

## УДК 351.861

*Д. Ю. Белюченко, к.т.н., викл. каф. (ORCID 0000-0001-7782-2019)*

*Д. А. Львів, ад'юнкт (ORCID0000-0002-1066-0286)*

*О. І. Сошинський, к.мист., науковий співробітник (ORCID 0000-0002-7921-1294)*

*В. М. Стрілець, д.т.н., професор, с.н.с. відділу (ORCID 0000-0001-5992-1195)*

*І. М. Хмиров, д.держ.упр., доц., с.н.с. відділу (ORCID 0000-0002-7958-463X)*

*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

## МЕТОДИКА СКОРОЧЕННЯ ЧАСУ ОПЕРАТИВНОГО РОЗГОРТАННЯ ПЕРШИМ АВАРІЙНО-РЯТУВАЛЬНИМ ПІДРОЗДІЛОМ

Розроблено методику скорочення часу оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки, яка спирається на використання багатofакторної моделі функціонування системи «рятувальник – оперативно-рятувальна техніка – надзвичайна ситуація». Основу відповідної методики складає скорочення часу оперативних розгортань пожежно-рятувальних автомобілів першим рятувальним підрозділом та розробка та перевірка оперативно-технічних рекомендацій у відповідності до максимальних перепадів в однофакторних моделях, що одержані в центрі та на краях факторного простору для трифакторних поліноміальних моделей в нормованих перемінних, які отримуються за результатами імітаційного (у тому разі фізичного) моделювання оперативних розгортань пожежно-рятувальних автомобілів першим оперативно-рятувальним підрозділом. Дана методика передбачає послідовне виконання чотирьох процедур, а саме: вибір типових для проведення аварійно-рятувальних робіт першим оперативно-рятувальним підрозділом під час ліквідації (локалізації) надзвичайних ситуацій оперативних розгортань пожежно-рятувальних автомобілів; їх імітаційне (у тому разі фізичне моделювання) у відповідності до плану 3x3x3 з урахуванням факторів, які характеризують людину (особовий склад оперативно-рятувального підрозділу), техніку (пожежно-рятувальні автомобілі та їх обладнання, оснащення рятувальників тощо) та середовище (умови оперативної діяльності рятувальників); експертне обґрунтування рекомендацій для впровадження; вибір оперативно-технічних рекомендацій для впровадження в нормативні документи за результатами статистичних оцінок того, наскільки ефективність від їх реалізації є значимою. Для застосування обраного підходу необхідно отримати велику кількість вихідних даних. Крім цього, суттєвим обмеженням розробленого підходу є необхідність залучення висококваліфікованих експертів на всіх етапах реалізації методики.

**Ключові слова:** оперативне розгортання, пожежно-рятувальні автомобілі, скорочення часу, моделювання, ранжування, методика

### 1. Вступ

Сучасна оперативно-рятувальна техніка відрізняється від пожежних автомобілів, які були створені в 60-х роках минулого сторіччя [1]. А саме для них в нормативній документації наведені тактичні прийоми і рекомендації щодо оперативних розгортань. В результаті при застосуванні новітньої пожежно-рятувальної техніки недостатньо враховуються особливості, які відображають вдосконалені тактико-технічні характеристики [2], умови застосування та рівень підготовленості особового складу.

Тому, існує наукова проблема розв'язання протиріччя між новітніми тактико-технічними характеристиками сучасної оперативно-рятувальної техніки та вимогами до тактичних прийомів і рекомендацій щодо оперативних розгортань пожежних автомобілів, які наведені в нормативній документації.

### 2. Аналіз останніх публікацій і постановка проблеми

Питання скорочення часу оперативних розгортань є актуальними у всьому світі. Так, в ЄС особлива увага цьому питанню приділяється в стандарті EN 1846 [3]. При цьому в Німеччині підкреслюється [4], що технічне оснащення

аварійно-рятувального формування визначається конкретними можливостями кожної общини та погодними особливостями кожного регіону. Однак, залишилися поза увагою питання, пов'язані з прибуттям та розгортанням першого підрозділу на місце виклику. Щодо місця виклику це зроблено в [5], де приводяться результати надійної оптимізації розподілу пожежних частин в місті в умовах невідомості місць виникнення пожежі. Але і в цьому випадку не враховуються результати оперативної діяльності особового складу першого пожежно-рятувального підрозділу.

В США в документах FEMA [6] підкреслюється, що особовий склад під час оперативного розгортання рятувальної техніки повинен врахувати місцеві особливості та метеорологічні умови, а також забезпечити оптимальне застосування і раціональне використання пожежно-рятувальної техніки та оснащення. Проте в [3, 4, 6] фактори, які вважаються важливими, не конкретизовані і не доведені до кількісних показників.

Це зроблено в [7], де надані пропозиції щодо оптимізації розміщення обладнання на пожежних автомобілях з урахуванням однофакторних залежностей того часу, який є необхідним для діставання зразків пожежно-технічного озброєння, що використовується найчастіше. Але наведені однофакторні залежності не враховують метеорологічні умови та клас пожежно-рятувальних автомобілів, а також взаємозв'язок між найбільш вагомими факторами. Хоча у [8] наводяться результати розробки найкращих стандартних операційних процедур для запобігання пожежі, відмічається, що ці роботи необхідно виконувати з урахуванням дій, які будуть здійснювати перші пожежні підрозділи, які залежать від множини факторів та пов'язані між собою і є нелінійними. Підтвердженням цього є результати дослідження [9], у відповідності до якого були отримані багатфакторні регресійні залежності часу оперативного розгортання пожежних автомобілів різного класу від умов бойової роботи та рівня підготовленості особового класу. Але і в [9], і в [5, 7, 8] є відсутнім загальний підхід до того, яким чином у відповідності до отриманих математичних моделей, в яких наведені конкретні кількісні показники, що характеризують функціонування системи «рятувальник – оперативно-рятувальна техніка – надзвичайна ситуація», відсутнє обґрунтування конкретних пропозицій. В той же час, в [10] відмічено, що у відповідності до методології імітаційного, у тому разі фізичного, моделювання обґрунтування пропозицій щодо підвищення ефективності проведення аварійно-рятувальних робіт повинно спиратися на аналіз закономірностей здійснення цього процесу, які мають бути отриманими за результатами оцінки того, як функціонує система «рятувальник – аварійно-рятувальне озброєння – середовище».

Таким чином, важливою та нерозв'язаною частиною проблеми є недосконалість сучасних методів та підходів скорочення часу оперативного розгортання першим пожежно-рятувальним підрозділом.

### **3. Мета і завдання дослідження**

Метою дослідження є розробка методики скорочення часу оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки, яка спирається на використання моделі дій першого аварійно-рятувального підрозділу.

Для досягнення поставленої мети потребують розв'язання наступні завдання:

– визначити особливості відбору оперативних розгортань, які є характерними  
civil security. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-35-19

під час ліквідації надзвичайних ситуацій;

–обґрунтувати особливості моделювання дій аварійно-рятувального підрозділу;

–отримати математичні моделі оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки для аналізу;

–конкретизувати та відібрати оперативно-технічні рекомендації для впровадження;

–розробити керуючий алгоритм реалізації методики скорочення часу оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки.

#### 4. Визначення особливостей відбору оперативних розгортань пожежно-рятувальної техніки

На першому етапі відбувається відбір найбільш характерних для реалізації процесу локалізації (ліквідації) надзвичайної ситуації оперативних розгортань пожежно-рятувальної техніки. Він здійснюється за результатами аналізу Звітних матеріалів Державної служби України з надзвичайних ситуацій, в яких відображаються участь перших аварійно-рятувальних підрозділів та залучена ними техніка в ліквідації надзвичайних ситуацій. Із припустимої множини  $W$  визначених в Класифікаторі [11]  $n$  надзвичайних ситуацій:

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}, \quad (1)$$

для подальшого відбирається такий варіант оперативного розгортання  $Q_W^*$ , який в практичній діяльності перших аварійно-рятувальних підрозділів зустрічається найчастіше:

$$\begin{aligned} \max_W N = \text{greatest}(\text{number } w_1, \text{number } w_2, \dots, \text{number } w_n) \\ \Downarrow \\ Q_W^* \end{aligned}, \quad (2)$$

де  $\text{greatest}$ – функція вибору максимального значення кількості конкретного варіанту надзвичайної ситуації  $w_i$  з можливої множини  $W$  надзвичайних ситуацій.

#### 5. Обґрунтування особливостей моделювання дій аварійно-рятувального підрозділу

В процесі функціонування системи під час виконання окремих складових (наприклад, типових операцій оперативного розгортання), які забезпечують проведення АРР для обраного варіанту  $Q^*$ , на інтервалі  $T$  має місце множина ефектів:

$$G^* = \left\langle \left\{ G_k^* \right\}, k = 1, \dots, n_k; \varphi_2: Z_k \times Q^* \times T \rightarrow G_k^* \right\rangle, \quad (3)$$

де  $G_k^*$ – ефект від виконання  $k$ -ої складової обраного варіанту проведення АРР;  $n_k$ – кількість складових для  $Q^*$ ;  $Z_k$ – множина, яка упорядковує зв'язки між елементами множини  $Q^*$  та результатом виконання окремих складових процесу

проведення АРР;  $\varphi_2$  – відображення  $Z_k \times Q^* \times T$  у множину  $G^*$  (визначення ефектів).

Це відображення уявляє собою фактично процес визначення ефектів від реалізації визначених складових обраного варіанту проведення АРР. Такі ефекти можуть бути визначеними як в результаті використання заздалегідь визначених функціональних залежностей:

$$G_k^* = F_k^*(X, T), \quad (4)$$

кожна з яких фактично є закономірністю виконання рятувальниками  $k$ -ої складової обраного процесу проведення АРР, так, і отримані після проведення натурних досліджень. В останньому випадку реалізація  $Z_k$  уявляє собою порядок отримання емпіричних даних.

Якщо окремі властивості системи, у тому разі множина  $G$ , є частковими властивостями системи, то її ефективність уявляє собою нормований до вихідних перемінних  $X$  результат функціонування системи на визначеному інтервалі часу, тобто ефективність проведення обраного варіанту АРР за умови визначення множини  $G$  уявляє собою упорядковану множину:

$$Y^* = \left\langle \left\{ Y_q^* \right\}, q = 1, \dots, n_q; Y_1^* > Y_2^* > \dots > Y_{n_q}^*; \right. \\ \left. \varphi_3 : H_q^* \times X \times G^* \rightarrow Y_q^* \right\rangle, \quad (5)$$

де  $Y_q^*$  –  $q$ -й показник ефективності;  $n_q$  – кількість показників ефективності;  $H_q^*$  – множина (наприклад, технічні засоби підготовки рятувальників, у тому разі штатні пожежно-рятувальні автомобілі), яка встановлює зв'язок між вихідними даними  $X$  та результатами  $G$  виконання окремих складових оперативного розгортання у відповідності до обраного варіанту проведення АРР;  $\varphi_3$  – відображення  $H_q^* \times X \times G^*$  у множину  $Y^*$  (наприклад, визначення показників ефективності за результатами проведення натурних імітаційних експериментів).

Оскільки процес оперативного розгортання уявляє собою процес функціонування системи «рятувальник – оперативно-рятувальна техніка – надзвичайна ситуація» (СРОРТНС), при цьому у якості вихідних перемінних, враховуючи те, що варіант оперативного розгортання  $Q_W^*$  вибирається з урахуванням (1), (2) конкретного варіанту надзвичайної ситуації  $w_i$  з можливої множини  $W$ , виступають показники, що характеризують безпосередньо особовий склад оперативного розрахунку (множина  $X_{РЯТ}$ ), оперативно-рятувальний автомобіль та його обладнання (множина  $X_{ОРА}$ ), умови проведення АРР (множина  $X_{УМ}$ ).

У виразі (5) враховуються як технічні ( $X_{ОРА}$ ), так і оперативні ( $X_{РЯТ}$ ,  $X_{УМ}$ ,  $W$ ,  $Q$ ) складові функціонування системи, внаслідок чого множина  $Y^*$  відображає оперативно-технічний характер проведення аварійно-рятувальних робіт і її можна розглядати як закономірність проведення АРР:

$$Y^* = F^*(X_{РЯТ}, X_{ОРА}, X_{УМ}), \quad (6)$$

у відповідності до обраного варіанту, оскільки вона уявляє собою закономірність, що відображає функціонування системи, встановлюючи об'єктивний, повторюваний за визначених умов зв'язок між показниками якості системи та притаманними їй ефектами.

В [12] відмічено, що впорядкованість множини  $Y^*$  дозволяє перейти від (6) до багатофакторної поліноміальної моделі, в якій необхідно врахувати те, що вихідні фактори можуть мати нелінійний вплив на показники ефективності проведення аварійно-рятувальних робіт та взаємодіяти між собою. Оскільки, у відповідності до [13] порівняльна оцінка обраних для розгляду факторів  $X_{РЯТ}$ ,  $X_{ОРА}$ ,  $X_{УМ}$  повинна виконуватись у відповідних  $X_{РЯТ} \Rightarrow x_1$ ,  $X_{ОРА} \Rightarrow x_2$ ,  $X_{УМ} \Rightarrow x_3$  нормованих перемінних, що дозволяє нелінійний вплив факторів в поліноміальній моделі врахувати квадратичним уявленням відповідних показників, а ефекти взаємодії факторів – відповідним коефіцієнтам при добутках показників, які розглядаються. Тобто, шукана поліноміальна багатофакторна модель дій першого аварійно-рятувального підрозділу, яка буде використовуватись для обґрунтування пропозицій щодо підвищення ефективності функціонування СРОРТНС за результатами ранжування факторів  $x_i$  за ступенем впливу на ефективність проведення АРР, має вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (8)$$

Для отримання (8) у відповідності до [13] доцільно обрати план імітаційного експерименту  $3 \times 3 \times 3$  – традиційний план техніко-економічних експериментів, який використовується при дослідженні впливу окремо кожного з трьох факторів на трьох рівнях (при інших рівних умовах) і має гарні статистичні характеристики та кращі по точності оцінки всіх коефіцієнтів регресії  $\{k_s\}$ . В цьому випадку для реалізації обраного плану достатньо отримати по 27 оцінок середніх значень часу оперативного розгортання за обраним варіантом ліквідації (локалізації) надзвичайної ситуації та по 27 значень відповідних середньоквадратичних відхилень, вихідні дані цілком реально отримати як за результатами імітаційного моделювання відповідних дій рятувальників біля осередку надзвичайної ситуації на ЕОМ, так і за результатами фізичного моделювання дій особового складу.

## 6. Отримання математичних моделей оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки

При проведенні багатофакторного імітаційного моделювання у відповідності до обраного плану найгірші показники відповідають рівню "–1 – 1 – 1", середні – рівню "0 0 0", а найкращі – "+1 + 1 + 1".

Зміна відібраних факторів на трьох рівнях через рівні інтервали дозволяє суттєво спростити побудову поліноміальних моделей, які необхідно знайти, оскільки в результаті цього під час розрахунку оцінок коефіцієнтів  $b_0, b_1, b_{ii}, b_{ij}$  можна використовувати [13] готові формули:

$$b_0 = A_0(OY) - \sum A_{0i}(iiY), \quad (9)$$

$$b_i = A_i(iY), \quad (10)$$

$$b_{ij} = A_{ij}(ijY), \quad (11)$$

$$b_{ii} = A_{ii}(iiY) - A_{0i}(OY), \quad (12)$$

де  $A_0, A_{0i}, A_i, A_{ij}, A_{ii}$  – постійні для розрахунку коефіцієнтів регресії при симетричних планах;  $OY, iiY, iY, ijY$  – суми результатів експериментів.

Практика багатofакторного моделювання [9, 14–16] показала, що для аналізу отриманої за експериментальними результатами, які проводились у відповідності до плану  $3 \times 3 \times 3$ , моделі (8), коефіцієнти якої визначались за допомогою (9–12), після перевірки гіпотези однорідності ряду дисперсій по  $\sigma$ -критерію Кохрена [14]:

$$Kh = \frac{(\sigma_u^2)_{\max}}{\sum_{n=1}^n \sigma_n^2}, \quad (13)$$

де  $(\sigma_u^2)_{\max}$  – максимальна дисперсія в ряду, що розглядається;  $n=27$  – кількість точок обраного плану  $3 \times 3 \times 3$  можна користуватись середньої нормованою дисперсією отриманих експертних оцінок:

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{27} \cdot \sum_{n=1}^{27} \sigma_n^2. \quad (14)$$

Це дозволяє для розрахунку значень дисперсій оцінок отриманих коефіцієнтів також використовувати готові [13] вирази:

$$\sigma_{\bar{x}}\{b_0\} = A_0 \cdot \sigma_{\bar{x}}, \quad (15)$$

$$\sigma_{\bar{x}}\{b_i\} = A_i \cdot \sigma_{\bar{x}}, \quad (16)$$

$$\sigma_{\bar{x}}\{b_{ij}\} = A_{ij} \cdot \sigma_{\bar{x}}, \quad (17)$$

$$\sigma_{\bar{x}}\{b_{ii}\} = A_{ii} \cdot \sigma_{\bar{x}}, \quad (18)$$

які застосовуються для обчислювання відповідних критичних значень:

$$b_{кр} = t \cdot \sigma\{b\}, \quad (19)$$

де  $t$  береться по таблицям [17] при обраному рівні значимості  $\alpha$  та числі ступенів свободи  $f=27$ .

Використання (19) дозволяє спростити для аналізу кінцеву модель (8) за рахунок вилучення незначних ефектів. Зазвичай в інженерних розрахунках приймається рівень значимості  $\alpha=0,05$  під час перевірки ступеня ризику відвернути правильну гіпотезу [13]. В той же час, оскільки розробка оперативних рекомендацій

відноситься до пошукових робіт, доцільно розглянути випадки, коли для аналізу приймається двосторонній ризик  $\alpha=0,1-0,2$  або, навіть,  $\alpha=0,5$  (на стадії початку пошукових робіт), коли по відповідному графу робиться обережний «рівно можливий» висновок.

В результаті можна перейти до ранжування по максимальному перепаду  $\Delta y$  в однофакторних моделях  $y=f_i(x_i)$ , що одержані при стабілізації інших факторів  $x_i$  на рівнях, що відповідають координатам екстремумів  $y_{\min}$  та  $y_{\max}$ , а також в центрі факторного простору (табл. 1).

Табл. 1. Однофакторні моделі  $y = f_i(x_i)$  при різних умовах стабілізації

	В зоні максимуму	В центрі факторного простору	В зоні мінімуму
1	2	3	4
$x_1$	$y = (b_0 - b_2 - b_3 + b_{22} + b_{33}) + (b_1 - b_{12} - b_{13}) \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_{11}^2$	$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_{11}^2$	$y = (b_0 + b_2 + b_3 + b_{22} + b_{33}) + (b_1 + b_{12} + b_{13}) \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_{11}^2$
$x_2$	$y = (b_0 - b_1 - b_3 + b_{11} + b_{33}) + (b_2 - b_{12} - b_{23}) \cdot x_2 + b_{22} \cdot x_{22}^2$	$y = b_0 + b_2 \cdot x_2 + b_{22} \cdot x_{22}^2$	$y = (b_0 + b_1 + b_3 + b_{11} + b_{33}) + (b_2 + b_{12} + b_{23}) \cdot x_2 + b_{22} \cdot x_{22}^2$
$x_3$	$y = (b_0 - b_1 - b_2 + b_{11} + b_{22}) + (b_3 - b_{13} - b_{23}) \cdot x_3 + b_{33} \cdot x_{33}^2$	$y = b_0 + b_3 \cdot x_3 + b_{33} \cdot x_{33}^2$	$y = (b_0 + b_1 + b_2 + b_{11} + b_{22}) + (b_3 + b_{13} + b_{23}) \cdot x_3 + b_{33} \cdot x_{33}^2$

Для визначення того, які вихідні чинники вимагають першочергової уваги в центрі факторного простору ( $x_0^{(1)}$ ) та на його краях ( $x_{\min}^{(1)}; x_{\max}^{(1)}$ ) необхідно проранжувати  $y$  відповідності з вагою коефіцієнтів при відповідній змінній в центрі факторного простору:

$$\left( x_0^{(1)} \geq x_0^{(2)} \geq x_0^{(3)} \right) = \text{rang} \left\{ \begin{array}{l} |b_{y_0(x_1)}| \\ |b_{y_0(x_2)}| \\ |b_{y_0(x_3)}| \end{array} \right\} \quad (20)$$

та на його краях:

$$\left( x_{\min(\max)}^{(1)} \geq x_{\min(\max)}^{(2)} \geq x_{\min(\max)}^{(3)} \right) = \text{rang} \left\{ \begin{array}{l} \left| b_{y_{\min(\max)}(x_1)} \right| \\ \left| b_{y_{\min(\max)}(x_1)} \right| \\ \left| b_{y_{\min(\max)}(x_n)} \right| \end{array} \right\}. \quad (21)$$

Аналіз ваги коефіцієнтів в однофакторних моделях (табл. 1) у відповідності до (20–21) дозволить провести ранжування обраних факторів та визначити, який з них є найбільш вагомим та навпаки у кожній зоні, а також, як вони взаємодіють між собою.

### 7. Конкретизація та відбір оперативно-технічних рекомендацій для впровадження

Висновки за ранжуванням ваги факторів та їх взаємодії стануть основою конкретних рекомендацій, які відобразять як оперативну, так і технічну процесу оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки під час ліквідації (локалізації) надзвичайної ситуації.

Під час вибору із множини  $R$  наданих у відповідності до (20–21) фахівцями  $m$  рекомендацій:

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}, \quad (22)$$

може мати [18] місце ситуація, коли експерти по різному вважають, наскільки вагомо конкретна рекомендація вплине на підсумковий ефект  $G$ .

Для того, щоб врахувати цей недолік, пропонується експертам оцінити відносну вагу кожної рекомендації:

$$a_{r_i} = \frac{\sum_{j=1}^n a_{r_{ij}}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m a_{r_{ij}}}, \quad (22)$$

де  $a_{r_{ij}}$  – оцінка ваги  $i$ -ої рекомендації, яку надав  $j$ -ий експерт;  $n$  – кількість можливих рекомендацій;  $m$  – кількість експертів.

Для першочергового впровадження рекомендується обрати ті рекомендації, які мають найбільшу вагу (22).

Для оцінки того, чи доцільно ці рекомендації впроваджувати в практичну діяльність, необхідно перевірити, наскільки значимо будуть відрізнятись обрані показники ефективності проведення аварійно-рятувальних робіт, отримані до і після впровадження рекомендацій. З цією метою необхідно спочатку визначити як зміняться закономірності (4) виконання рятувальниками  $k$ -ої складової СРОРТНС:

$$G_{k'}' = F_{k'}'(X - \Delta X, T), \quad (23)$$



де  $\Delta X$  – зміни у множині вихідних перемінних за визначеними після аналізу результатів ранжування в різних зонах рекомендацій, у тому разі пов'язаних із можливою ситуацією зміни початкового варіанту  $k$  проведення аварійно-рятувальних робіт.

Оскільки визначення (23) відбувається як етап прогнозованої порівняльної оцінки, його здійснення можливе як шляхом використання методу безпосередніх експертних оцінок, так і шляхом обґрунтування з урахуванням пропозицій фахівців нових нормативних показників оперативної діяльності рятувальників.

При цьому необхідно відмітити, що оскільки під час ліквідації (локалізації) надзвичайної ситуації особовий склад першого оперативного-рятувального підрозділу в залежності від ситуації може використовувати різні варіанти оперативного розгортання пожежно-рятувальних автомобілів за результатами імітаційного (у тому разі фізичного) експерименту можуть бути отримані різні моделі, в яких будуть відрізнятися відповідні коефіцієнти регресії  $\{k_s\}$ , їх оцінка у відповідності до (20–21) та (табл. 1) проводиться для кожної моделі окремо.

Це дозволить конкретизувати оперативні-технічні рекомендації тим більше, що в кожній зоні факторного простору можна порівняти рангові послідовності за коефіцієнтами відповідних трифакторних поліномів після спрощення отриманих моделей.

## **8. Розробка керуючого алгоритму реалізації методики скорочення часу оперативного розгортання**

Результати розв'язання завдань відбору оперативних розгортань, обґрунтування особливостей моделювання дій аварійно-рятувального підрозділу, отримання математичних моделей оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки першим аварійно-рятувальним підрозділом, а також конкретизації та відбору оперативних-технічних рекомендацій для впровадження дозволяють представити керуючий алгоритм реалізації методики скорочення часу оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки у вигляді, який наведено на рис.1.

Керуючий алгоритм (рис.1) складається з 12 блоків, що розміщені на 10 рівнях.

На першому рівні алгоритму відбувається експертний відбір найбільш характерних для реалізації процесу локалізації (ліквідації) надзвичайної ситуації.

На другому рівні відбувається моделювання (як правило, фізичне) оперативних розгортань пожежно-рятувальних автомобілів першим оперативним-рятувальним підрозділом у відповідності до обраного плану.

Оперативні розгортання здійснюються особовим складом відповідних підрозділів під час практичних занять та тактико-спеціальних занять на штатних або новітніх зразках оперативного-рятувальної техніки з урахуванням діючих нормативних вимог з охорони праці.

Отримані результати виконання оперативних розгортань на третьому рівні використовуються для отримання моделей типу (8) у вигляді трифакторних нелінійних поліноміальних залежностей часу оперативного розгортання від обраних факторів, що розглядаються в нормованому діапазоні від «-1» до «+1», за допомогою стандартних пакетів прикладних програм, які реалізують вирази (9–12) для визначення коефіцієнтів моделі (8).

На наступному етапі проводиться інтерпретація отриманої моделі (8) при наростаючому ступені ризику відвернути правильну гіпотезу.

Для цього поряд з коефіцієнтами моделі (9–12) використовуються дисперсії

оцінок отриманих коефіцієнтів (13–18). Це дозволяє перевірити значимість коефіцієнтів перевірити від рівня значимості  $\alpha = 0,01$  до  $\alpha = 0,2$ , враховуючи під час оцінки похибок розрахунку коефіцієнтів регресії середню дисперсію вимірів. В результаті без втрати інформації, яка є важливою для обґрунтування оперативнотехнічних рекомендацій, підсумкова модель може бути суттєво спрощеною.

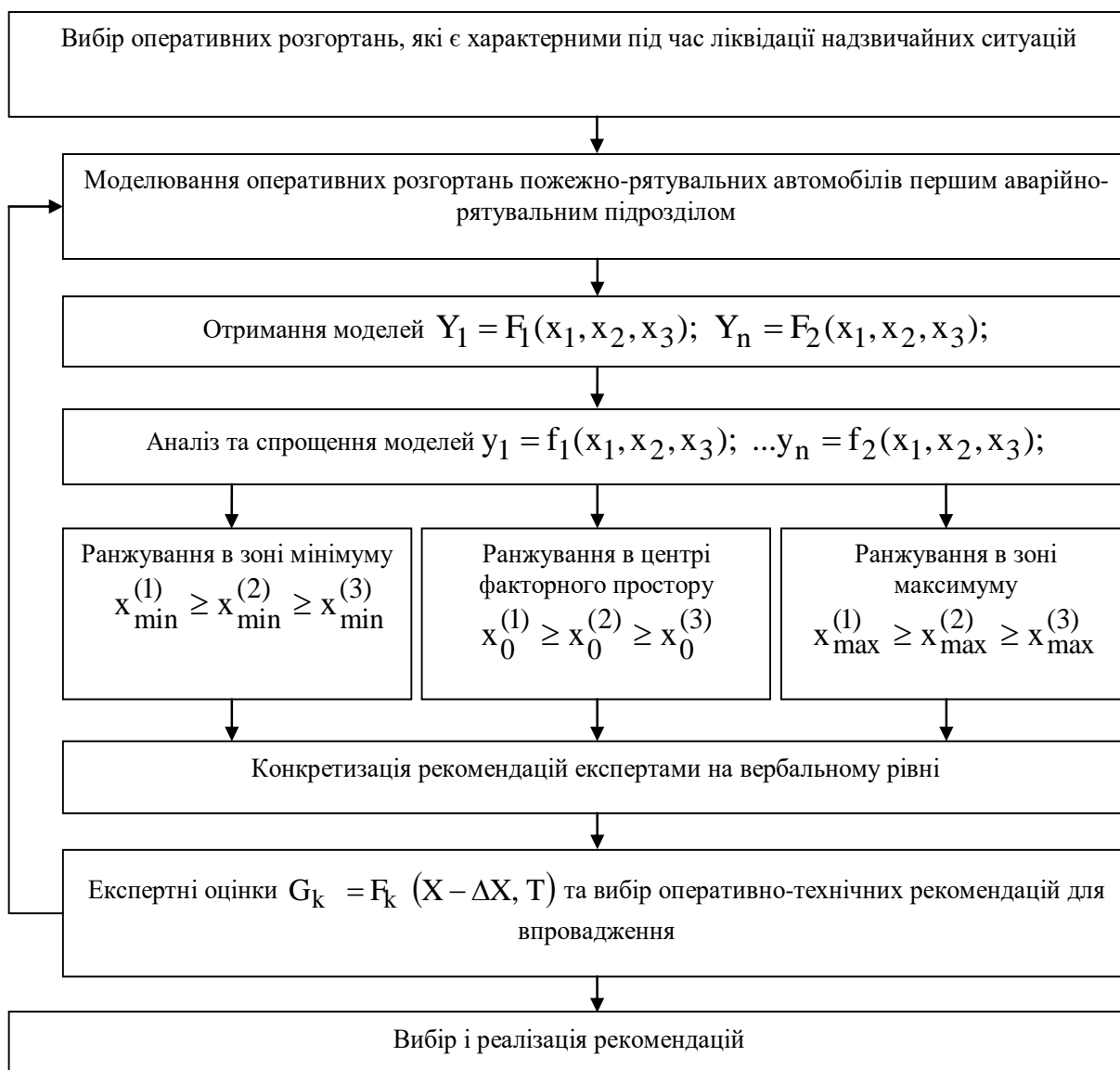


Рис. 1. Схема керуючого алгоритму реалізації методики скорочення часу оперативних розгортань першим рятувальним підрозділом під час ліквідації надзвичайних ситуацій

На п'ятому етапі відбувається ранжування по максимальному перепаду  $\Delta u$  в однофакторних моделях, що одержані при стабілізації інших факторів  $x_j$  на рівнях, що відповідають координатам екстремумів  $u_{\min}$  та  $u_{\max}$ , а також в центрі факторного простору.

Аналіз ваги коефіцієнтів в однофакторних моделях у відповідності до (20–21) дозволяє провести ранжування обраних факторів та визначити, який з них є найбільш вагомим та навпаки, у кожній зоні.

Ці висновки на шостому етапі стають основою для конкретизації експертними фахівцями в галузі організації та безпосереднього здійснення аварійно-рятувальних робіт під час ліквідації (локалізації) надзвичайних ситуацій рекомендацій.

ндацій щодо скорочення часу оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки на вербальному рівні.

На сьомому етапі відбувається експертне оцінювання можливого ефекту від реалізації запропонованих рекомендацій, за результатами якого здійснюється відбір конкретних оперативно-технічних, оскільки обрані фактори характеризують як технічну, так і оперативну складові, рекомендацій для впровадження в повсякденну діяльність оперативно-рятувальних підрозділів.

З урахуванням реалізації запропонованих рекомендацій на восьмому етапі здійснюється моделювання (як правило, фізичне) по аналогії з другим етапом.

Порівняння отриманих результатів проведення оперативних розгортань пожежно-рятувальних автомобілів з тими, які були спочатку, дозволяє на дев'ятому етапі не тільки визначити показники ефективності (в першу чергу часу оперативного розгортання) від реалізації запропонованих оперативно-технічних рекомендацій, але й оцінити їх значимість.

Якщо ефективність є значимою, то на останньому етапі розроблені оперативно-технічні рекомендації впроваджуються в нормативні документи, які регламентують діяльність першого оперативно-рятувального підрозділу.

## **9. Обговорення результатів розробки методики скорочення часу оперативного розгортання**

Сильною стороною отриманих результатів є створення нової методики скорочення часу оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки, що спирається на використання багатofакторної поліноміальної моделі дій першого аварійно-рятувального підрозділу під час ліквідації надзвичайних ситуацій, що розглядаються як функціонування системи «рятувальник – оперативно-рятувальна техніка – надзвичайна ситуація».

Основу методики складає розробка та перевірка оперативно-технічних рекомендацій у відповідності до максимальних перепадів в однофакторних моделях, що одержані в центрі та на краях факторного простору для трифакторних поліноміальних моделей в нормованих перемінних, які отримуються за результатами імітаційного (у тому разі фізичного) моделювання оперативних розгортань пожежно-рятувальних автомобілів першим оперативно-рятувальним підрозділом.

Передбачає послідовне виконання чотирьох процедур, а саме:

- вибір типових для проведення аварійно-рятувальних робіт першим оперативно-рятувальним підрозділом під час ліквідації (локалізації) надзвичайних ситуацій оперативних розгортань пожежно-рятувальних автомобілів;

- їх імітаційне (у тому разі фізичне моделювання) у відповідності до плану 3x3x3 з урахуванням факторів, які характеризують людину (особовий склад оперативно-рятувального підрозділу), техніку (пожежно-рятувальні автомобілі та їх обладнання, оснащення рятувальників тощо) та середовище (умови оперативної діяльності рятувальників);

- експертне обґрунтування рекомендацій для впровадження;

- вибір оперативно-технічних рекомендацій для впровадження в нормативні документи за результатами статистичних оцінок того, наскільки ефективність від їх реалізації є значимою.

Слабкою стороною застосування обраного підходу є необхідність отримання великої кількості вихідних даних. Це вимагає проведення для кожного варіанту

оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки особовим складом оперативно-рятувальних підрозділів багаточисельних натурних експериментальних досліджень у разі фізичного моделювання або створення імітаційної моделі діяльності оперативних розрахунків для здійснення багатофакторного моделювання системи «рятувальник – оперативно-рятувальна техніка – надзвичайна ситуація» на ЕОМ.

Крім цього, суттєвим обмеженням розробленого підходу є необхідність залучення висококваліфікованих експертів на всіх етапах реалізації методики.

В процесі реалізації розробленої методики відкриваються можливості обґрунтування тактико-технічних вимог до новітніх зразків як пожежно-рятувальних автомобілів, так й інших видів озброєння рятувальників, визначення та коригування особливостей підготовки особового складу оперативно-рятувальних підрозділів, а також вдосконалення процесу планування, включаючи розробку планів ліквідації можливих надзвичайних ситуацій як техногенного, так і природнього характеру.

Серед загроз, пов'язаних з реалізацією методики скорочення часу оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки, що спирається на використання багатофакторної поліноміальної моделі дій першого аварійно-рятувального підрозділу, слід виділити те, що деякі пропозиції недостатньо фахових експертів можуть сприяти порушенню вимог з охорони праці, а визначені тактико-технічні вимоги бути недосяжними на існуючому рівні розвитку науки і техніки.

## 10. Висновки

1. Визначено, що для дослідження за результатами аналізу звітних матеріалів Державної служби України з надзвичайних ситуацій, в яких відображається участь перших аварійно-рятувальних підрозділів та залучена ними техніка для ліквідації надзвичайних ситуацій, обираються такі варіанти оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки, які в практичній діяльності перших аварійно-рятувальних підрозділів зустрічаються найчастіше. Основою вибору припустимої множини надзвичайних ситуацій для розгляду є множина надзвичайних ситуацій, яка визначена в діючому Класифікаторі надзвичайних ситуацій.

2. Обґрунтовано особливості моделювання дій аварійно-рятувального підрозділу. Визначено, що при цьому у якості вихідних перемінних математичної моделі виступають показники, що характеризують безпосередньо особовий склад оперативного розрахунку, пожежно-рятувальний автомобіль та його обладнання, умови проведення аварійно-рятувальних робіт. Процес оперативного розгортання уявляє собою процес функціонування системи «рятувальник – оперативно-рятувальна техніка – надзвичайна ситуація», при цьому у якості вихідних перемінних математичної моделі виступають показники, що характеризують безпосередньо особовий склад оперативного розрахунку, пожежно-рятувальний автомобіль та його обладнання, умови проведення аварійно-рятувальних робіт. Моделювання оперативного розгортання пожежно-рятувальних автомобілів у відповідності до традиційного плану проведення техніко-економічних експериментів дозволяє отримати трифакторну поліноміальну модель, яка дозволить дослідити вплив окремо кожного з трьох факторів на трьох рівнях (при інших рівних умовах) і має гарні статистичні характеристики та кращі по точності оцінки всіх коефіцієнтів регресії.

3. Отримано математичні моделі оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки для аналізу у вигляді поліноміальних залежностей, отрима-

них за допомогою загальноприйнятих готових формул, які враховують зміну відібраних факторів на трьох рівнях через рівні інтервали. Для оцінки відповідних коефіцієнтів таких моделей можна користуватись середньою нормованою дисперсією отриманих оцінок. Спрощення отриманих моделей за рахунок вилучення незначних ефектів дозволяє перейти до ранжування по максимальному перепаду в однофакторних моделях, що одержані при стабілізації інших факторів на рівнях, що відповідають координатам екстремумів, а також в центрі факторного простору. Аналіз ваги коефіцієнтів в однофакторних моделях дозволяє провести ранжування обраних факторів та визначити, який з них є найбільш вагомим та навпаки у кожній зоні, а також, як вони взаємодіють між собою.

Зміна відібраних факторів на трьох рівнях через рівні інтервали дозволяє використовувати готові формули для отримання поліноміальної математичної моделі, для оцінки відповідних коефіцієнтів якої можна користуватись середньою нормованою дисперсією отриманих оцінок. Спрощення отриманої моделі за рахунок вилучення незначних ефектів дозволяє перейти до ранжування по максимальному перепаду однофакторних моделей, що одержані при стабілізації інших факторів на рівнях, що відповідають координатам екстремумів, а також в центрі факторного простору.

4. Визначено, що конкретизація та відбір конкретних рекомендації для впровадження, як оперативної, так і технічної складової процесу оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки під час ліквідації (локалізації) надзвичайної ситуації, здійснюється за результатами ранжування ваги факторів та їх взаємодії. Основою конкретних рекомендацій, які відобразять як оперативну, так і технічну сторону процесу оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки під час ліквідації (локалізації) надзвичайної ситуації є висновки за ранжуванням ваги факторів та їх взаємодії.

5. Розроблено керуючий алгоритм реалізації методики скорочення часу оперативного розгортання пожежно-рятувальної техніки, який передбачає послідовне виконання чотирьох процедур, а саме: вибір типових для проведення аварійно-рятувальних робіт першим оперативно-рятувальним підрозділом під час ліквідації (локалізації) надзвичайних ситуацій оперативних розгортань пожежно-рятувальних автомобілів; їх імітаційне (у тому разі фізичне моделювання) у відповідності до плану 3x3x3 з урахуванням факторів, які характеризують людину (особовий склад оперативно-рятувального підрозділу), техніку (пожежно-рятувальні автомобілі та їх обладнання, оснащення рятувальників тощо) та середовище (умови оперативної діяльності рятувальників); експертне обґрунтування рекомендацій для впровадження; вибір оперативно-технічних рекомендацій для впровадження в нормативні документи за результатами статистичних оцінок того, наскільки ефективність від їх реалізації є значимою.

## Література

1. Наказ МНС України від 26.04.2018 № 340 «Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#Text>

2. Присяжнюк В. В., Якіменко М. Л., Кухарішин С. Д. Аналіз сучасного стану парку пожежних і пожежно-рятувальних автомобілів в Україні та ефективнос-

ті дій пожежно-рятувальних підрозділів. Науковий вісник УкрНДІПБ. 2013. 1(27). С. 68–74. URL: [http://firesafety.at.ua/visnyk/2013\\_No\\_1-27/15\\_Prisyazhnyuk\\_Jakimenko\\_Kukharishyn.pdf](http://firesafety.at.ua/visnyk/2013_No_1-27/15_Prisyazhnyuk_Jakimenko_Kukharishyn.pdf)

3. BS EN 1846-2:2009+A1:2013 Firefighting and rescue service vehicles. Common requirements. Safety and performance. doi: 10.3403/30233210

4. Emergency Incident Rehabilitation February. 2018. URL: [https://www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/publications/fa\\_314.pdf](https://www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/publications/fa_314.pdf)

5. Ming, J., Richard, JP. P., Qin, R. Distributionally robust optimization for firestation location under un certainties. SciRep. 2022. Vol. 12. 5394. doi: 10.1038/s41598-022-08887-6

6. Standard on Fire Department Occupational Safety and Health Program. NFPA 1500. 2012. URL: <http://www.fsans.ns.ca/pdf/research/nfpa1500.pdf>

7. Nowicki T. Optimization of equipment deployment on fire trucks. MATEC WebConf. № 125(02016). doi: 10.1051/matecconf/201712502016

8. Duncan, M. D., Littau, S. R., Kurzius-Spencer, M. Development of Best Practice Standard Operating Procedures for Prevention of Fireground Injuries. Fire Technol 50. 2014. P. 1061–1076. doi: 10.1007/s10694-013-0342-9

9. Белюченко Д. Ю., Стрілець В. М. Багатофакторна оцінка ефективності оперативного розгортання пожежних автомобілів в умовах виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Комунальне господарство міст. 2018. № 156. С. 204–211. doi: 10.33042/2522-1809-2020-3-156-204-211

10. Zelnio H., Fendley M. Human performance modelling for image analyst decision support design. International Journal of Human Factors Modelling and Simulation. 2018. Vol. 6:2–3. P.184–202. doi: 10.1504/IJHFMS.2018.093183

11. Наказ Держспоживстандарту від 11.10.2010 р. № 457 «Класифікатор надзвичайних ситуацій ДК 019:2010».

12. Камишенцев Г., Соловйов І., Белюченко Д. Стрілець В. «Інформаційно-технічний метод попередження надзвичайних ситуацій шляхом комплексного використання систем акустичного контролю в контексті процесу функціонування системи «надзвичайна ситуація – аварійно-рятувальні роботи – рятувальник». Науковий журнал «Інженерія природокористування». 2020. № 3(17). С. 133–139. doi: 10.37700/enm.2020.3(17).133-139

13. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. Финансы и статистика. 1981. 263 с.

14. Стрелец В. М. Многофакторная оценка пожарно-спасательных работ на станциях метрополитена. Проблемы пожарной безопасности. 2004. № 15. С. 208–214.

15. Васильев М. В., Стрелец В. М., Тригуб В. В. Анализ многофакторной модели функционирования системы «спасатель – средства защиты и ликвидации аварии – чрезвычайная ситуация с выбросом опасного химического вещества». Проблеми надзвичайних ситуацій. 2013. № 18. С. 22–33. [https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol18/Pns\\_2013\\_18\\_6.pdf](https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol18/Pns_2013_18_6.pdf)

16. Соловйов І. І., Стрілець В. М., Льовін Д. А. Багатофакторна модель підйому водолазом-сапером вибухонебезпечного предмету. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. № 34. С. 272–294. doi: 10.52363/2524-0226-2021-34-20

17. Bealt J., Shaw D., Smith C. M., López-Ibáñez. M. Peer reviews for making cities resilient. International Journal of Emergency Management (IJEM). 2019. Vol. 15. № 4. P. 334–359. doi: 10.1504/IJEM.2019.104201

civil security. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-35-19

*D. Beliuchenko, PhD, Lecturer of the Department*

*D. Lovin, Adjunct*

*A. Soshunsky, PhD, Researcher of the Department*

*V. Strelets, DSc, Professor, Senior Researcher of the Department*

*I. Khmyrov, DPa, Associate Professor, Senior Researcher of the Department*

*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

## **METHOD OF REDUCING THE TIME OF OPERATIONAL DEPLOYMENT BY THE FIRST EMERGENCY RESCUE DEPARTMENT**

The application of experimental research planning methods showed that the obtained multifactor models of operation of the system "rescuer – rescue equipment – emergency" should be the basis of appropriate methods to reduce the time of operational deployment of fire and rescue vehicles by the first rescue unit during emergencies. The basis of this methodology is the development and verification of operational and technical recommendations in accordance with the maximum differences in one-factor models obtained in the center and at the edges of factor space for three-factor polynomial models in normalized variables. Deployments of fire and rescue vehicles by the first operational and rescue unit, provides for the sequential implementation of four procedures, namely: their simulation (in that case physical modeling) in accordance with the 3x3x3 plan, taking into account the factors that characterize the person (personnel of the rescue unit), equipment (fire and rescue vehicles and their equipment, rescue equipment, etc.) and environment (operational conditions rescuers' activities); expert substantiation of recommendations for implementation; selection of operational and technical recommendations for implementation in regulatory documents based on the results of statistical assessments of how effective their implementation is. At the same time, it should be borne in mind that to apply the chosen approach it is necessary to obtain a large amount of source data. In addition, a significant limitation of the developed approach is the need to involve highly qualified experts at all stages of the methodology.

**Keywords:** operational deployment, fire and rescue vehicles, modeling, ranking

### **References**

1. On approval of the Charter of emergency actions of governing bodies and units of the operational and rescue service of civil protection and the Charter of actions of governing bodies and units of the operational and rescue service of civil protection in fighting fires. Order of the Ministry of Emergency Situations of Ukraine 04.26.2018 № 340. Information and documentation. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#Text>
2. Prysyzhnyiuk, V., Yakimenko, M., Kukharishin, S. (2013). Analysis of the current state of the fleet of fire and rescue vehicles in Ukraine and the effectiveness of fire and rescue units. Scientific Bulletin of the Ukr RIFS, 1(27), 68–74. Retrieved from: [http://firesafety.at.ua/visnyk/2013\\_No\\_1-27/15\\_Prisyazhnyuk\\_Jakimenko\\_Kukharishyn.pdf](http://firesafety.at.ua/visnyk/2013_No_1-27/15_Prisyazhnyuk_Jakimenko_Kukharishyn.pdf)
3. Firefighting and rescue service vehicles. Common requirements. Safety and performance. BS EN 1846-2:2009+A1:2013 Information and documentation. doi: 10.3403/30233210
4. Emergency Incident Rehabilitation. February. (2018). URL: [www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/publications/fa\\_314.pdf](http://www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/publications/fa_314.pdf) Information and documentation.
5. Ming, J., Richard, JP. P., Qin, R. (2022). Distributionally robust optimization for fire station location under uncertainties. Sci Rep 12, 5394. doi: 10.1038/s41598-022-08887-6
6. Standard on Fire Department Occupational Safety and Health Program. NFPA 1500. (2012). Edition. URL: [www.fsans.ns.ca/pdf/research/nfpa1500.pdf](http://www.fsans.ns.ca/pdf/research/nfpa1500.pdf) Information and documentation

7. Nowicki, T. (2017). Optimization of equipment deployment on firetrucks. MATEC WebConf, 125, 02016. doi: 10.1051/mateconf/201712502016
8. Duncan, M. D., Littau, S. R., Kurzius-Spencer, M. (2014). Development of Best Practice Standard Operating Procedures for Prevention of Fireground Injuries. Fire Technol, 50, 1061–1076. doi: 10.1007/s10694-013-0342-9
9. Belyuchenko, D., Strelets, V., (2020). Multivariate assessment of the effectiveness of the operational development of fire trucks in the face of industrial emergencies. Municipal Economy of Cities, Series: Engineering science and architecture, 3, 156, 204–211. doi: 10.33042/2522-1809-2020-3-156-204-211
10. Zelnio, H., Fendley, M. (2018). Human performance modelling for image analyst decision support design. International Journal of Human Factors Modelling and Simulation, 6, 2–3, 184–202. doi : 10.1504/IJHFMS.2018.093183
11. Klyasyfikator nadzvychainykh sytuatsii DK 019:2010. 10.11.2010 Edition. 457. Information and documentation.
12. Kamyshentsev, H. V., Soloviov, I. I., Belyuchenko, D. Yu., Strelets, V. M. (2020). Information and technical method for preventing emergency situations by the integrated use of acoustic control systems in the context process of functioning of the system "emergency situation – rescue operations – rescuer". Engineering of nature management, 3(17), 133–139. doi: 10.37700/enm.2020.3(17).133-139
13. Voznesenskiy, V. A. (1981). Statisticheskiye metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyakh. Finansy i statistika, 263.
14. Strelets, V., Borody`ch, P. (2004). Multifactorial assessment of fire and rescue operations at metro stations. Problems of Fire Safety, 15, 208–214.
15. Vasil`ev, M., Strelec, V., Trigub, V. (2013). Analysis of multifactor model of the system "rescuers – protection and emergency response – emergency release of hazardous chemicals". Problems of Emergency Situations, 18, 22–33. URL: nucz.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol18/Pns\_2013\_18\_6.pdf
16. Soloviov, I., Strelets, V., Lovin, D. (2021). Multifactor model of excavation on an explosive subject dive. Problems of Emergency Situations, 2(34), 272–294. doi: 10.52363/2524-0226-2021-34-20
17. Bealt, J., Shaw, D., Smith, M., López-Ibáñez, M. (2019). Peer reviews for making cities resilient. International Journal of Emergency Management (IJEM), 15, 4, 334 – 359. doi: 10.1504/IJEM.2019.104201

Надійшла до редколегії: 22.04.2022

Прийнята до друку: 17.06.2022