий критерій, що кількісно характеризує рівень вибухонебезпеки  $i$ -го технологічного обладнання (апарата),  $i=1, 2, \dots, I$ . Для його визначення пропонується застосування енергетичного показнику вибухонебезпеки за наступною формулою [15]:

$$\Lambda_i = E^i \cdot Q_{\text{НС}}^{\text{in}} \cdot Q_{\text{В}}^{\text{in}} \cdot q_{iv}, \quad n \in \{1, 2, \dots, 5\}, \quad v \in \{1, 2\}, \quad (1)$$

де  $E^i$  – відносний енергетичний потенціал  $i$ -го технологічного обладнання (апарата), що не залежить від типу обладнання;  $Q_{\text{НС}}^{\text{in}}$  – ймовірність виникнення НС, яка супроводжується викидом та виникненням хмари ГПС, на  $i$ -му технологічному обладнанні (апараті)  $n$ -го типу;  $Q_{\text{В}}^{\text{in}}$  – ймовірність вибухового перетворення хмари ГПС, яка виникла при НС на  $i$ -му технологічному обладнанні (апараті)  $n$ -го типу,  $q_{iv}$  – ймовірність реалізації сценарію вибухового перетворення.

У цьому випадку ймовірність виникнення НС визначається в результаті обробки статистичних даних щодо розподілу аварій вказаного характеру для технологічних апаратів одного типу, які функціонують у приблизно однакових умовах. У табл. 1 наведені усереднені дані по надійності технологічного обладнання двох блоків ГНПП: абсорбційної газофракціонуючої установки (АГФУ) та електрознесолювальної установки (ЕЛЗУ).

Таблиця 1 – Оцінка ймовірності виникнення НС з викидом вибухонебезпечної хімічної речовини на обладнанні ГНПП в залежності від типу n

Номер обладнання, n	Тип обладнання	$\cdot Q_{НС}^{in}$ , рік <sup>-1</sup>	
		АГФУ	ЕЛЗУ
1	Теплообмінне	$1.02 \cdot 10^{-4}$	$1.92 \cdot 10^{-4}$
2	Ємнісне	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$1.18 \cdot 10^{-4}$
3	Колонне	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$1.23 \cdot 10^{-4}$
4	Пічне	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$1.81 \cdot 10^{-4}$
5	Насосне	$1.88 \cdot 10^{-4}$	$2.4 \cdot 10^{-4}$

Основну небезпеку при НС на технологічному обладнанні ГНПП являють викиди стислих або скраплених вуглеводних газів. Як показують статистичні дослідження, при миттєвих викидах вуглеводнів горіння та вибух відбуваються практично завжди [15, 16].

У якості приклада в табл. 2 наведено оцінку ймовірності різних сценаріїв розвитку НС з викидом стислого вуглеводневого газу при руйнуванні обладнання колонного типу блоку АГФУ (n=1, k=2) у порівнянні з іншими типами НС.

Таблиця 2 – Оцінка ймовірності розвитку НС з викидом стислого вуглеводневого газу при руйнуванні обладнання колонного типу блоку АГФУ

Вид НС, k	Ймовірність вибухового перетворення, $Q_B^{in}$	Сценарій розвитку НС, j	$Q_{iv}$
<b>Вибух (k=1)</b>	<b>0.265</b>	<b>Детонаційний вибух</b>	<b>0.0638</b>
		<b>Дефлаграційний вибух</b>	<b>0.9362</b>
Пожежа (k=2)	0.7058	Горіння проливу	0.0407
		Вогняна куля	0.8770
		Факельне горіння	0.0823
Викид (k=3)	0.0292	Без горіння та вибуху	1.00

Останній стовпчик табл. 2 містить ймовірності  $Q_{iv}$  виникнення при реалізації НС визначених типів того чи іншого сценарію розвитку НС на i-му обладнанні колонного типу.

Таким чином, для обладнання колонного типу блока АГФУ ймовірність  $Q_{НС}^1$  вибухового перетворення хмари ГПС, яка виникла при НС з викидом стислого вуглеводневого газу дорівнює  $Q_{НС}^1 = 0.265$ . При цьому, наприклад, ймовірності  $q_{1v}$ , які визначають ймовірність протікання вибуху за детонаційним ( $q_{11}$ ) або дефлаграційним ( $q_{12}$ ) механізмом, дорівнюють 0.0638 та 0.9362 відповідно.

У частині статті, що залишилася, зосередимось на першому типі НС (табл. 2), опускаючи індекс  $k$ .

Інтегральний критерій  $\Lambda$ , який характеризує вибухонебезпеку технологічного блоку в цілому, має вигляд [1, 15]:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i \Lambda_i, \quad (2)$$

де  $\lambda_i$  – вагова функція  $i$ -го технологічного обладнання (апарату).

Вагові функції  $\lambda_i$  моделюють ступінь вплив вибуху на  $i$ -му технологічному апараті на сусіднє обладнання та визначаються як [1]

$$\lambda_i = 1 + \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} k_{ij} \Lambda_j, \quad (3)$$

де  $J$  – кількість одиниць технологічного обладнання (апаратів), яке було повністю зруйновано або пошкоджено в результаті вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні;  $k_{ij}$  – коефіцієнт, який залежить від ступеню пошкодження  $j$ -го технологічного обладнання (апарата) від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні;  $\alpha_{ij}$  – коефіцієнт, що враховує ступінь впливу ударної хвилі від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні, на інші технологічні апарати.

Коефіцієнти  $k_{ij}$  визначаються наступним чином:

$$k_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } L_{ij} \leq R_i^{100}, \\ p_{ij}, & \text{якщо } R_i^0 \geq L_{ij} \geq R_i^{100}, \\ 0, & \text{якщо } L_{ij} \geq R_i^0, \end{cases} \quad (4)$$

де  $L_{ij}$  – відстань між центром  $j$ -го технологічного обладнання (апарата) та центром вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні;  $R_i^{100}$  – радіус зони повних (100%) руйнувань від вибуху хмари ГПС;  $R_i^0$  – радіус безпечної зони від вибуху хмари ГПС;  $p_{ij}$  – ймовірність повного руйнування  $j$ -го технологічного обладнання (апарата) від вибуху хмари ГПС при НС на  $i$ -му обладнанні, яка визначається за допомогою пробіт-функції [1].

Відмітимо, що узагальнено ймовірність  $p_{ij}$  є оберненою нелінійною функцією відстані  $L_{ij}$  між об'єктами  $i$  та  $j$ .

Коефіцієнт  $\alpha_{ij}$  впливу ударної хвилі на сусідні технологічні об'єкти, величина якого залежить від взаємної орієнтації об'єктів  $i$  та  $j$ , обчислюються з наступних міркувань:

1). Для об'єктів у формі паралелепіпеду

- найбільш небезпечній орієнтації стіни  $j$ -го об'єкту по нормалі до напрямку розповсюдження ударної хвилі вибуху на  $i$ -му об'єкті відповідає найбільше значення  $\alpha_{ij}^{\max} = 1.1$ . Таке ж значення  $\alpha_{ij}$  буде відповідати куту  $\theta = 0$ , тому що при цьому суміжна стіна буде орієнтована по нормалі до напрямку розповсюдження ударної хвилі вибуху;

- найбільш безпечній орієнтації стіни  $j$ -го об'єкту під кутом  $45^\circ$  до напрямку розповсюдження ударної хвилі вибуху на  $i$ -му об'єкті відповідає найменше значення  $\alpha_{ij}^{\min} = 0.9$ ;

- для інших значень кута  $\theta$  величина  $\alpha_{ij}$  має проміжні значення.

2). Для об'єктів сферичної та циліндричної форми

- значення коефіцієнту  $\alpha_{ij}$  не залежить від кута  $\theta$  та дорівнює  $\alpha_{ij} = 1.0$ .

Для кількісного визначення величини коефіцієнтів  $\alpha_{ij}$  у першому випадку пропонується застосування або тригонометричної залежності

$$\alpha_{ij}(\theta) = 2.1 - (\sin\theta + \cos\theta) + 0.22\sin(2\theta), \quad (5)$$

або поліноміальної залежності

$$\alpha_{ij}(\theta) = 0.0001 \theta^2 - 0.0078 \theta + 1.114. \quad (6)$$

У остаточному вигляді вираз (2) запишеться як

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \Lambda_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} k_{ij} \Lambda_j. \quad (7)$$

Аналіз (7) свідчить, що для визначення критеріїв  $\Lambda_i$  та  $\Lambda$  необхідно розрахувати параметри вибуху хмари ГПС, що утворилася при НС на  $i$ -му технологічному обладнанні.

**Розрахунок основних параметрів вибуху.** Для визначення множини  $k_{ij}$  необхідно знайти радіуси  $R_i^{100}$  зони повних руйнувань та  $R_i^0$  безпечної зони від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні. Як свідчить (4), для  $j$ -го технологічного обладнання, що знаходиться від епіцентру вибуху хмари ГПС на відстані  $L_{ij}$ , яке задовольняє умові

$R_i^0 \geq L_{ij} \geq R_i^{100}$ , значення  $k_{ij}$  обчислюється на основі параметрів вибуху та відстані  $L_{ij}$  з використанням пробіт-функції:

$$k_{ij} = p_{ij} = f [Pr_2(\Delta P, I, L_{ij})], \quad (8)$$

де  $\Delta P$  – надмірний тиск у фронті вибуху, Па;  $I$  – імпульс хвилі тиску вибуху, Па·с;  $Pr_2$  – пробіт-функція, яка визначає оцінку ймовірності повного руйнування промислових будівель і споруд від вибуху [1].

Розрахунок основних параметрів вибуху  $\Delta P$  та  $I$  хмари ГПС проведемо відповідно до рекомендацій [9, 10, 17]. Розрахунок виконується у наступній послідовності.

1). *Визначення ефективного енергетичного запасу  $E_i$  (Дж) хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні:*

$$E_i = 2M_{Гі} q_{Гі}, \quad \text{якщо } c_{стi} \geq c_{Гі}, \quad (9)$$

$$E_i = 2M_{Гі} q_{Гі} c_{ст}/c_{Гі}, \quad \text{якщо } c_{стi} < c_{Гі}, \quad (10)$$

де  $M_{Гі}$  – маса горючої речовини у хмарі, яка бере участь у вибуху, кг;  $q_{Гі}$  – питома теплота згорання горючої речовини, Дж·кг<sup>-1</sup>;  $c_{Гі}$  – середня концентрація горючої речовини у хмарі, кг·м<sup>-3</sup>;  $c_{стi}$  – стехіометрична концентрація горючої речовини в суміші з повітрям, кг·м<sup>-3</sup>.

Величина  $M_{Гі}$  може задаватися у якості початкового параметра, або визначається згідно з [9] як

$$M_{Гі} = \frac{1}{3} \iiint_{V_B} c_{Гі}(x, y, z, t) dx dy dz, \quad (11)$$

де  $V_B$  – об'єм хмари ГПС, який вибухає, м<sup>3</sup>;  $c_{Гі}(x, y, z, t)$  – функція розподілу концентрації горючої речовини в об'ємі хмари ГПС, який вибухає;  $t$  – час від початку НС (виникнення хмари ГПС) до вибуху, с.

Об'єм  $V_{iB}$  хмари, де можливе займання і горіння (вибух) горючої речовини, є область в просторі, що обмежена поверхнями  $S_{Ві}$  та  $S_{Ні}$ , на яких досягаються концентрації газоподібної горючої речовини  $c_{вкмрпi}$  та  $c_{нкмрпi}$ , де  $c_{вкмрпi}$ ,  $c_{нкмрпi}$  – відповідно верхня та нижня концентраційні межі розповсюдження полум'я.

2). *Розрахунок швидкості фронту полум'я  $v_{Гі}$  (м/с) при вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му обладнанні, проводиться згідно рекомендацій [9, табл. 2] в залежності від класу горючої речовини та рівня забудови оточуючого простору.*

3). *Визначення безрозмірних відстаней  $R_{ji}$  (м) від центру хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му технологічному обладнанню, до сусідніх об'єктів:*

$$R_{ji} = r_{ji} / (E_i / P_0)^{1/3}, \quad (12)$$

де  $r_{ji}$  – відстань від центру хмари ГПС, що вибухає, до  $j$ -го об'єкта, м;  $P_0$  – нормальний атмосферний тиск,  $P_0 = 1.01 \cdot 10^5$  Па.

Центр хмари ГПС (епіцентр вибуху) визначається як точка у середині відрізка, що з'єднує джерело викиду ( $i$ -те технологічне обладнання) з найбільш віддаленою точкою хмари, в якій спостерігається концентрація горючої речовини  $c_{\text{нкмрлі}}$ .

4). *Розрахунок основних параметрів вибуху* хмари ГПС, до яких відносяться параметри повітряних ударних хвиль вибуху – надмірний тиск  $\Delta P$  і імпульс хвилі тиску  $I$ :

- визначення безрозмірних величин тиску  $P_{1ji}$  і імпульсу  $i_{1ji}$  для дефлаграційного вибуху для всіх об'єктів ( $j = 1, 2, \dots, N-1; j \neq i$ ):

$$P_{1ji} = \frac{v_r^2}{v_{3B}^2} \cdot \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left( \frac{0,83}{R_{ji}} - \frac{0,14}{R_{ji}^2} \right), \quad (13)$$

$$i_{1ji} = \frac{v_r}{v_{3B}} \cdot \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left( 1 - \frac{0,4v_r}{v_{3B}} - \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \left( 1 - \frac{0,06}{R_{ji}} + \frac{0,01}{R_{ji}^2} - \frac{0,0025}{R_{ji}^3} \right), \quad (14)$$

де  $v_{3B}$  – швидкість звуку в повітрі,  $v_{3B} = 340$  м/с;  $\sigma$  – ступінь розширення продуктів згорання, для газоповітряних сумішей  $\sigma = 7$ .

- визначення безрозмірних величин тиску  $P_{2ji}$  і імпульсу  $i_{2ji}$  для детонаційного вибуху для всіх об'єктів ( $j = 1, 2, \dots, N-1; j \neq i$ ):

$$P_{2ji} = \exp(-1,1240 - 1,660 \cdot \ln R_{ji} + 0,2600 \cdot \ln^2 R_{ji}), \quad (15)$$

$$i_{2ji} = \exp(-3,4217 - 0,898 \cdot \ln R_{ji} - 0,0096 \cdot \ln^2 R_{ji}). \quad (16)$$

- визначення остаточних безрозмірних величин тиску  $P_{ji}$  і імпульсу  $I_{ji}$  для всіх об'єктів ( $j = 1, 2, \dots, N-1; j \neq i$ ):

$$P_{ji} = \min(P_{1ji}, P_{2ji}); \quad i_{ji} = \min(i_{1ji}, i_{2ji}). \quad (17)$$

- визначення розмірних величин надлишкового тиску  $\Delta P_{ij}$  (Па) і імпульсу  $I_{ij}$  (Па·с) в повітряній ударній хвилі для всіх об'єктів:

$$\Delta P_{ij} = P_{ij} \cdot P_0, \quad (18)$$

$$I_{ij} = \frac{i_{ij}}{v_{3B}} \cdot P_0^{2/3} E^{1/3}. \quad (19)$$

5). *Розрахунок параметрів зон ураження*, до яких відносяться величини радіусів

$R_i^{100}$  зони повних руйнувань та  $R_i^0$  безпечної зони. Згідно рекомендацій [9, 10] для обчислення радіусів зон ураження можливо використання формули

$$R_i = \frac{KW_i^{1/3}}{\left(1 + \left(\frac{3180}{W_i}\right)^2\right)^{1/6}}, \quad (20)$$

де  $W_i$  – тротиловий еквівалент вибуху хмари ГПС, кг;  $K$  – певний коефіцієнт.

Для більш точного визначення величини коефіцієнта  $K$  по даним [9, табл. 5] будується функціональний зв'язок  $K = F(\Delta P_{ij})$  у діапазоні зміни надлишкового тиску вибуху  $2\text{кПа} \leq \Delta P_{ij} \leq 100\text{кПа}$  від границі безпечної зони до границі зони повних руйнувань.

Коефіцієнт  $K$  для границі зони повних руйнувань має значення  $K^{100} = 3.8$ , для границі безпечної зони –  $K^0 = 28$ .

Тротиловий еквівалент вибуху хмари ГПС визначається як

$$W_i = \frac{0.4q_X}{0.9q_T} M_X, \quad (21)$$

где  $q_T$  – питома енергія вибуху ТНТ,  $q_T = 1.52 \cdot 10^{-6}$  Дж·кг<sup>-1</sup>.

Для об'єктів, відстані до яких від епіцентру вибуху хмари ГПС задовольняють умовам  $R_i^0 \geq L_{ij} \geq R_i^{100}$ , обчислюються ймовірності  $p_{ij}$  повного руйнування промислових споруд і технологічного обладнання із застосуванням пробіт-функції (10).

Згідно [9], пробіт-функція  $Pr_2$ , яка відповідає повному руйнуванню будівель та зовнішнього технологічного обладнання (залишки підлягають зносу) визначається як

$$Pr_2 = 5 - 0,22 \ln V_2. \quad (22)$$

Фактор  $V_2$  розраховується за формулою:

$$V_2 = (40000/\Delta P_{ij})^{7,4} + (460/I_{ij})^{11,3}. \quad (23)$$

Після визначення пробіт-функції, згідно з [9, табл. 3] знаходиться ймовірність  $p_{ij}$ .

Оптимізаційна задача мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку має вигляд:

$$\text{знайти} \quad \min_W \Lambda = \min_W \left( \sum_{i=1}^N \Lambda_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} k_{ij} \Lambda_j \right), \quad (25)$$

де  $W$  – область допустимих рішень задачі, яка формується системою геометричних

обмежень [18], що містить

- умови взаємного неперетину зон  $T_i$ , які зайняті  $i$ -м технологічним обладнанням

$$\text{int } T_i \cap \text{int } T_j = \emptyset, \quad i, j = \overline{1, N}, \quad i \neq j, \quad (26)$$

де  $\text{int } T_i$  – множина внутрішніх точок зони  $T_i$   $i$ -го технологічного обладнання;

- умови неперетину зон, які зайняті технологічним обладнанням, з зонами, де розміщення обладнання є неприпустимим

$$\text{int } T_i \cap \text{int } Z_j = \emptyset, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (27)$$

де  $Z_j$  – зони, де розміщення обладнання є неприпустимим (зони заборони);

- обмеженнями на максимально допустимі відстані між технологічним обладнанням блоку

$$(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \leq r_{ij}, \quad (28)$$

$$(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2 = r_{mn}, \quad (29)$$

де  $r_{ij}$ ,  $r_{mn}$  – максимально допустимі відстані між технологічним обладнанням блоку;  $(x_k, y_k)$  – координати центру технологічного обладнання – довільної точки в межах зони  $T_k$ , зайнятої  $k$ -м технологічним обладнанням, яка є центром його власної системи координат.

Наявність в системі обмежень задачі обмежень-рівностей (29) обумовлена неможливістю у деяких випадках зміни відстаней між технологічним обладнанням блоку.

Аналіз функції мети (7) оптимізаційної задачі (25) свідчить, що в якості змінних параметрів, від яких залежить величина  $\Lambda$ , виступають часткові критерії  $\Lambda_i$ , а також коефіцієнти  $k_{ij}$  та  $\alpha_{ij}$ .

1). Зменшення величин часткових критеріїв  $\Lambda_i$  можливо виконати:

- за рахунок зменшення потужності вибуху хмари ГПС.

Потужність вибуху хмари ГПС пропорційна  $M_i$  – масі горючої речовини у хмарі, яка бере участь у вибуху. При дрейфі хмари під дією вітру відбувається її розсіювання в результаті процесу атмосферної дифузії [17]. При цьому зменшується концентрація горючої речовини та, як результат, її кількість в області, яка обмежена поверхнею  $s_{\text{нкмрп}}$ . Таким чином,  $M_i$  залежить від швидкості та напрямку вітру, тому її зменшення може бути досягнуто відповідною орієнтацією технологічного блоку до найбільш ймовірних напрямів вітру.

2). Зменшення коефіцієнтів  $k_{ij}$  можливо виконати:

- за рахунок зниження ймовірностей  $p_{ij}$ .

Згідно (4), для цього необхідно збільшення відстані між епіцентром вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на  $i$ -му технологічному обладнанні, та сусідніми технологічними апаратами блоку;

- *за рахунок зменшення потужності вибуху хмари ГПС.*

Це може бути досягнуто відповідною орієнтацією технологічного блоку до найбільш ймовірних напрямів вітру.

Найбільшого зменшення потребують ті коефіцієнти, які відповідають технологічному обладнанню (апаратам) з максимальним значенням часткових критеріїв  $\Lambda_i$ .

3). Зменшення коефіцієнтів  $\alpha_{ij}$  можливо виконати:

- *за рахунок зменшення впливу ударної хвилі вибуху на сусідні технологічні апарати блоку.*

Для цього необхідно належним чином зорієнтувати споруди та технологічне обладнання до епіцентру вибуху.

Таким чином, оптимізаційна задача (8) мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку є еквівалентною до задачі пошуку оптимального розміщення технологічного обладнання блоку.

**Висновки.** Побудовано математичну модель задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку НПЗ в умовах надзвичайної ситуації з викидом вибухонебезпечної речовини, утворенням хмари газоповітряної суміші та її вибуховим перетворенням. Показано, що сформульована задача зводиться до задачі оптимізації розміщення технологічних апаратів з урахуванням обмежень на максимально допустимі відстані між складовими блоку.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Чуб І.А. Модель задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки об'єктів з вибухами хмар газоповітряних сумішей / І.А. Чуб, В.В. Матухно // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2016. – Вип. 24. – С.137-142.
2. Чернай А.В. Математичне моделювання вимушеного запалювання газоповітряної суміші при розрахунку вражаючих факторів аварійних вибухів / А.В. Чернай, М.М. Налісько // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2016. – №5. – С. 82-94.
3. Van den Berg A.C. Vapor cloud explosion blast modeling / A.C. Van den Berg, C.J.M. Van Wingerden. // ICHEME Symposium Series. – 1994. – No. 124. – P. 393-409.
4. Methods for the Calculation of the Physical Effects. – Gevaarlijke Stoffen, 1996. – 870 p.
5. Brossard J. Overpressure imposed by blast wave / J. Brossard, P. Bailly, D. Desbordes // Progress in Astronautics and Aeronautics. – 1989. – Vol. 4. – P. 410.
6. Giesbrecht H. Analysis of explosion hazards on spontaneous release of inflammable cases

- / Н. Giesbrecht, G. Hemmer, K. Hess // Ger. Chem. Eng. – 1984. – No.4. – P. 315-325.
7. Lee J.H. Blast effects from vapor cloud explosion / J.H. Lee, C.V. Guirao, G.G. Bach // Loss prevention. – 1989. – Vol. 11. – No.1. – P. 59-70.
8. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – Київ: УкрНДІЦЗ, 2016. – 42 с.
9. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 208 с.
10. РД 03-409-01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2014. – 38 с.
11. Попов В.М. Моделирование характеристик потока отказов основных производственных фондов объектов повышенной опасности / В.М. Попов, И.А. Чуб, М.В. Новожилова // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2015. – Вип. 21. – С. 64-70.
12. Ковалев Е.М. Оптимизация расположения оборудования опасных производственных объектов нефтеперерабатывающей промышленности / Е.М. Ковалев, Р.Р. Тляшева // Мировое сообщество: проблемы и пути решения: – 2005. – С. 176-180.
13. Чуб И.А. Размещение объектов техногенной опасности с минимизацией уровня воздействия возможной чрезвычайной ситуации / И.А. Чуб, Е.В. Морщ, А.О. Труш, С.В. Ковальский // Проблеми пожарной безопасности. – 2004. – Вып. 16. – С. 248–251.
14. Чуб И.А. Решение задачи распределения ресурсов проекта как оптимизационной задачи размещения геометрических объектов с изменяемыми метрическими характеристиками / И.А. Чуб, А.С. Иванюков, М.В. Новожилова // Проблеми машиностроения. – 2010. – Т. 3. – № 5–6. – С. 79–90.
15. Чуб І.А. Прогнозування наслідків надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші / І.А. Чуб, В.В. Матухно // Проблеми надзвичайних ситуацій.– 2016. – Вип. 23. – С.186-191.
16. Шебеко Ю.Н. Оценка индивидуального и социального риска аварий с пожарами и взрывами для наружных технологических установок / Ю.Н. Шебеко, А.П. Шевчук, В.А. Колосов // Пожаровзрывобезопасность. – 1995. – № 1. – С. 21 – 29.
17. Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2012. – 46 с.
18. Чуб И.А. Построение системы геометрических ограничений в задачах оптимизации размещения пожаровзрывоопасных объектов / И.А. Чуб // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – 2007. – Вип 16. – С. 125–132.

Чуб И.А.<sup>1</sup>, Новожилова М.В.<sup>2</sup>, Матухно В.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой пожарной профилактики в населенных пунктах, Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков, Украина

<sup>2</sup>Д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой экономической кибернетики и информационных технологий, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина

<sup>3</sup>Адъюнкт Национального университета гражданской защиты Украины, г. Харьков, Украина

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ СО ВЗРЫВОМ ОБЛАКА ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ**

Рассмотрено построение математической модели задачи минимизации уровня взрывоопасности технологического блока газонефтеперерабатывающего предприятия, на котором возможно возникновение чрезвычайной ситуации, сопровождающееся взрывом облаков газозвушных смесей. В качестве объекта изучения рассматривается технологический блок как группа аппаратов с определенными свойствами. Проведено определение количественной оценки взрывоопасности технологического блока на основе энергетического показателя. Формализовано влияние взрыва на определенном технологическом аппарате на соседнее оборудование с помощью весовых функций, моделирующих нелинейную зависимость от особенностей застройки территории, а именно расстояний между компонентами оборудования технологического блока, режима взрыва, характеристик взрывоопасных веществ. Определена аналитическая зависимость величины воздействия ударной волны на соседние технологические объекты от взаимной ориентации этих объектов и радиусов зон разрушения. В результате задача минимизации уровня взрывоопасности технологического блока сведена к оптимизационной задаче размещения технологического оборудования блока, сформирована система геометрических ограничений на область допустимых решений задачи. Проведен анализ векторного критерия качества рассматриваемой задачи размещения. Использование результатов применения оптимизационной задачи размещения технологического оборудования блока позволяет снизить взрывоопасность блока и является основанием для дальнейшего исследования.

Ключевые слова: взрыв, облако газозвушной смеси, минимизация уровня взрывоопасности, оптимизационная задача размещения

Chub I.A.<sup>1</sup>, Novozhylva M.V.<sup>2</sup>, Matuhno V.V.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dr. of Sci., Professor, Head of the Department of Fire Prevention in the Settlements, National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkov, Ukraine

<sup>2</sup>Dr. of Sci., Professor, Head of the Department of Economic Cybernetics and Information Technologies, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine

<sup>3</sup>Adjunct, National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkov, Ukraine

## **DEFINITION OF EMERGENCY PARAMETERS WITH THE EXPLOSION OF GAS-AIR MIXTURE CLOUD**

A mathematical model for the problem of minimizing explosion level for technological unit belonging to gas-oil reprocessing enterprise, which may cause an emergency situation being accompanied by clouds of gas-air mixture explosion, has been constructed. As the object of study technological unit presented with the group of devices having specific properties has been considered. An quantitative assessment of unit explosion based on the energy index is presented. The impact of the explosion on a particular unit to a nearby equipment using weighting functions, that are nonlinear dependence of the characteristics of territory, namely the distance between the components of equipment, as well as explosion mode and the characteristics of hazardous substances has been formalized. As a result, the problem of minimizing explosion level for unit is reduced to placement optimization problem and system of geometric constraints on the problem feasible region is formed. The analysis of vector quality location problem criterion is considered. Using the results of placement optimization problem for technological equipment would reduce the explosiveness of the unit and can be the basis for further research.

**Keywords:** explosion, a cloud of gas-air mixture, to minimize the explosion level, placement optimization problem

## **REFERENCES**

1. Chub I.A., Matuhno V.V. Model zadachi minimizacii rivnja vibuhonebezpeki ob'ektiv z vybuhamy hmar gazopovitrjanyh sumishej, *Problemi nadzvichainix situacii*, 2016, Vol. 24, pp. 137-142.

2. Chernaj A.V., Nalys'ko M.M. Matematychni modeljuvannja vymushenogo zapaljuvannja gazopovitrjanoi' sumishi pry rozrahunku vrazhajuchykh faktoriv avarijnyh vybuhiv, *Naukovyj visnyk Nacional'nogo girnychogo universytetu*, 2016, №5, pp. 82-94.

3. Van den Berg A.C., Van Wingerden C.J.M. Vapor cloud explosion blast modeling. *ICHEME Symposium Series*, 1994, № 124, pp. 393-409.

4. Methods for the Calculation of the Physical Effects. – Gevaarlijke Stoffen, 1996. – 870 p.

5. Brossard J., Bailly P., Desbordes D. Overpressure imposed by blast wave, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 1989, Vol. 4, pp. 410.
6. Giesbrecht H., Hemmer G., Hess K. et al. Analysis of explosion hazards on spontaneous release of inflammable cases, *Ger. Chem. Eng.*, 1984, № 4, p. 315-325.
7. Lee J.H., Guirao C.V., Bach G.G. Blast effects from vapor cloud explosion, *Loss prevention*, 1989, Vol. 11, № 1, pp. 59-70.
8. DSTU B V.1.1-36:2016. Vyznachennja kategorij prymishhen', budynkiv ta zovnishnih ustanovok za vybuhopozhezhnoju ta pozhezhnoju nebezpekoju. – Kyi'v: UkrNDICZ, 2016, 42 p.
9. Metodiki ocenki posledstvij avarij na opasnyh proizvodstvennyh ob'ektah: Sb. dokumentov. Serija 27. Vypusk 2 / Koll. avt. – M.: ZAO NTC PB, 2010. – 208 p.
10. RD 03-409-01. Metodika ocenki posledstvij avarijnyh vzryvov toplivno-vozdushnyh smesej. – M.: ZAO NTC PB, 2014. – 38 p.
11. Popov V.M., Chub I.A., Novozhylova M.V. Modelirovanie harakteristik potoka otkazov osnovnyh proizvodstvennyh fondov ob'ektov povyshennoj opasnosti, *Problemi nadzvichainix situacii*, 2015, Vol. 21, p. 64-70.
12. Kovalev E.M. Tljasheva P.P. Optimizacija raspolozhenija oborudovanija opasnyh proizvodstvennyh ob'ektov neftepererabatyvajushhej promyshlennosti, *Mirovoe soobshhestvo: problemy i puti reshenija*, 2005, C. 176-180.
13. Chub I.A., Morsh E.V., Trush A.O., Koval'skiy S.V. Razmeshhenie ob'ektov tehnogennoj opasnosti s minimizaciej urovnja vozdejstviya vozmozhnoj chrezvyčajnoj situacii, *Problemi pozharnoj bezopasnosti*, 2004, Vol. 16, p. 248–251.
14. Chub I.A., Ivanilov A.S., Novozhylova M.V. Reshenie zadachi raspredelenija resursov proekta kak optimizacionnoj zadachi razmeshhenija geometricheskikh ob'ektov s izmenjaemyimi metriceskimi harakteristikami, *Problemi mashinostroenia*, 2010, Vol. 3, № 5–6, p. 79–90.
15. Chub I.A., Matuhno V.V. Prognozuvanna naslidkiv nadzvichainoi situacii z vibuhom xmaru gazopovitranoi sumichi, *Problemi nadzvichainix situacii*, 2016, Vol. 23, pp. 186-191.
16. Shebeko U.N., Shevzhuk A.P., Kolosov V.A. Ocenka individual'nogo i social'nogo riska avarij s pozharami i vzryvami dlja naruzhnyh tehnologicheskikh ustanovok, *Pozharovzryvobezopasnost'*, 1995, № 1, pp. 21 – 29.
17. Metodika modelirovanija rasprostranenija avarijnyh vybrosov opasnyh veshhestv. – M.: ZAO NTC PB, 2012, 46 p.
18. Chub I.A. Postroenie sistemy geometricheskikh ogranichenij v zadachah optimizacii razmeshhenija pozharovzryvoopasnyh ob'ektov, *Geometriche ta komp'juterne modeljuvannja*, 2007, Vol. 16, pp. 125–132.