

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

## **МІНІМІЗАЦІЯ РІВНЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО БЛОКУ В УМОВАХ ВИБУХУ ХМАРИ ГАЗОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ**

Наведено загальну схему та алгоритмічну реалізацію методу розв'язання задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку газопереробного підприємства в умовах надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші. Зниження рівня вибухонебезпеки виконується за рахунок раціонального розміщення технологічного обладнання.

**Ключові слова:** хмара газоповітряної суміші, вибух, мінімізація рівня вибухонебезпеки, раціональне розміщення обладнання.

**Постановка проблеми.** Газонафтопереробні підприємства (ГНПП) є одними з найбільш небезпечних виробничих об'єктів промисловості України, на яких у великій кількості утворюються, використовуються, переробляються, зберігаються, транспортуються небезпечні речовини. Зростаюче в останні роки число техногенних надзвичайних ситуацій (НС) на цих об'єктах свідчить про те, що існуюча структура нормативної бази в галузі техногенної безпеки не дозволяє сформулювати практичні рекомендації щодо визначення рівня та забезпечення їх вибухобезпеки. При цьому відсутні затверджені методики управління рівнем вибухонебезпеки ГНПП та їх технологічного обладнання при можливості виникнення хмари газоповітряної суміші (ГПС) та її подальшим вибухом.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває розробка методів зниження рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в умовах НС з вибухами хмар ГПС.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На теперішній час в Україні є відсутнім єдиний підхід до розв'язання задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки на об'єктах з можливим виникненням та вибухом хмар ГПС. Нормативний документ [1] визначає основні параметри вибуху хмари ГПС, яка виникла при НС з викидом вибухонебезпечної речовини в результаті розгерметизації обладнання. Але дана методика не враховує склад вибухонебезпечної суміші, режим її вибуху та не визначає шляхів зменшення негативних наслідків вибуху. У [2] пропонується методика підвищення рівня вибухобезпеки технологічного блоку газонафтопереробного заводу при вибухах хмар ГПС шляхом оптимізації розміщення обладнання, проте розглядається лише детонаційний режим

вибуху, що має місце лише у 2...3% випадків), та відсутнє врахування дрейфу хмари ГПС під дією вітру в умовах забудови технологічної площадки блоку. Роботи [3, 6] присвячені моделюванню оптимального розміщення об'єктів техногенної небезпеки, зокрема пожежонебезпечних, на території потенційно-небезпечного об'єкту з мінімізацією рівня впливу небезпечних чинників можливої НС з точки зору підвищення ефективності функціонування регіональної системи техногенної безпеки. У роботах [7, 8] аналізуються шляхи зниження вибухонебезпеки блоку ГНПП та пропонується загальна схема методу її мінімізації в умовах НС з вибухом хмари ГПС.

**Постановка завдання та його вирішення.** Метою статті є побудова загальної схеми та алгоритмічної реалізації методу мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку об'єкту газонафтопереробної промисловості в умовах НС з вибухом хмари ГПС за рахунок раціонального розміщення обладнання.

Для кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку використовується інтегральний критерій  $\Lambda$  [7, 8]

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

де  $\lambda_i$  – вагова функція об'єкту  $S_i$ , що моделює ступінь вплив вибуху хмари ГПС, яка утворилася при НС на ньому, на сусідні об'єкти;  $\Lambda_i$  – кількісна характеристика рівню вибухонебезпеки об'єкту  $S_i$  вигляду [7, 8]

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

де  $E_B^i$  – відносний енергетичний потенціал вибухонебезпеки об'єкту  $S_i$ ;  $Q_{НС}^{in}$  – ймовірність виникнення НС з викидом вибухонебезпечної речовини та виникненням хмари ГПС, на об'єкті  $S_i$   $n$ -го типу;  $Q_B^{in}$  – ймовірність вибухового перетворення хмари ГПС, яка виникла при НС на  $S_i$   $n$ -го типу,  $q_{iv}$  – ймовірність реалізації сценарію вибуху.

Множина функцій  $\lambda_i$  визначається за формулою [7, 8]

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

де  $J$  – кількість об'єктів  $S_j$ , які були повністю зруйновані або пошкоджені в результаті вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на об'єкті  $S_i$ ;  $\alpha_{ij}$  – коефіцієнт, що враховує ступінь впливу ударної хвилі від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на об'єкті  $S_i$ , на об'єкт  $S_j$ ;  $k_{ij}$  – коефіцієнт [10],

який залежить від ступеню пошкодження об'єкту  $S_j$  від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на об'єкті  $S_i$ .

З урахуванням (3) оптимізаційна задача мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку має вигляд

$$\min_W \Lambda = \min_W \left( \sum_{i=1}^I \Lambda_i \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} k_{ij} \right), \quad (5)$$

де  $W$  – область допустимих розв'язків задачі, що містить систему геометричних  $W_G$  та технологічних  $W_T$  обмежень [11]:  $W = W_G \cup W_T$ .

Як було показано в [9], оптимізаційна задача (5) мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку може бути сформульована як задача оптимізації розміщення об'єктів  $S_i$  з урахуванням параметрів вибуху хмар ГПС та природно-кліматичних умов. Область розміщення  $\Omega$  – це територія технологічного блоку без зон заборони. Розміщення об'єктів  $S_i$  в межах області  $\Omega$  задається вектором параметрів розміщення  $Z = (z_1, z_2, \dots, z_N) = (x_1, y_1, \dots, x_N, y_N)$ .

Загальна схема  $p$ -ї ітерації визначення вектору  $Z$ , що відповідає локальному мінімуму оптимізаційної задачі (5), є такою:

Крок 1. Визначення рухомого об'єкту  $S_k$  з параметрами розміщення  $z_k^p = (x_k^p, y_k^p)$ , що змінює своє положення.

Крок 2. Виділення обмежень, що формують в околі полюса об'єкту  $S_k$  область  $W_k^p$  допустимих параметрів його розміщення.

Крок 3. Визначення напрямку і кроку зсуву об'єкта  $S_k$ . Параметри розміщення об'єкта  $S_k$  отримують приріст  $\Delta_k^p$ , що приводить до зменшення значення критерію  $\Lambda$  задачі (5):  $\Lambda^p < \Lambda^{p-1}$ . Знаходяться нові параметри розміщення  $z_k^{p+1} = (x_k^{p+1}, y_k^{p+1})$  об'єкта  $S_k$ .

Крок 4. Проводиться перевірка виконання системи обмежень для нового положення об'єкта  $S_k$ . У разі її виконання здійснюється перехід до Кроку 5, в іншому випадку – до Кроку 3

Крок 5. Номер  $K$  збільшується на одиницю. При  $K \leq I$  здійснюється повернення до Кроку 1.

Крок 6. Для об'єктів  $S_m$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) технологічного блоку, які мають прямокутну форму визначається кут  $\theta_m$  між вектором, що з'єднує точку енергетичного центру вибухонебезпеки технологічного блоку (ЕЦ) для поточного становища об'єктів з центром  $(x_m, y_m)$  об'єкта  $S_m$ , і стіною об'єкта  $S_m$ . Якщо  $\theta_m \neq \pi/4$ , об'єкт  $S_m$  розвертається навколо точки центру таким чином, що кут  $\theta_m$  дорівнював  $\pi/4$ .

Крок 7. Якщо хоча б один з об'єктів змінив своє положення, тобто  $Z^p \neq Z^{p-1}$ , то номер  $P$  збільшується на 1 і здійснюється перехід до Кроку 1. В іншому випадку рішенням вважають вектор  $Z^p$  об'єкта

$S_i$ , ( $i = 1, 2, \dots, I$ ), отриманий на  $(p-1)$  ітерації.

Розглянемо докладніше роботу методу на кожному з кроків.

*Визначення послідовності зміни параметрів розміщення об'єктів (крок 1).* Об'єкт, який першим розпочинає змінювати параметри розміщення, визначався з міркувань найбільшого руйнівного впливу на сусідні об'єкти вибуху хмари ГПС, яке утворилося в результаті НС на ньому. Процедура визначення послідовності зміни параметрів розміщення об'єктів  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ ) складається з наступних кроків.

Крок 1.1. Розраховується величина часткового критерію  $\Lambda_i$  для всієї множини об'єктів  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ ).

Крок 1.2. Розраховуються величини вагових коефіцієнтів  $\lambda_i$  для всієї множини об'єктів  $S_i$ .

Крок 1.3. Об'єкти  $S_i$  ранжуються за спаданням величини  $\lambda_i \Lambda_i$ .

Отриманий на кроці 1.3 ряд представляє собою послідовність зміни параметрів розміщення об'єктів.

*Формування області  $W_k^p$  допустимих параметрів розміщення рухомого об'єкта  $S_k$  на  $p$ -ої ітерації (крок 2).* На параметри розміщення об'єктів  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ ) накладається система геометричних і технологічних обмежень, що формує область  $W$  допустимих рішень оптимізаційної задачі (5). На кроці 2 з неї виділяються обмеження, що накладаються на параметри розміщення об'єкта  $S_k$ . В цьому випадку система обмежень включає в себе умови:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \Phi_{Sij} (x_k, y_k, x_j, y_j) > 0; & (6) \\ \Phi_{Zin} (x_k, y_k, x_n, y_n) > 0; & (7) \\ \Phi_{i0} (x_k, y_k, m_0) = 0; & (8) \\ (x_k - x_j)^2 + (y_k - y_j)^2 = r_{kj}; & (9) \\ (x_k - x_j)^2 + (y_k - y_j)^2 \leq r_{kj}; & (10) \\ l_{kj}^t \leq L_{kj}^t; & (11) \\ d_k^q \leq D_k^q; & (12) \end{array} \right.$$

$$j = \overline{1, I-1}, j \neq k, t = \overline{1, T}, q = \overline{1, Q}, n = \overline{1, N},$$

де  $\Phi_{Sij}$  –  $\Phi$ -функція [11], що описує умови попарного неперетину об'єктів  $S_i$  і  $S_j$ ;  $\Phi_{Zin}$  –  $\Phi$ -функція, що описує умови неперетину об'єктів  $S_i$  з зонами заборони;  $\Phi_{i0}$  –  $\Phi$ -функція, що описує умови розміщення об'єктів  $S_i$  в межах технологічному блоку,  $m_0$  – метричні характеристики границі технологічного блоку;  $r_{kj}$  – максимальні допустимі відстані між

технологічним обладнанням блоку;  $l_{kj}^t$  – довжина лінійного технологічного обладнання (ЛТО) між  $S_i$  та  $S_j$ , м;  $L_{kj}^t$  – максимальна довжина ЛТО між  $S_i$  та  $S_j$ , м;  $d_i^q$  – відстань між  $S_i$  та об'єктами інженерної інфраструктури (II) підприємства, м;  $D_i^q$  – максимальна відстань між  $S_i$  та об'єктами II підприємства, м.

Зазначена система на  $p$ -ой ітерації формує в околиці полюса рухомого об'єкта  $S_k$  область допустимих параметрів розміщення  $W_k^p$ .

*Визначення нових параметрів розміщення  $S_k$  (Кроки 3–6).* Оптимізаційна задача (5) є багатовимірною багатоекстремальною задачею безперервного нелінійного математичного програмування спеціального вигляду. Для її розв'язку використовуються стандартні чисельні методи безперервної локальної оптимізації, основані на ітераційному процесі вигляду

$$z_k^{p+1} = z_k^p + \delta_k^p g_k^p = z_k^p + \Delta_k^p, \quad (13)$$

або в проєкціях на координатні осі

$$x_k^{p+1} = x_k^p + \delta_k^p g_{kx}^p = x_k^p + \Delta_{kx}^p; \quad (14)$$

$$y_k^{p+1} = y_k^p + \delta_k^p g_{ky}^p = y_k^p + \Delta_{ky}^p, \quad (15)$$

де  $g_k^p$   $\delta_k^p$  – вектор та крок зсуву об'єкта  $S_k$  на  $p$ -ой ітерації відповідно;  $g_{ix}^p$  і  $g_{iy}^p$  – проєкції вектора зсуву  $g_k^p$  на координатні осі.

В якості напрямку зсуву об'єкта  $S_k$  вибирається вектор з точки ЕЦ ( $X_{ЕЦ}$ ,  $Y_{ЕЦ}$ ) технологічного блоку до центру (полюса) об'єкта  $S_k$

$$X_{ЕЦ} = \frac{\sum_{i=1}^I x_{ei} E_{ix}}{\sum_{i=1}^I E_{ix}}; \quad Y_{ЕЦ} = \frac{\sum_{i=1}^I y_{ei} E_{ix}}{\sum_{i=1}^I E_{ix}}, \quad (16)$$

де  $(x_{ei}, y_{ei})$  – координати епіцентру вибуху хмари ГПС, яка виникла при НС на  $i$ -му об'єкті.

Величина кроку  $\delta_k^p$  обчислюється за формулою

$$\delta_k^p = \varepsilon d_k^p, \quad (17)$$

де  $d_k^p$  – довжина вектора, що з'єднує точки ЕЦ технологічного блоку і центру (полюса) рухомого об'єкта  $S_k$ ;  $\varepsilon$  – деяка константа,  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , вибір якої обумовлений особливостями конкретної задачі.

Процес визначення параметрів зсуву об'єкта  $S_k$  є таким.

Крок 3.1. Для поточного розміщення об'єктів визначаються координати  $(x_{ЕЦ}^p, y_{ЕЦ}^p)$  точки ЕЦ технологічного блоку.

Крок 3.2. Знаходиться рівняння вектора  $g_k^p$ , що проходить через точку ЕЦ  $(x_{ЕЦ}^p, y_{ЕЦ}^p)$  і точку  $(x_k^p, y_k^p)$  полюса об'єкта  $S_k$ .

Рівняння вектора  $g_k^p$  має вигляд  $y = kx + b$ , де

$$k = \frac{y_k^p - y_{ЕЦ}^p}{x_k^p - x_{ЕЦ}^p}, \quad b = y_{ЕЦ}^p - \frac{x_{ЕЦ}^p (y_k^p - y_{ЕЦ}^p)}{x_k^p - x_{ЕЦ}^p}. \quad (18)$$

Крок 3.3. Обчислюється довжина  $\delta_k^p$  кроку зсуву об'єкта  $S_k$

$$\delta_k^p = \epsilon d_k^p = \epsilon [(x_k^p - x_{ЕЦ}^p)^2 + (y_k^p - y_{ЕЦ}^p)^2]^{1/2}. \quad (19)$$

Крок 3.4. Визначаються нові параметри розміщення  $z_k^{p+1} = (x_k^{p+1}, y_k^{p+1})$  рухомого об'єкта  $S_k$  з використанням (14, 15) (рис. 1):

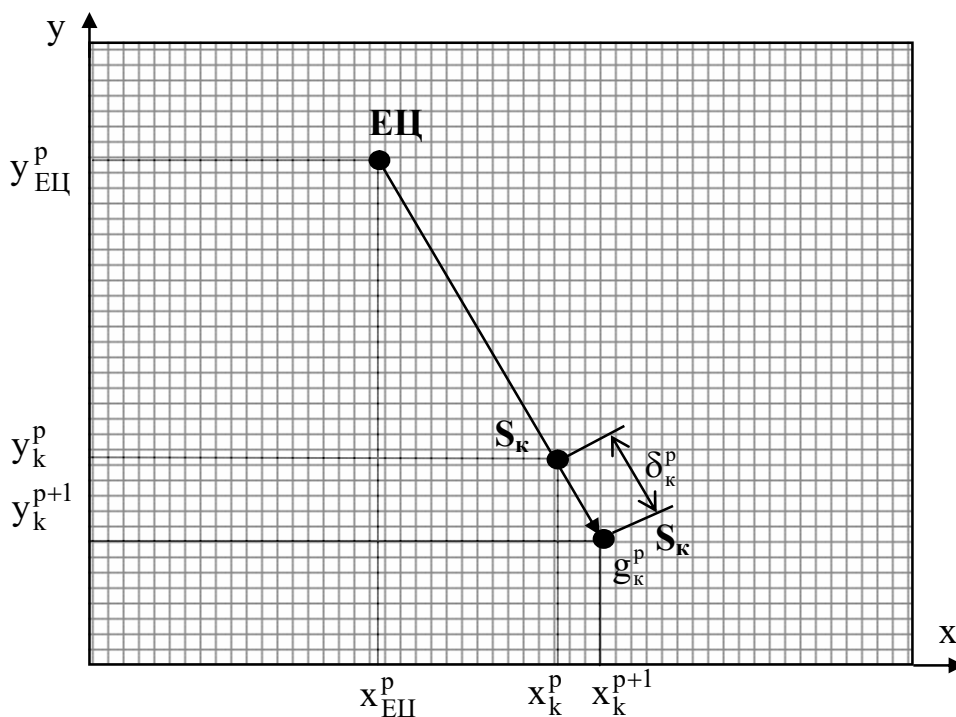


Рис. 1. Визначення параметрів зсуву рухомого об'єкта  $S_k$

Крок 3.5. Після визначення нових параметрів розміщення  $(x_k^{p+1}, y_k^{p+1})$  об'єкта  $S_k$  здійснюється перевірка виконання системи обмежень і умови  $\Lambda^p < \Lambda^{p+1}$ . У випадку їх порушення величина  $\delta_k^p$  зменшується вдвічі і відбувається повернення до Кроку 3.3. В іншому випадку об'єкт  $S_k$  поміщається в точку з координатами  $(x_k^{p+1}, y_k^{p+1})$ .

Крок 3.6.  $K=K+1$ . Якщо  $K \leq I$ , перехід до Кроку 3.1.

Крок 3.7. Для розташування об'єктів, для відповідного вектора  $z^{p+1}$ , визначаються координати  $(x_{ЕЦ}^{p+1}, y_{ЕЦ}^{p+1})$  точки енергетичного центру вибухонебезпеки технологічного блоку.

Крок 3.8. Знаходяться рівняння векторів  $\vec{a}_m$ , з'єднуючих ЕЦ з центрами об'єктів  $S_m$  технологічного блоку прямокутної форми, та векторів  $\vec{b}_m$ , які проходять через центр  $S_m$  паралельно довгим стінам.

Вектора  $\vec{a}_m$  і  $\vec{b}_m$  знаходяться за формулами, аналогічним (18), і мають вигляд (рис. 2):

$$\vec{a}: y = \frac{y_m^p - y_{ЕЦ}^p}{x_m^p - x_{ЕЦ}^p} x + y_{ЕЦ}^p - \frac{x_{ЕЦ}^p (y_k^p - y_{ЕЦ}^p)}{x_k^p - x_{ЕЦ}^p}, \quad (20)$$

$$\vec{b}: y = \frac{y_B^p - y_A^p}{x_B^p - x_A^p} x + y_A^p - \frac{x_A^p (y_B^p - y_A^p)}{x_B^p - x_A^p}. \quad (21)$$

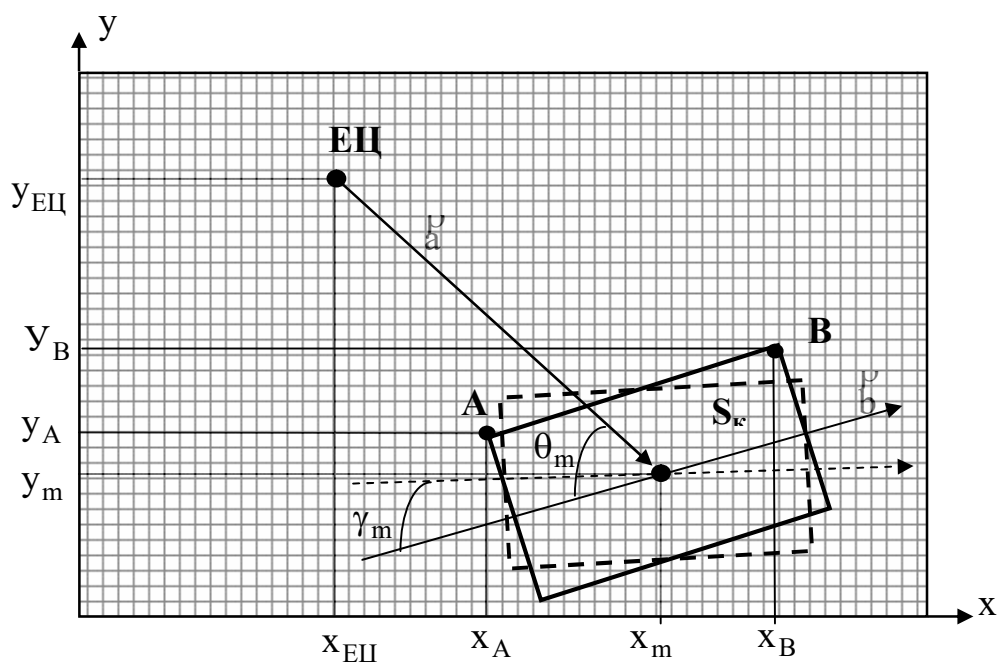


Рис. 2. Визначення параметрів повороту об'єкта  $S_m$

Крок 3.9. Визначаються кути  $\theta_m^p$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) між векторами  $\vec{a}_m$  і  $\vec{b}_m$  для всіх об'єктів  $S_m$

$$\theta_m^p = \arccos \theta_m^p = (\vec{a}_m, \vec{b}_m) / (|\vec{a}_m| |\vec{b}_m|). \quad (22)$$

де  $(\vec{a}_m, \vec{b}_m)$  – скалярний добуток векторів;  $|\vec{a}_m|, |\vec{b}_m|$  – модулі векторів.

Якщо  $\theta_m \neq \pi/4$ , об'єкт  $S_m$  повертається на кут

$$\gamma_m = \pi/4 - \arccos \theta_m^p. \quad (23)$$

Після повороту всіх об'єктів р-а ітерація закінчується.

Величина цільової функції  $\Lambda^s$ , отримана на s-ой (останній) ітерації, досить добре наближається до величини (5).

**Висновки.** Побудовано метод розв'язання задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПЗ 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 блоку з урахуванням системи геометричних та технологічних обмежень. Метод, що пропонується, базується на схемі методу мінімізації по групах змінних, у якості яких виступають параметри розміщення технологічних апаратів блоку.

## ЛІТЕРАТУРА

1. НАПБ Б.03.002-2007. Норми визначення категорій приміщень, будівель та зовнішніх установок за вибухопожежній та пожежній небезпеці. – Київ, 2007.

2. Ковалев Е.М. Оптимизация расположения оборудования опасных производственных объектов нефтеперерабатывающей промышленности / Е.М. Ковалев, Р.Р. Тляшева, Л.Г. Чиркова // Мировое сообщество: проблемы и пути решения, 2005. – С. 176-180.

3. Чуб І.А. Размещение объектов техногенной опасности с минимизацией уровня воздействия возможной чрезвычайной ситуации / І.А. Чуб, Е.В. Морщ, А.О. Труш // Проблемы пожарной безопасности. – 2004. – Вып. 16. – С. 248-251.

4. Чуб І.А. Моделирование размещения пожароопасных объектов с учетом опасных факторов возможного пожара / І.А. Чуб, Е.В. Морщ // Проблемы пожарной безопасности. – 2004. – Вып. 15. – С. 224-227.

5. Попов В.М. Показатели эффективности региональной системы техногенной безопасности / В.М. Попов, І.А.Чуб, М.В. Новожилова // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2014. – № 2(20). – С. 32-41.

6. Попов В.М. Модель адаптивной системы техногенной безопасности региона / В.М. Попов, І.А. Чуб, М.В. Новожилова // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2013. – вип. 2. – С. 120-123.

7. 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.

8. Чуб І.А. Метод мінімізації рівня вибухонебезпеки



технологічного блоку шляхом раціонального розміщення обладнання / І.А. Чуб, В.В. Матухно // Проблеми надзвичайних ситуацій – 2017. – Вип. 26. – С. 196-202.

9. 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.

10. Чуб І.А. Моделювання надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші / І.А. Чуб, М.В. Новожилова, В.В. Матухно // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2017. – № 3(28). – С. 88-93.

11. 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.

*Отримано редколегією 13.03.2018*

И.А. Чуб, В.В. Матухно

**Минимизация уровня взрывоопасности технологического блока в условиях взрыва облака газовой смеси**

Приводится общая схема и алгоритмическая реализация метода решения задачи минимизации уровня взрывоопасности технологического блока газонефтеперерабатывающего предприятия в условиях чрезвычайной ситуации со взрывом облака газовой смеси. Снижение уровня взрывоопасности выполняется за счет рационального размещения технологического оборудования.

**Ключевые слова:** облако газо-воздушной смеси, взрыв, минимизация уровня взрывоопасности, рациональное размещение оборудования.

I.A. Chub, V.V. Matukhno

**Minimization of the level of extraction of the technological block in the conditions of the explosion of chemicals of gas-air condition**

The general scheme and algorithmic implementation of the method for solving the problem of minimizing the level of explosion hazard of the technological unit of a gas and oil processing enterprise under conditions of an emergency situation with an explosion of a gas-air mixture cloud is given. Reducing the level of explosion hazard is achieved through the rational placement of technological equipment.

**Keywords:** a cloud of gas-air mixture, explosion, minimal level of explosion, rational arrangement of equipment.