

УДК 515.2

Чуб І. А.¹, Новожилова М. В.², Матухно В. В.³

¹Д-р техн. наук, професор, начальник кафедри пожежної профілактики в населених пунктах Національного університету цивільного захисту України, м. Харків, Україна

²Д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри економічної кібернетики та інформаційних технологій Харківського національного університету будівництва і архітектури, м. Харків, Україна

³Ад'юнкт Національного університету цивільного захисту України, м. Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ З ВИБУХОМ ХМАРИ ГАЗОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ

Актуальність. Науково обґрунтоване ранжування рівнів потенційної небезпеки технологічних установок газонафтопереробних підприємств є необхідним для вирішення проблем забезпечення безпеки на всіх стадіях їх життєвого циклу. Діюча в Україні нормативна та методична база є недостатньою щодо розв'язання задач забезпечення вибухобезпеки об'єктів газонафтопереробки в сучасних умовах господарювання.

Мета. Побудова та аналіз математичної моделі техногенної НС з вибухом хмари газоповітряної суміші на технологічному блоці газонафтопереробного підприємства як інструментального засобу визначення кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки блока.

Метод. Проведено структурну та параметричну ідентифікацію інтегрального критерію, який характеризує вибухонебезпеку технологічного блоку в цілому та враховує особливості забудови території, режиму вибуху, характеристик ВНР.

Результати. В роботі вирішена задача визначення рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку газонафтопереробного підприємства.

Висновки. Наукова новизна результатів полягає в тому, що запропонований метод становить подальший розвиток методології та прикладних засобів забезпечення техногенної безпеки, зокрема вибухонебезпеки, потенційно небезпечних промислових об'єктів. Результати чисельних експериментів дозволяють рекомендувати запропонований метод для використання на практиці.

Ключові слова: вибух, хмара газоповітряної суміші, рівень вибухонебезпеки, ймовірність виникнення надзвичайної ситуації.

НОМЕНКЛАТУРА

АГФУ – абсорбційна газофракціонуюча установка

ВНР – вибухонебезпечна речовина

ГНПП – газонафтопереробне підприємство;

ГПС – газоповітряні суміші;

ЕЛЗУ – електрознесолювальна установка;

НС – надзвичайна ситуація;

ПНО – потенційно-небезпечні об'єкти;

c_{vi} – концентрація ВНР у хмарі ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

c_{sti} – стехіометрична концентрація ВНР, що виникла при НС на i -му обладнанні, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

$c_{pi}(x, y, z, t)$ – функція розподілу концентрації ВНР в об'ємі хмари ГПС, який вибухає;

$c_{вкмрпi}^{\text{верх}}$ – верхня концентраційна межа розповсюдження полум'я, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

$c_{вкмрпi}^{\text{ниж}}$ – нижня концентраційна межа розповсюдження полум'я, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

E^i – відносний енергетичний потенціал i -го технологічного обладнання;

i – номер технологічного обладнання;

I – кількість елементів технологічного обладнання в технологічному блоці;

I_i – імпульс хвилі тиску вибуху на i -ому об'єкті, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

F_2 – фактор, що входить до складу пробіт-функції Pr_2 ;

J – кількість одиниць технологічного обладнання, яке було зруйновано в результаті вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні;

K – коефіцієнт, що характеризує рівень руйнувань при вибухах;

k_{ij} – коефіцієнт, який залежить від ступеню пошкодження j -го технологічного обладнання від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні;

L_{ij} – відстань між центром j -го технологічного обладнання та центром вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні;

M_{vi} – маса ВНР у хмарі, яка бере участь у вибуху, кг ;

n – тип обладнання технологічного блоку;

ΔP – надмірний тиск у фронті вибуху, Па ;

Pr_2 – пробіт-функція, яка визначає ймовірність руйнування споруд від вибуху;

p_{ij} – ймовірність повного руйнування j -го технологічного обладнання від вибуху хмари ГПС при НС на i -му обладнанні;

$Q_{НС}^{in}$ – ймовірність виникнення НС, яка супроводжується викидом та виникненням хмари ГПС, на i -му технологічному обладнанні n -го типу;

Q_k^{in} – ймовірність розвитку НС по k -му типу;

Q_B^{in} – ймовірність вибухового перетворення хмари ГПС, яка виникла при НС на i -му технологічному обладнанні n -го типу;

q_{iv} – ймовірність реалізації сценарію вибухового перетворення хмари ГПС;

q_{vi} – питома теплота згорання ВНР у викиді при НС на i -му обладнанні, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$;

q_T – питома енергія вибуху тринітротолуолу, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$;

R_i^{100} – радіус зони повних (100%) руйнувань від вибуху хмари ГПС, що утворилася при НС на i -му обладнанні, м ;

R_i^0 – радіус безпечної зони від вибуху хмари ГПС при НС на i -му обладнанні, м ;

S_{Bi} – поверхня, на якій досягаються концентрація газоподібної ВНР, що вийшла у повітря при НС на i -му обладнанні, що дорівнює $c_{вкмрпi}^{\text{верх}}$;

S_{H_i} – поверхня, на якій досягаються концентрація газоподібної ВНР, що вийшла у повітря при НС на i -му обладнанні, що дорівнює $c_{\text{нкрмрп}i}$;

t – час від початку НС (виникнення хмари ГПС) до вибуху, с;

V_{Vi} – об'єм хмари ГПС, що утворилася при НС на i -му обладнанні, який вибухає, м³;

v – сценарій розвитку НС;

$v_{зв}$ – швидкість звуку в повітрі, м·с⁻¹;

W_i – тротиловий еквівалент вибуху при НС на i -му обладнанні;

α_{ij} – коефіцієнт, що враховує ступінь впливу ударної хвилі від вибуху хмари ГПС, що утворилася при НС на i -му обладнанні, на j -е технологічне обладнання;

σ – ступінь розширення продуктів згорання;

Λ_i – частковий критерій рівня вибухонебезпеки i -го технологічного обладнання;

Λ – інтегральний критерій рівня вибухонебезпеки технологічного блоку в цілому;

λ_i – вагова функція i -го технологічного обладнання.

ВСТУП

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

Науково обгрунтоване ранжування рівнів потенційної безпеки технологічних установок ГНПП є необхідним 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 вибухонебезпеки 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 підвищення точності існуючих методик та розробки нових ефективних підходів до визначення кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки об'єктів газонафтопереробної галузі на основі комплексного аналізу кількісних характеристик надзвичайних ситуацій з вибухами хмар газоповітряних сумішей.

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

Метою статті є побудова та аналіз математичної моделі техногенної НС з вибухом хмари газоповітряної суміші на технологічному блоці ГНПП як інструменталь-

ного засобу визначення кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки блока.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Розглянемо НС з вибухом хмари ГПС, що виникла в результаті руйнування технологічної ємності, що містить горючу речовину в газоподібній фазі, в умовах технологічного блоку ГНПП.

НС характеризується повною розгерметизацією ємності, що супроводжується викидом певної кількості 8 тонн газу з утворенням хмари ГПС. Для оцінки максимально можливих наслідків НС приймаємо, що в хмару перейшла практично вся кількість викинутого газу.

Тоді задача визначення кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в заданих кліматичних умовах та геометричних характеристиках блоку полягає в побудові алгоритму пошуку ймовірностей p_{ij} , вагових функцій λ_i , що моделюють вплив вибуху НС на оточуючі елементи технологічного блоку та в цілому складають інтегральний критерій Λ вибухонебезпеки технологічного блоку.

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 ВНР 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.

Робота [12] присвячена розробці методики прогнозування наслідків надзвичайної ситуації з вибухом газоповітряної хмари в умовах ГНПП. Методика містить розрахунок параметрів вибуху та оцінку ймовірності пошкодження або руйнування будівель, споруд та технологічних установок.

Аналіз рівня вибухонебезпеки технологічного блоку в умовах НС з викидами хмар ГПС та розробка методу її зниження передбачає визначення критерію Λ кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки блоку [1]. При цьому критерій Λ є інтегральним, побудова якого виконується на базі часткових критеріїв Λ_i , що кількісно характеризують рівні вибухонебезпеки технологічного обладнання (апаратів) різних типів у складі блоку. Тому при структурній та параметричній ідентифікації часткових критеріїв Λ_i є доцільним урахування особливостей забудови території, режиму вибуху, характеристик ВНР.

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 ВНР 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 ВНР.

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

Нехай Λ_i – частковий критерій, що кількісно характеризує рівень вибухонебезпеки i -го технологічного обладнання (апарата), $i=1, 2, \dots, I$. Для його визначення пропонується застосування енергетичного показника вибухонебезпеки за наступною формулою [12]:

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

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).

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 [12, 13].

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

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 блоку АГФУ ймовірність Q_{HC}^1 вибухового перетворення хмари ГПС, яка виникла при НС з викидом стислого вуглеводневого газу, дорівнює $Q_{HC}^1 = 0,265$. 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 Λ , який характеризує вибухонебезпеку технологічного блоку в цілому, має вигляд [1]:

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

Вагові функції λ_i моделюють ступінь впливу вибуху на i -му технологічному апараті на сусіднє обладнання та визначаються як [1]

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

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

Індекс обладнання, n	Тип обладнання	$\cdot Q_{HC}^{in}, \text{ рік}^{-1}$	
		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	$1,88 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$

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

Тип розвитку НС з викидом стислого вуглеводневого газу, k	Ймовірність розвитку НС по k -му типу, Q_k^{in}	Сценарій розвитку НС k -го типу, v	Ймовірність v -го сценарію розвитку НС по k -го типу, q_{ivk}
Вибух ($k=1$)	$Q_1^{in} = Q_B^{in} = 0,265$	Детонаційний вибух	0,0638
		Дефлаграційний вибух	0,9362
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

Коефіцієнти k_{ij} визначаються наступним чином:

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

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

Коефіцієнт α_{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 α_{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° до напрямку розповсюдження ударної хвилі вибуху на i -му об'єкті відповідає найменше значення $\alpha_{ij}^{\min}=0,9$;

– для інших значень кута θ величина α_{ij} має проміжні значення.

2) для об'єктів сферичної та циліндричної форми:

– значення коефіцієнту α_{ij} не залежить від кута θ та дорівнює $\alpha_{ij}=1,0$.

Для кількісного визначення величини коефіцієнтів α_{ij} у першому випадку пропонується застосування або тригонометричного 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 Λ_i та Δ необхідно розрахувати параметри вибуху хмари ГПС, що утворилася при НС на i -му технологічному обладнанні.

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:

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

Розрахунок основних параметрів вибуху ΔP та I_B хмари ГПС проведемо відповідно до рекомендацій [9, 10, 14]. Розрахунок виконується у наступній послідовності.

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

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

$$E_i = 2M_{Vi} q_{Vi} c_{ct} / c_{Vi}, \quad \text{якщо } c_{cti} < c_{Vi}. \quad (10)$$

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

$$M_{ei} = \frac{1}{3} \iiint_{V_{Bi}} c_{pi}(x, y, z, t) dx dy dz. \quad (11)$$

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

2. Розрахунок швидкості фронту полум'я v_{Gi} (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 обладнанні, 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 $c_{нкмрпi}$.

4. Розрахунок основних параметрів вибуху хмари ГПС, до яких відносяться параметри повітряних ударних хвиль вибуху – надмірний тиск ΔP і імпульс хвилі тиску I :

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

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

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

де $v_{3B} = 340$ м/с; 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 остаточної безрозмірних величин тиску P_{ji} і імпульсу I_{ij} для всіх об'єктів ($j = 1, 2, \dots, N-1; j \neq i$):

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

– визначення розмірних величин надлишкового тиску ΔP_{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

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

Коефіцієнт K для границі зони повних руйнувань має значення $K^{100} = 3,8$, для границі безпечної зони – $K^0 = 14$.

Троїловий еквівалент вибуху хмари ГПС визначається як

$$W_i = \frac{0,4q_{vi}}{0,9q_T} M_{vi}, \quad (21)$$

де $q_T = 1,52 \cdot 10^6$ Дж·кг⁻¹.

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

$$Pr_2 = 5 - 0,22 \ln F_2. \quad (22)$$

Фактор F_2 розраховується за формулою:

$$F_2 = (40000/\Delta P_{ij})^{7,4} + (460/I_{ij})^{11,3}. \quad (23)$$

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

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для отримання кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в умовах НС з вибу-

хом хмари ГПС проведемо розрахунки згідно запропонованої методики.

Блок має у своєму складі 4 технологічних апарата (обладнання). Розглянемо НС з повною розгерметизацією сферичної технологічної ємності E_1 , яка супроводжується викидом 8 тонн пропану з утворенням хмари ГПС. Для оцінки максимально можливих наслідків НС приймаємо, що в хмару перейшла практично вся кількість викинутого пропану. У вибуховому перетворенні приймає участь 10% маси хмари.

НС сталася влітку, в денний час, в ясну безвітряну погоду. На відстані 50 м, 80 м і 100 м від технологічної ємності розміщуються інші технологічні апарати блоку – колони K_1, K_2 та K_3 , які мають форму прямого кругового циліндру.

Потрібно визначити кількісну оцінку рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП при умові, що НС з вибухом хмари ГПС можлива тільки при руйнуванні ємності E_1 .

Характеристики технологічного обладнання блоку наведено в табл. 3.

Дані для розв'язання задачі:

- вибухонебезпечна речовина – пропан;
- агрегатний стан суміші – газова;
- концентрація газу в суміші, кг/м³ – 0,14;
- маса газу в хмарі, кг – 8000;
- об'єм хмари, м³ – 57000;
- питома теплота згоряння газу, Дж/кг – $4,64 \cdot 10^7$;
- навколишній простір – відкритий;
- відстані до сусідніх об'єктів, м – 50, 80, 100.

Основні параметри вибуху хмари ГПС пропану з повітрям, яка утворилася у наслідок руйнування технологічної ємності були визначені за формулами (9)–(19).

Розрахунок параметрів зон ураження та ймовірностей повного руйнування технологічного обладнання у результаті вибуху хмари пропан-повітряної суміші було виконано за формулами (20)–(23).

Оцінка рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку ГНПП визначалася за формулами (1)–(8).

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати розрахунків основних параметрів вибуху хмари ГПС, яка виникла в наслідок руйнування ємності E_1 з пропаном, зводимо в табл. 4.

Результати розрахунків параметрів зон ураження та ймовірностей повного руйнування технологічного обладнання у результаті вибуху хмари ГПС, яка виникла в наслідок руйнування ємності E_1 з пропаном, наведено в табл. 5.

Результати визначення оцінки рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку ГНПП представлено в табл. 6.

Таблиця 3 – Характеристики технологічного обладнання блоку

i	Позначення обладнання	Тип обладнання, n	Q_B^{in}	q_{i2}	$Q_{НС}^{in}$	E^i , Дж
1	E_1	Ємнісне, $n = 2$	0,265	0,9362	$1,21 \cdot 10^{-4}$	24,4
2	K_1	Колонне, $n = 3$	0	0	$1,25 \cdot 10^{-4}$	8,6
3	K_2	Колонне, $n = 3$	0	0	$1,14 \cdot 10^{-4}$	6,2
4	K_3	Колонне, $n = 3$	0	0	$1,24 \cdot 10^{-4}$	11,8

Таблиця 4 – Результати розрахунку основних параметрів вибуху хмари ГПС

i	$r_{i\text{, м}}$	R_{xi}	Режим вибуху				$\Delta P_{1i\text{, Па}}$	$I\text{, Па}\cdot\text{с}$
			Дефлаграція		Детонація			
			P_{1xi}	I_{1xi}	P_{2xi}	I_{2xi}		
2	50	0,35	0,46	0,0571	0,96	0,057	$6,2\cdot 10^4$	$3,68\cdot 10^4$
3	80	0,5	0,35	0,0496	0,85	0,052	$4,4\cdot 10^4$	$2,84\cdot 10^4$
4	100	0,63	0,29	0,0427	0,74	0,049	$2,8\cdot 10^4$	$2,04\cdot 10^4$

Таблиця 5 – Результати розрахунку ймовірностей руйнування технологічних установок блоку в наслідок вибуху хмари ГПС

i	$r_{i\text{, м}}$	$R_1^{100}\text{, м}$	$R_1^0\text{, м}$	Pr_2	$\% P_{1i}$
2	50	87	321	–	100
3	80			–	100
4	100			4,47	28

Таблиця 6 – Результати визначення оцінки рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку

Λ_1	Λ_2	Λ_3	Λ_4	Λ
0,00073	0,00018	0,00016	0,00034	0,0014

6 ОБГОВОРЕННЯ

Запропонований метод визначення рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку ГНПП дозволяє отримати більш точну в порівнянні з існуючими методиками оцінку рівня вибухонебезпеки. Цей результат досягається на основі урахування особливостей забудови території, режиму вибуху та характеристик ВНР.

Дана методика може бути застосованою до широкої множини горючих речовин та технологічного обладнання різних типів, що використовуються на ГНПП. Результати чисельних експериментів дозволяють рекомендувати запропонований метод для використання на практиці.

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена задача визначення рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку ГНПП.

Наукова новизна результатів, отриманих в статті, полягає в тому, що запропонований метод визначення рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку становить подальший розвиток методології та прикладних засобів забезпечення техногенної безпеки, зокрема вибухонебезпеки, потенційно небезпечних промислових об'єктів.

Практична значимість отриманих результатів полягає в тому, що програмне забезпечення, що реалізує запропонований метод, є основою математичного забезпечення інформаційної системи підтримки прийняття рішень при проектуванні систем безпеки газонафтопереробних підприємств.

Перспективи подальших досліджень полягають у тому, що запропонована методика уможливує побудову та розв'язання задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в умовах надзвичайної ситуації з викидом ВНР, утворенням хмари газоповітряної суміші та її вибуховим перетворенням за умови її зве-

дення до задачі оптимізації розміщення технологічних апаратів з урахуванням обмежень на максимально допустимі відстані між складовими блоку.

ПОДЯКИ

Дослідження виконано в рамках науково-дослідної роботи «Методи оптимізації динамічних ієрархічних систем регіональної техногенної безпеки» (номер державної реєстрації 0115U002026).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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 / H. 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 : УкрНДІПЗ, 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. 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.
13. 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.
14. Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ. – М. : ЗАО НТЦ ПБ, 2012. – 46 с.

Стаття надійшла до редакції 23.12.2016.

Після доробки 18.01.2017.

Чуб І. А.¹, Новожилова М. В.², Матухно В. В.³

¹Д-р техн. наук, професор, начальник кафедри пожежної профілактики в населених пунктах Національного університету громадянської захисти України, г. Харків, Україна,

²Д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри економічної кібернетики та інформаційних технологій, Харківський національний університет будівництва та архітектури, г. Харків, Україна

³Ад'юнкт Національного університету громадянської захисти України, г. Харків, Україна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ СО ВЗРЫВОМ ОБЛАКА ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Актуальность. Научно обоснованное ранжирование уровней потенциальной опасности технологических установок газонефтеперерабатывающих предприятий необходимо для решения проблем обеспечения безопасности на всех стадиях их жизненного цикла. Действующая в Украине нормативная и методическая база недостаточна для решения задач обеспечения взрывобезопасности объектов газонефтепереработки в современных условиях хозяйствования.

Цель. Построение и анализ математической модели техногенной чрезвычайной ситуации с взрывом облака газозвдушной смеси на технологическом блоке газонефтеперерабатывающего предприятия как инструментального средства определения количественной оценки уровня взрывоопасности блока.

Метод. Проведена структурная и параметрическая идентификация интегрального критерия, характеризующего взрывоопасность технологического блока в целом и учитывающего особенности застройки территории предприятия, режима взрыва, характеристик взрывоопасных веществ.

Результаты. В работе решена задача определения уровня взрывоопасности отдельного технологического оборудования и в целом технологического блока газонефтеперерабатывающего предприятия.

Выводы. Научная новизна заключается в том, что предложенный метод составляет дальнейшее развитие методологии и прикладных средств обеспечения техногенной безопасности, в частности взрывоопасности, потенциально опасных промышленных объектов. Результаты численных экспериментов позволяют рекомендовать предложенный метод для использования на практике.

Ключевые слова: взрыв, облако газозвдушной смеси, уровень взрывоопасности, вероятность возникновения чрезвычайной ситуации.

Chub I. A.¹, Novozhylva M. V.², Matuhno V. V.³

¹Dr.Sc., Professor, Head of the Department of Fire Prevention in the Settlements, National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkov, Ukraine

²Dr.Sc., Professor, Head of the Department of Economic Cybernetics and Information Technologies, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine

³Adjunct, National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkov, Ukraine

MODELLING OF EMERGENCY WITH THE EXPLOSION OF GAS-AIR MIXTURE CLOUD

Context. Science-based ranking of potential danger levels characterizing technological units at gas-oil reprocessing enterprises needs to address safety issues at all stages of their life cycle. Actual Ukrainian normative and methodological framework is insufficient to meet the challenges of explosion at gas-oil reprocessing enterprises in current economic conditions.

Objective. Designing and analyzing mathematical model of tehnogenic emergency with the explosion of gas-air mixture clouds on block of gas-oil reprocessing technological enterprise as the constructive tool for quantify definition of explosive unit level.

Method. Structural and parametric identification of integral criterion characterizing the unit explosiveness as a whole taking into account the peculiarities of enterprise territory development, the explosion regime, characteristics of explosive materials.

Results. The problem of explosion hazard level estimation of separate technological equipment and whole technological block of a gas and oil refinery plant is solved in the work.

Conclusions. The proposed method is a contribution to further development of the methodology and constructive means to ensure the technologic safety, in particular the explosion one, for potentially hazardous industrial objects. Numerical results allow us to recommend the proposed method to be used in practice.

Keywords: explosion, a cloud of gas-air mixture, explosion level, probability of an emergency.

REFERENCES

1. Chub I.A., Matuhno V.V. Model zadachi minimizacii rivnja vibuhonebezpeki ob'ektiv z vybuhamy hmar gazopovitrijnyh sumishej, *Problemi nadzvichainix situacii*, 2016, Vol. 24, pp. 137–142.
2. Chernaj A.V., Nalys'ko M.M. Matematychnе modeljuvannja vymshenogo zapaljuvannja gazopovitrijanoi' sumishi pry rozrahunku vrazhajuchyh faktoriv avarijnyh vybuhiv, *Naukovyj visnyk Nacional'nogo girnychogo universytetu*, 2016, No. 5, pp. 82–94.
3. Van den Berg A. C., Van Wingerden C. J. M. Vapor cloud explosion blast modeling. *ICHEME Symposium Series*, 1994, No. 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, P. 410.
6. Giesbrecht H., Hemmer G., Hess K. et al. Analysis of explosion hazards on spontaneous release of inflammable cases, *Ger. Chem. Eng.*, 1984, No. 4, pp. 315–325.
7. Lee J. H., Guirao C. V., Bach G. G. Blast effects from vapor cloud explosion, *Loss prevention*, 1989, Vol. 11, No. 1, pp. 59–70.
8. DSTU B V.1.1-36:2016. Vyznachennja kategorij prymishhen', budynkiv ta zovnishnih ustanovok za vybuhopozhezhnoju ta pozhheznoju 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. Moscow, ZAO NTC PB, 2010, 208 p.
10. RD 03-409-01. Metodika ocenki posledstvij avarijnyh vzryvov toplivno-vozdushnyh smesej. Moscow, ZAO NTC PB, 2014, 38 p.
11. Popov V. M., Chub I. A., Novozhylva M. V. Modelirovanie harakteristik potoka otkazov osnovnyh proizvodstvennyh fondov ob'ektov povyshennoj opasnosti, *Problemi nadzvichainix situacii*, 2015, Vol. 21, pp. 64–70.
12. Chub I. A., Matuhno V. V. Prognozuvannja naslidkiv nadzvichainoi situacii z vibuhom xmaru gazopovitrijanoi sumichi, *Problemi nadzvichainix situacii*, 2016, Vol. 23, pp. 186–191.
13. 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, No. 1, pp. 21–29.
14. Metodika modelirovanija rasprostraneniya avarijnyh vybrosov opasnyh veshhestv. Moscow, ZAO NTC PB, 2012, 46 p.