

УДК 614.84

*О. Є. Басманов, д.т.н., професор, голов. н.с. відділу (ORCID 0000-0002-6434-6575)**Д. І. Савельєв, к.т.н., ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-4310-0437)**Р. С. Мележик, н.с. відділу (ORCID 0000-0001-6425-4147)**Т. О. Луценко, к.н. держ.управл., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-7373-4548)**Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

## АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ ТЕХНІКИ МІЖ ПОЖЕЖНИМИ ПІДРОЗДІЛАМИ

Об'єктом дослідження є процес функціонування пожежних підрозділів, а предметом дослідження – розподіл техніки між підрозділами, що обслуговують певну область. Побудовано алгоритм оптимального розподілу техніки між пожежними підрозділами. На практиці це відкриває можливості для зменшення часу слідування пожежних підрозділів до місця виклику за рахунок зміни зон обслуговування підрозділами. Модель спирається на припущення про достатність сил та засобів в пожежних підрозділах для проведення рятувальних робіт і ліквідації пожеж в області їх обслуговування. Модель виходить із розбиття всієї області відповідальності на окремі підобласті або виділення окремих об'єктів, для яких відомий перелік можливих аварійних ситуацій, пов'язаних з пожежами, їх частота, сили і засоби, необхідні для їх ліквідації. Джерелом такої інформації можуть бути статистичні дані щодо пожеж на таких об'єктах або розрахункові дані щодо рівня пожежної небезпеки. Сформульовано задачу оптимального визначення області відповідальності рятувальних підрозділів. Критерієм оптимізації є мінімум часу слідування підрозділів від місця розташування до місця виклику. Цільова функція включає в себе як час слідування, так і кількість одиниць техніки, залученої до ліквідації пожежі. Це дозволяє врахувати складність аварійної ситуації, оскільки більш складні ситуації будуть вимагати залучення більшої кількості техніки і підрозділів. Обмеження задачі визначаються наявними силами і засобами в пожежних підрозділах. Побудовано алгоритм оптимального розподілу техніки між існуючими пожежними підрозділами. Показано, що область припустимих рішень є опуклою. Побудована модель може бути використана для визначення зон обслуговування вже існуючих пожежних підрозділів, а також при виборі місць розташування додаткових пожежних підрозділів.

**Ключові слова:** локальна територія, рівень небезпеки, функціональна спроможність, район обслуговування, розміщення підрозділів

### 1. Вступ

Захист життя людей і їх майна є основною задачею пожежних підрозділів. Кількісний і якісний склад, а також територіальне розташування цих підрозділів визначається впливом двох протилежних факторів. З одного боку, для зменшення наслідків пожеж необхідно збільшення кількості пожежних підрозділів. З іншого боку, зменшення витрат на їх функціонування вимагає їх зменшення. Враховуючи, що сили і засоби, необхідні для ліквідації пожеж, зосереджені в пожежних підрозділах, виникає питання щодо місць їх розміщення. При цьому критично важливим є час слідування підрозділів до місця виклику [1]. Крім того, різна функціональна спроможність окремих пожежних підрозділів вимагає врахування типу аварії і кількості сил і засобів, які мають бути залучені для її ліквідації. Особливого значення це набуває в містах, де тенденція до висотної забудови призводить до необхідності створення нових пожежних частин або до збільшення спроможностей вже існуючих [2]. Швидке реагування на аварійні ситуації відіграє важливу роль у порятунку життів. Правильний розподіл центрів реагування на надзвичайні ситуації, таких як пожежні підрозділи, сприяє зниженню рівня смертності внаслідок пожеж [3].

Таким чином, актуальною є проблема невідповідності територіального розміщення пожежних підрозділів та їх функціональних спроможностей щодо ефектної ліквідації пожеж в зоні їх обслуговування.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В [4] проаналізовано статистику пожеж в містах, взаємозв'язки між соціально-економічними факторами і різними типами пожеж, виявлено часові тенденції. При цьому можливості покращення реагування пожежних підрозділів на аварійні ситуації залишено поза увагою. В [5] проаналізовано вплив заторів на час слідування пожежних підрозділів до місця виклику в міських умовах. На конкретному прикладі з'ясовано, що час слідування пожежних підрозділів складає близько 80 % від часу, необхідного звичайному транспорту для проходження того самого маршруту. Але задачу оптимального вибору зон обслуговування для пожежних підрозділів не розглянуто. В [6] розглянуто затримки в дорозі служб екстреної допомоги, викликані необхідністю очікування проїзду через залізничний переїзд. Запропоновано корегувати маршрути служб екстреної допомоги з урахуванням поточного розкладу руху поїздів. При цьому можливість перерозподілу зон обслуговування таким чином, щоб уникнути переїзду через залізничні колії, залишено поза увагою. В [7] запропоновано динамічну зміну зон обслуговування в залежності від даних про завантаженість доріг, отриманих з онлайн карт. Результати показують, що якщо виходити із нормативу на час прибуття, то фактична зона обслуговування виявляється меншою за нормативну. В [8] досліджуються мережі міських доріг і доступність одних пунктів із інших різними видами транспорту: громадським і приватним та зміна цієї величини протягом доби. Але питання руху спеціальної техніки до місця виклику не розглядаються. В [9] розглянуто проблему кількох одночасних викликів в невеликих селах, де на наявності є лише один пожежний автомобіль. На основі статистичних даних визначено час і райони, з найбільшою ймовірністю одночасних викликів. Недоліком такого підходу є складність його розповсюдження на інші міста та села. В [10] досліджено вплив соціально-демографічних, інфраструктурних, сезонних, часових факторів на час відгуку на повідомлення про екстрену ситуацію. Але питання зменшення цього часу залишено без розгляду. В [11] запропоновано модель оцінки просторової конфігурації пожежних частин, яка спирається на статистику викликів і часу прямування до точок виклику при різній завантаженості доріг. Але питання оптимізації зон обслуговування пожежних частин, або зміни їх розташування не розглянуті.

В [12] розглянуто аварійно-рятувальні спроможності пожежної частини і визначено фактори, які впливають на ці спроможності. Але питання просторового розміщення пожежних частин залишено без розгляду. В [13] досліджується ефективність методу територіального розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності. При цьому статистичні дані про пожежі залишаються неврахованими.

В [14] проаналізовано розташування пожежних частин і час слідування до місця виклику. Запропоновано нове розташування, яке забезпечує у 95% прибуття перших підрозділів на місце виклику не більше ніж за 5 хв. При цьому до реорганізації вкlastися у 5 хв. вдавалося лише у 81% випадків. Але при цьому не враховано складність пожежі і час прибуття наступних підрозділів. В [15] враховано необхідність прибуття різних видів техніки з різних пожежних підрозділів до місця аварії. Необхідна кількість техніки та пожежних підрозділів для кожної потенційної точки виклику прийнята на підставі нормативних документів. Показано, що побудована задача цілочисельного програмування є NP-складною задачею, яка може бути розв'язана за прийнятний проміжок часу. Недоліком моделі є неврахування аварій різного рівню складності на одному й тому самому об'єкті, а та-

кож неврахування частот аварій. В [16] для розв'язання задачі покриття і оптимального розташування об'єктів використано методи теорії нечіткої логіки. Але в цій моделі розглядається лише один тип транспортного засобу. В [17] побудовано модель просторової оптимізації для розташування систем громадського обслуговування таких, як лікарні або пожежні частини. Критерієм оптимізації є мінімум переміщень вже існуючих об'єктів або мінімум зайнятих земельних ділянок. Але і при такому підході не враховано різні види пожежної техніки (автоцистерни, автодрабина тощо), які є в пожежних частинах. В [18] запропоновано двоцільову модель просторової оптимізації розміщення пожежних частин, представлено процедуру вирішення на основі обмежень для генерації межі Парето. Але й тут залишається неврахованою складність пожежі і можливість залучення додаткових сил і засобів для її ліквідації.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є оптимізація зон обслуговування пожежним підрозділами таким чином, щоб забезпечувати вчасне прибуття не лише перших підрозділів, а функціонально спроможних ліквідувати цей тип пожежі.

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

Метою роботи є побудова алгоритму оптимального розподілу техніки між пожежними підрозділами. На практиці це відкриває можливості для зменшення часу слідування пожежних підрозділів до місця виклику за рахунок зміни зон обслуговування підрозділами.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити модель визначення зон обслуговування пожежними підрозділами;
- розробити процедуру визначення оптимального розподілу техніки між пожежними підрозділами.

### **4. Матеріали та методи дослідження**

Об'єктом дослідження є процес функціонування пожежних підрозділів, а предметом дослідження – розподіл техніки між підрозділами, що обслуговують певну область. Основна гіпотеза дослідження – априорі відомі частоти пожеж та сили і засоби необхідні для їх ліквідації.

Модель оптимального розподілу техніки між пожежним підрозділами базується на методах просторового геометричного моделювання. Цільовою функцією є мінімізація часу прибуття пожежних підрозділів до місця виклику з урахуванням функціональної спроможності цих підрозділів ліквідувати пожежу. Для дослідження властивостей розв'язку задачі оптимізації використовуються властивості опуклих областей припустимих значень і опуклої функції цілі. Для побудови алгоритму знаходження оптимального розв'язку задачі використовуються методи математичного програмування.

## **5. Результати побудови алгоритму оптимального розподілу техніки між пожежними підрозділами**

### **5.1. Розробка моделі визначення зон обслуговування пожежними підрозділами**

З практичної точки зору важливим є не лише якнайшвидше прибуття на пожежу перших підрозділів, а прибуття тієї кількості сил і засобів, які забезпечують проведення рятувальних робіт і ліквідацію пожежі. Це означає, що при виборі зон

обслуговування має бути врахована складність потенційних пожеж, що виникають на об'єктах, які знаходяться в зоні обслуговування, а також сили і засоби, наявні в сусідніх підрозділах. Зокрема, можлива ситуація, коли ліквідація пожежі на певному об'єкті буде вимагати залучення кількох підрозділів. Це буде означати, що даний об'єкт знаходиться в зоні обслуговування цих підрозділів. На рис. 1 наведено приклад виділення окремих об'єктів в зоні обслуговування пожежного підрозділу.

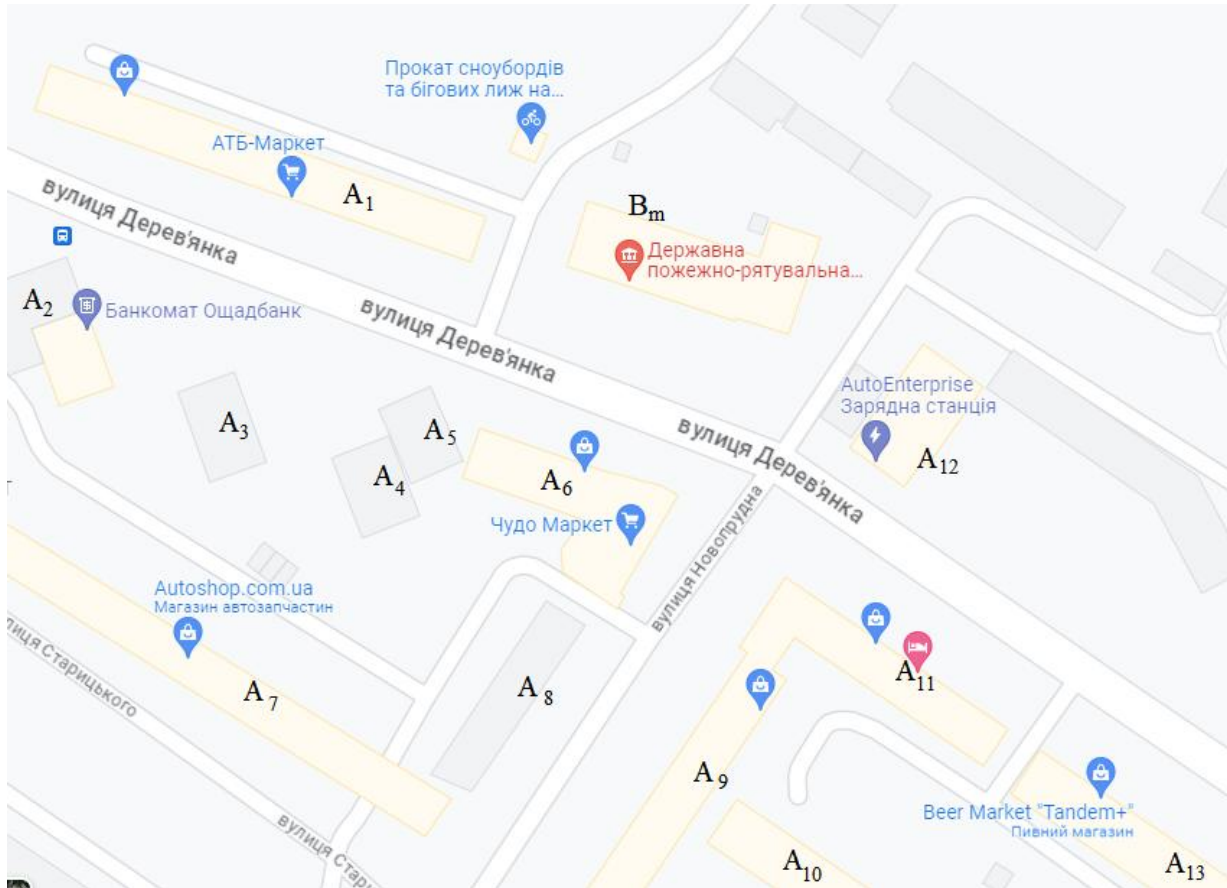


Рис. 1. Приклад виділення окремих об'єктів  $A_1, A_2, A_3, \dots$  в області обслуговування пожежного підрозділу  $B_m$

При побудові моделі оптимального розподілу техніки між пожежними підрозділами будемо виходити з наступних припущень.

1. В області обслуговування, що розглядається, знаходяться  $M$  пожежних підрозділів:  $B_1, B_2, \dots, B_M$ .

2. В кожному підрозділі  $B_m$  знаходиться техніка виду  $C_1, C_2, \dots, C_L$  у кількості  $y_{m1}, y_{m2}, \dots, y_{mL}$  одиниць відповідно. Тоді загальний розподіл техніки по підрозділам може бути представлений у вигляді матриці

$$Y = \|y_{m\ell}\|,$$

елемент якої, що знаходиться в рядку  $m$  і стовпчику  $\ell$ , відповідає кількості техніки виду  $C_\ell$  у підрозділі  $B_m$ .

3. В області обслуговування вказаних підрозділів знаходяться  $N$  об'єктів:  $A_1, A_2, \dots, A_N$ .

4. На кожному з об'єктів  $A_n$  можуть виникнути пожежі різного типу або

складності:  $S_{n1}, S_{n2}, \dots, S_{nK}$  з частотою  $\lambda_{n1}, \lambda_{n2}, \dots, \lambda_{nK}$  (кількість пожеж протягом року).

5. Для ліквідації пожежі  $S_{nk}$ , що виникла на об'єкті  $A_n$ , необхідно залучити  $a_1^{(nk)}$  одиниць техніки виду  $C_1$ ,  $a_2^{(nk)}$  одиниць техніки виду  $C_2$ , ...,  $a_L^{(nk)}$  одиниць техніки виду  $C_L$ .

6. Час слідування від місця розташування підрозділу  $B_m$  до об'єкта  $A_n$  складає  $t_{mn}$ .

7. Загальна кількість техніки, що знаходиться в розпорядженні підрозділів, достатня для ліквідації будь-якої аварійної ситуації  $S_{nk}$ .

$$a_\ell^{(nk)} \leq \sum_{m=1}^M y_{m\ell}, \quad \ell = 1, 2, \dots, L.$$

8. Час ліквідації пожежі є достатньо малим настільки, що протягом цього часу не виникає пожежа на іншому об'єкті.

Розглянемо залучення сил і засобів для ліквідації пожежі  $S_{nk}$ , що виникла на об'єкті  $A_N$ . Для визначення тих підрозділів, з яких саме буде залучатися техніка для ліквідації аварійної ситуації  $S_{nk}$ , будемо виходити з критерію мінімуму часу слідування до місця аварії:

$$F_{nk} = \sum_{\ell=1}^L \sum_{m=1}^M x_{m\ell} t_{mn} \rightarrow \min. \quad (1)$$

з обмеженнями:

$$x_{m\ell} \leq y_{m\ell}, \quad \ell = 1, 2, \dots, L; \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^M x_{m\ell} = a_\ell^{(nk)}, \quad \ell = 1, 2, \dots, L, \quad (3)$$

де  $x_{m\ell}$  – кількість техніки виду  $C_\ell$ , залучена з підрозділу  $B_m$ .

Для розв'язання задачі (1)–(3) може бути застосований наступний алгоритм.

1. Упорядковуємо підрозділи  $B_1, B_2, \dots, B_M$  за зростанням часу слідування  $t_{mn}$  до об'єкта  $A_n$ . Тим самим отримуємо послідовність підрозділів:

$$B_{m_1}, B_{m_2}, \dots, B_{m_M},$$

для якої

$$t_{m_1 n} \leq t_{m_2 n} \leq \dots \leq t_{m_M n}.$$

2. Покладаємо  $\ell=1$ .

3. Покладаємо  $S=0, i=0$ .

4. Кількість техніки  $x_{m_i \ell}$ , що залучається з підрозділу  $m_i$ , визначається

виразом:

$$x_{m_i \ell} = \min \{ a_{\ell}^{(nk)} - S, y_{m_i \ell} \}.$$

5. Оновлюємо кількість вже залученої техніки:

$$\begin{aligned} S &:= S + x_{m_i \ell}; \\ i &:= i + 1. \end{aligned}$$

6. Якщо  $i \leq M$ , то переходимо до кроку 4.

7. Переходимо до наступного виду техніки:

$$\ell := \ell + 1.$$

8. Якщо  $\ell \leq L$ , то переходимо до кроку 3.

Результатом виконання наведеного алгоритму буде матриця:

$$X_{nk} = \|x_{m \ell}\|, \quad (4)$$

елементами якої є кількість техніки, що залучається до ліквідації пожежі  $S_{nk}$ . При цьому номер рядка  $m$  відповідає підрозділу  $B_m$ , з якого залучається техніка, а номер стовпчика  $\ell$  відповідає виду техніки  $C_{\ell}$ . Позначимо через  $F_{nk}^*$  – значення функції цілі (1) при значеннях (4), отриманих як розв’язок задачі (1)–(3).

Розв’язавши задачу (1)–(3) для всіх можливих аварійних ситуацій, отримаємо множину матриць  $X_{nk}$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ ;  $k = 1, 2, \dots, K$ , які будуть визначати області відповідальності окремих підрозділів.

Розглядаючи  $F_{nk}^*$  як функцію від наявної техніки в підрозділах:

$$F_{nk}^* = F_{nk}^*(Y), \quad (5)$$

відзначимо, що ця функція є монотонно незростаючою. Дійсно, із наведеного вище алгоритму випливає, що збільшення кількості будь-якого виду техніки в будь-якому підрозділі призводить до того, що значення цільової функції (1) зменшується або залишається незмінним.

## 5.2. Розробка процедури визначення оптимального розподілу техніки між підрозділами

Враховуючи частоту  $\lambda_{nk}$  виникнення пожежі  $S_{nk}$  на об’єкті  $S_n$ , що знаходиться в області обслуговування пожежних підрозділів  $B_1, B_2, \dots, B_M$ , запишемо загальну функцію цілі:

$$F(Y) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \lambda_{nk} F_{nk}^*(Y). \quad (6)$$

Оскільки  $F(Y)$  є лінійною комбінацією монотонно незростаючих функцій  $F_{nk}^*(Y)$ , то вона, в свою чергу також буде монотонно незростаючою.

Використовуючи (1) в для побудови критерію оптимальності, отримаємо функцію цілі:

$$F(Y) \rightarrow \min_Y. \quad (7)$$

Обмеженнями задачі є кількість наявної техніки кожного виду:

$$\sum_{m=1}^L y_{m\ell} = c_\ell, \quad \ell = 1, 2, \dots, L, \quad (8)$$

$$y_{m\ell} \geq 0, \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad \ell = 1, 2, \dots, L. \quad (9)$$

де  $c_\ell$  – загальна доступна кількість техніки виду  $C_\ell$ . Отже, цільова функція (7) разом з обмеженнями (8), (9) визначають задачу мінімізації, розв’язок  $Y^*$  якої описує оптимальний розподіл техніки по пожежних підрозділах.

Враховуючи, що функція (6) є монотонно незростаючою, а область допустимих значень (8), (9) є опуклою, то оптимальне значення буде досягтися на межі області.

Тоді для розв’язання задачі (7)–(9) може бути використаний наступний алгоритм (рис. 2).

1. Покладаємо  $\ell=1$  і розглядаємо окремо розподіл техніки виду  $C_\ell$ .
2. Обираємо довільний початковий розподіл  $y_{1\ell}, y_{2\ell}, \dots, y_{M\ell}$  техніки по підрозділам, який задовольняє умовам (8), (9).
3. Обчислюємо значення:

$$F^* = F(y_{1\ell}, y_{2\ell}, \dots, y_{M\ell}).$$

4. Покладаємо  $i = 1$ .
5. Покладаємо  $j = 1$ .
6. Якщо  $i \neq j$ ,  $y_{i\ell} > 0$ , то розраховуємо величину:

$$F_{ij} = F(y_{1\ell}, y_{2\ell}, \dots, y_{i\ell} - 1, \dots, y_{j\ell} + 1, \dots, y_{M\ell}).$$

7. Якщо  $j < M$ , то покладаємо  $j := j + 1$  та переходимо до п. 6.
8. Якщо  $i < M$ , то покладаємо  $i := i + 1$  та переходимо до п. 5.
9. Серед всіх значень  $\{F_{ij}\}$  обираємо найменше  $F_{i_0j_0}$ .
10. Якщо

$$F_{i_0j_0} \geq F^*,$$

то переходимо до п. 12.

11. Переходимо до нового розподілу:

$$Y = (y_{1\ell}, y_{2\ell}, \dots, y_{i_0\ell} - 1, \dots, y_{j_0\ell} + 1, \dots, y_{M\ell}).$$

і переходимо до п. 3.

12. Якщо  $\ell < L$ , то покладаємо  $\ell := \ell + 1$  та переходимо до п. 2.

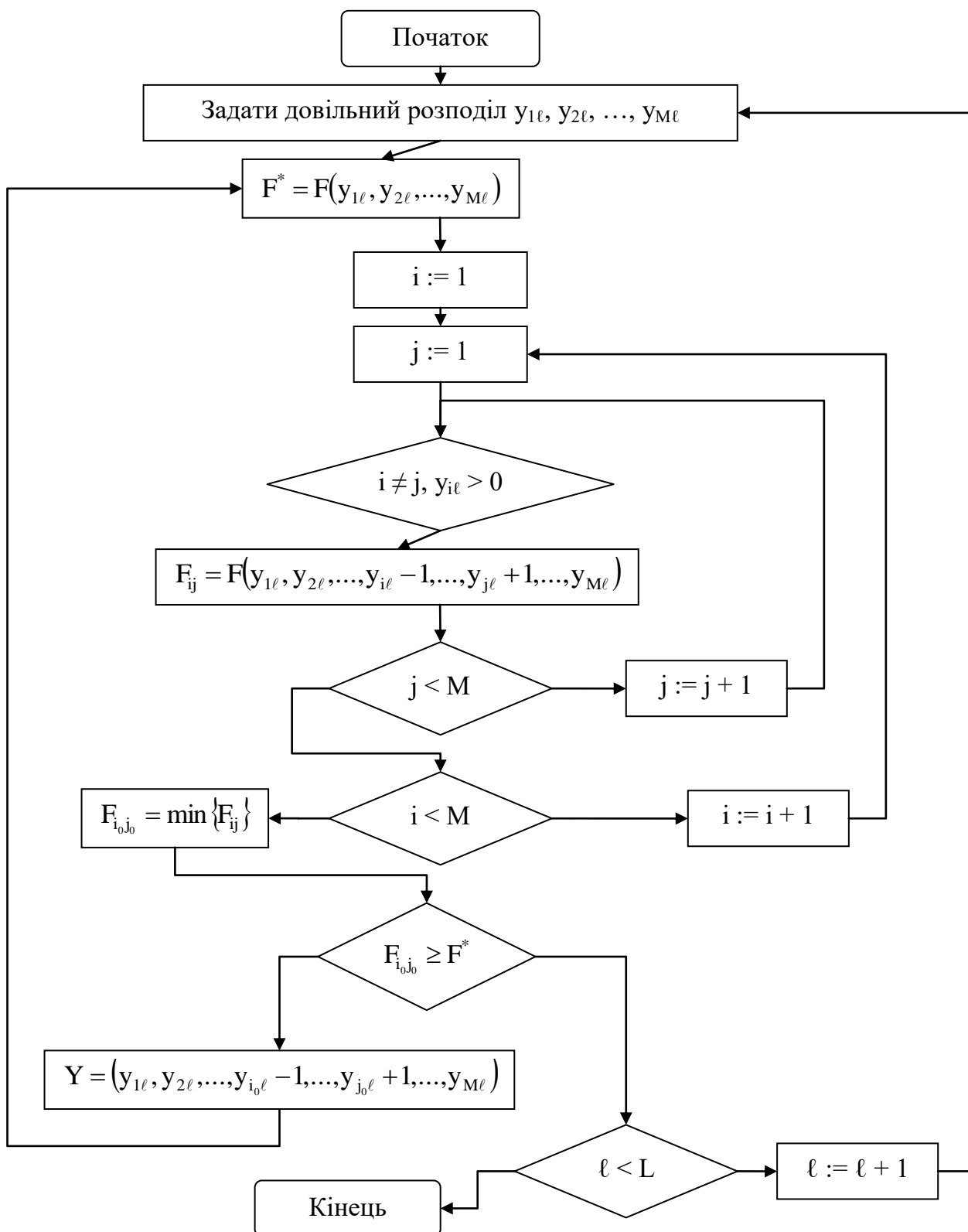


Рис. 2. Визначення оптимального розподілу техніки між підрозділами

Результатом виконання алгоритму є розподіл  $Y^*$  техніки по пожежних підрозділах, оптимальний в тому сенсі, що він забезпечує мінімальне значення цільової функції (7).



## 6. Обговорення результатів побудови алгоритму оптимального розподілу техніки між пожежними підрозділами

Запропонована модель визначення зон обслуговування пожежними підрозділами спирається на припущення про достатність сил та засобів в підрозділах для проведення рятувальних робіт і ліквідації пожеж в області їх обслуговування. Модель виходить із розбиття всієї області відповідальності на окремі підобласті або виділення окремих об'єктів, для яких відомий перелік можливих аварійних ситуацій, пов'язаних з пожежами, їх частота, сили і засоби, необхідні для їх ліквідації. Джерелом такої інформації можуть бути статистичні дані щодо пожеж на таких об'єктах або розрахункові дані щодо рівня пожежної небезпеки [19]. Збитки від пожежі лінійно залежать від часу прибуття пожежних підрозділів та їх розгортання для початку гасіння пожежі. При цьому важливим є не лише швидке прибуття перших пожежних підрозділів, а прибуття сил і засобів у кількості, достатньої для ліквідації пожежі. Тому цільова функція (1) являє собою суму добутоків кількості одиниць техніки і слідування часу до місця виклику від місць розташування пожежних підрозділів. Це дозволяє врахувати складність пожежі, оскільки більш складні пожежі будуть вимагати залучення більшої кількості техніки і підрозділів. Отже, одиницею виміру цільової функції є машино-хвилини, а критерієм оптимізації є мінімум машино-хвилин слідування пожежних підрозділів до місця виклику. При цьому час слідування підрозділів від місця їх розташування до місця пожежі може бути визначений за допомогою он-лайн карт, зокрема, Google Maps.

Мінімізація цільової функції (1) за умови виконання обмежень (2), (3) дозволяє розв'язати задачу про оптимальний вибір підрозділів, які мають залучатися до ліквідації пожежі певного типу на даному об'єкті. Алгоритм знаходження розв'язку полягає в визначенні підрозділу, розташованого найближче всього до місця виклику (найменший час слідування до місця пожежі). Якщо сил і засобів цього підрозділу недостатньо для ліквідації пожежі, то залучається наступний за часом слідування підрозділ і т.д. Такий підхід стає можливим завдяки припущенню про неможливість одночасного виникнення кількох пожеж на різних об'єктах. Складність наведеного алгоритму (час його виконання) має оцінку  $O(M \cdot \ln M)$ , що обумовлено необхідністю упорядкування  $M$  підрозділів за зростанням часу слідування від місця розташування до місця виклику.

Послідовне розв'язання задачі (1)–(3) для кожної з можливих пожежних ситуацій на кожному з об'єктів дозволяє визначити зони обслуговування для кожного з підрозділів, що розглядаються. Складність такого алгоритму можна оцінити як  $O(N \cdot M \cdot \ln M)$  внаслідок того, що упорядкування підрозділів за відстанню до об'єктів в області обслуговування необхідно проводити для кожного об'єкта.

Підстановка в цільову функцію (1) розв'язку задачі (1)–(3) дає функцію (5), яка є монотонно незростаючою відносно змінних  $y_{m\ell}$ , які означають кількість одиниць техніки виду  $\ell$  в підрозділі  $m$ . Із тієї властивості, що функції виду (5) є монотонно незростаючими, впливає що їх лінійна комбінація (6) також є монотонно незростаючою. Отже, розв'язок задачі (1)–(3) є основою для побудови і розв'язання задачі (7)–(9) оптимального розподілу техніки між підрозділами. Включення річних частот пожеж  $\lambda_{nk}$  на об'єктах, що лежать в області обслуговування, в цільову функцію (7) означає, що функція (7) є математичним очікуванням машино-хвилин слідування на пожежу протягом року.

Обмеження (8), (9) описують опуклу область припустимих рішень задачі (7)–(9). В сукупності із тим, що функція цілі (7) є монотонно незростаючою, це

означає, що розв'язок задачі оптимізації (7)–(9) лежить на межі області припустимих значень. Крім того, будь-який локальний розв'язок задачі (7)–(9) буде одночасно її глобальним розв'язком. Це дозволяє застосувати наведений алгоритм для знаходження розв'язку задачі (7)–(9). Складність алгоритму (рис. 2) може бути оцінена як  $O(N \cdot P \cdot M^3 \cdot \ln M)$ , де  $P$  – середня кількість одиниць техніки одного типу у підрозділі.

Перевагою побудованої моделі є те, що вона враховує не лише відстань від місця розташування пожежних підрозділів до об'єктів, які знаходяться в зоні їх обслуговування, а й складність пожеж. Це досягається шляхом введення в цільову функцію як часу слідування до місця виклику, так і кількості техніки.

До обмежень моделі слід віднести припущення про сталий час слідування від пожежної частини до місця виклику незалежно від часу доби та пори року.

Недоліком побудованого алгоритму є те, що він виходить із припущення про неможливість одночасного виникнення кількох пожеж на різних об'єктах. Це призводить до неможливості розгляду задачі оптимізації на достатньо великій території, оскільки ймовірність одночасного виникнення більше ніж однієї пожежі вже не можна ігнорувати. Таким чином, перспективи подальших досліджень пов'язані із врахуванням ймовірності одночасного виникнення кількох пожеж.

Запропонований алгоритм може бути використаний для визначення зон обслуговування вже існуючих пожежних підрозділів [13], а також при виборі місць розташування додаткових пожежних підрозділів.

## 7. Висновки

1. Сформульовано задачу оптимального визначення області відповідальності рятувальних підрозділів. Критерієм оптимізації є мінімум часу слідування підрозділів від місця розташування до місця виклику. Цільова функція включає в себе як час слідування, так і кількість одиниць техніки, залученої до ліквідації аварії. Це дозволяє врахувати складність аварійної ситуації, оскільки більш складні ситуації будуть вимагати залучення більшої кількості техніки і підрозділів. Обмеження задачі визначаються наявними силами і засобами в оперативно-рятувальних підрозділах. Побудовано алгоритм розв'язання задачі оптимізації. Його складність пропорційна загальній кількості об'єктів, що потрапляють в зону відповідальності підрозділів, і пропорційна добутку кількості підрозділів на їх логарифм і обумовлена необхідністю упорядкування підрозділів за зростанням відстані до кожного потенційного місця аварії.

2. Побудовано процедуру оптимального розподілу техніки між існуючими оперативно-рятувальними підрозділами. Критерієм оптимізації є мінімум часу слідування до місця потенційної аварії. Показано, що область припустимих рішень є опуклою. Це забезпечує, що знайдений із використанням алгоритму локальний мінімум буде одночасно і глобальним. При пошуку оптимального розв'язку використовується розв'язок задачі щодо оптимального вибору областей відповідальності підрозділів. Складність алгоритму пропорційна третій степені кількості аварійно-рятувальних підрозділів і загальній кількості об'єктів, що знаходяться в області їх відповідальності.

## Література

1. Xia Z., Li H., Chen Y., Yu W. Integrating Spatial and Non-Spatial Dimensions to Measure Urban Fire Service Access. ISPRS International Journal of Geo-

Information. 2019. Vol. 8(3). P. 138. doi: 10.3390/ijgi8030138

2. Murray A. T. Optimising the spatial location of urban fire stations. *Fire Safety Journal*. 2013. Vol. 62. Part A. P. 64–71. doi: 10.1016/j.firesaf.2013.03.002

3. Oh J. Y., Hessami A., Yang H. Y. Minimizing Response Time with Optimal. *Studies in Engineering and Technology*. 2019. Vol. 6(1). P. 47–58. doi: 10.11114/set.v6i1.4187

4. Corcoran J., Higgs G., Higginson A. Fire incidence in metropolitan areas: A comparative study of Brisbane (Australia) and Cardiff (United Kingdom). *Applied Geography*. 2011. Vol. 31(1). P. 65–75. doi: 10.1016/j.apgeog.2010.02.003

5. Zhu S., Liu W., Liu D., Li Y. The impact of dynamic traffic conditions on the sustainability of urban fire service. *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 96. P. 104667. doi: 10.1016/j.scs.2023.104667

6. Park P. Y., Jung W. R., Yeboah G., Rempel G., Paulsen D., Rumpel D. First responders' response area and response time analysis with/without grade crossing monitoring system. *Fire Safety Journal*. 2016. Vol. 79. P. 100–110. doi: 10.1016/j.firesaf.2015.11.003

7. Liu D., Xu Z., Yan L., Fan C. Dynamic estimation system for fire station service areas based on travel time data. *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 118. P. 103238. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103238

8. Guan J., Zhang K., Shen Q., He Y. Dynamic Modal Accessibility Gap: Measurement and Application Using Travel Routes Data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020. Vol. 81. P. 102272. doi: 10.1016/j.trd.2020.102272

9. Yeboah G., Park P. Y. Using survival analysis to improve pre-emptive fire engine allocation for emergency response. *Fire Safety Journal*. 2018. Vol. 97. P. 76–84. doi: 10.1016/j.firesaf.2018.02.005

10. KC K., Corcoran J. Modelling residential fire incident response times: A spatial analytic approach. *Applied Geography*. 2017. Vol. 84. P. 64–74. doi: 10.1016/j.apgeog.2017.03.004

11. Xu Z., Liu D., Yan L. Evaluating spatial configuration of fire stations based on real-time traffic. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 25. P. 100957. Doi: 10.1016/j.csite.2021.100957

12. Chen M., Wang K., Dong X., Li H. Emergency rescue capability evaluation on urban fire stations in China. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020. Vol. 135. P. 59-69. doi: 10.1016/j.psep.2019.12.028

13. Кустов М. В., Федоряка О. І., Корнієнко Р. В. Ефективність методу територіального розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. № 2(36). С. 54–65. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-5

14. Shahparvari S., Fadaki M., Chhetri P. Spatial accessibility of fire stations for enhancing operational response in Melbourne. *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 117. P. 103149. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103149

15. Wang J., Liu H., An S., Cui N. A new partial coverage locating model for cooperative fire services. *Information Sciences*. 2016. Vol. 373. P. 527–538. doi: 10.1016/j.ins.2016.06.030

16. Batanović V., Petrović D., Petrović R. Fuzzy logic based algorithms for maximum covering location problems. *Information Sciences*. 2009. Vol. 179(1–2). P. 120–129. doi: 10.1016/j.ins.2008.08.019

17. Chen H., Xu R. Achieving Least Relocation of Existing Facilities in Spatial Fire safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2023-38-12

Optimisation: A Bi-Objective Model. 12th International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2023). 2023. Vol. 277. P. 19:1–19:5. doi: 10.4230/LIPIcs.GIScience.2023.19

18. Yao J., Zhang X., Murray A. T. Location optimization of urban fire stations: Access and service coverage. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2019. Vol. 73. P. 184–190. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2018.10.006

19. Кустов М. В., Тютюник В. В., Федоряка О. І. Оцінка рівня пожежної небезпеки локальної території. *Проблеми пожежної безпеки*. 2020. № 48. С. 83–93. URL: <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/zbirky-naukovykh-prats-ppb/ppb48/12.pdf>

*O. Basmanov, Dsc, Professor, Chief Researcher of the Department*

*D. Saveliev, PhD, Senior Lecturer of the Department*

*R. Melezhyk, Researcher of the Department*

*T. Lutsenko, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department  
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

## AN ALGORITHM OF OPTIMAL DISTRIBUTION OF EQUIPMENT FOR FIRE STATIONS

The object of the study is the process of functioning of fire stations, and the subject of the study is the distribution of equipment between units serving a certain area. An algorithm of the optimal distribution of equipment for fire stations was built. In practice, it opens up opportunities to reduce the time it takes for firefighting units to reach the place of call by changing the service areas of the units. The model is based on the assumption of the sufficiency of forces and means in fire stations to carry out rescue operations and eliminate fires in the area of their service. The model is based on the division of the entire area of responsibility into separate sub-areas or the selection of individual objects for which a list of possible emergency situations related to fires, their frequency, forces and means necessary for their elimination is known. The task of optimally determining the area of responsibility of rescue units is formulated. The optimization criterion is the minimum time for units to follow from the location to the place of call. The objective function includes both the follow-up time and the number of units of equipment involved in eliminating the accident. This allows you to take into account the complexity of the emergency situation, since more complex situations will require the involvement of a larger number of equipment and units. The limitations of the task are determined by the available forces and means in operational and rescue units. An algorithm for the optimal distribution of equipment between existing operational and rescue units has been built. It is shown that the domain of admissible solutions is convex. The built model can be used to determine the service areas of already existing fire stations, as well as when choosing the locations of additional fire stations.

**Keywords:** local territory, level of danger, functional capacity, service area, location of fire stations

### References

1. Xia, Z., Li, H., Chen, Y., Yu, W. (2019). Integrating Spatial and Non-Spatial Dimensions to Measure Urban Fire Service Access. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(3), 138. doi: 10.3390/ijgi8030138

2. Murray, A. T., Murray, A. T. (2013). Optimising the spatial location of urban fire stations. *Fire Safety Journal*, 62, Part A, 64–71. Doi: 10.1016/j.firesaf.2013.03.002

3. Oh, J. Y., Hessami, A., Yang, H. Y (2019). Minimizing Response Time with Optimal. *Studies in Engineering and Technology*, 6(1), 47–58. doi: 10.11114/set.v6i1.4187

4. Corcoran, J., Higgs, G., Higginson, A. (2011). Fire incidence in metropolitan areas: A comparative study of Brisbane (Australia) and Cardiff (United Kingdom). *Applied Geography*, 31(1), 65–75. doi: 10.1016/j.apgeog.2010.02.003

5. Zhu, S., Liu, W., Liu, D., & Li, Y. (2023). The impact of dynamic traffic conditions on the sustainability of urban fire service. *Sustainable Cities and Society*, 96,

104667. doi: 10.1016/j.scs.2023.104667

6. Park, P. Y., Jung, W. R., Yeboah, G., Rempel, G., Paulsen, D., Rumpel, D. (2016). First responders' response area and response time analysis with/without grade crossing monitoring system. *Fire Safety Journal*, 79, 100–110. doi: 10.1016/j.firesaf.2015.11.003

7. Liu, D., Xu, Z., Yan, L., Fan, C. (2020). Dynamic estimation system for fire station service areas based on travel time data. *Fire Safety Journal*, 118, 103238. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103238

8. Guan, J., Zhang, K., Shen, Q., He, Y. (2020). Dynamic Modal Accessibility Gap: Measurement and Application Using Travel Routes Data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 81, 102272. doi: 10.1016/j.trd.2020.102272

9. Yeboah, G., Park, P. Y. (2018). Using survival analysis to improve pre-emptive fire engine allocation for emergency response. *Fire Safety Journal*, 97, 76–84. doi: 10.1016/j.firesaf.2018.02.005

10. KC, K., Corcoran, J. (2017). Modelling residential fire incident response times: A spatial analytic approach. *Applied Geography*, 84, 64–74. doi: 10.1016/j.apgeog.2017.03.004

11. Xu, Z., Liu, D., Yan, L. (2021). Evaluating spatial configuration of fire stations based on real-time traffic. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100957. doi: 10.1016/j.csite.2021.100957

12. Chen, M., Wang, K., Dong, X., Li, H. (2020). Emergency rescue capability evaluation on urban fire stations in China. *Process Safety and Environmental Protection*, 135, 59–69. doi: 10.1016/j.psep.2019.12.028

13. Kustov, M., Fedoryaka, O., Kornienko, R. (2022). Effectiveness of the method of territorial placement of fire stations of different functional capacity. *Problems of Emergency Situations*, 2(36), 54–65. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-5

14. Shahparvari, S., Fadaki, M., Chhetri, P. (2020). Spatial accessibility of fire stations for enhancing operational response in Melbourne. *Fire Safety Journal*, 117, 103149. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103149

15. Wang, J., Liu, H., An, S., Cui, N. (2016). A new partial coverage locating model for cooperative fire services. *Information Sciences*, 373, 527–538. doi: 10.1016/j.ins.2016.06.030

16. Batanović, V., Petrović, D., Petrović, R. (2009). Fuzzy logic based algorithms for maximum covering location problems. *Information Sciences*, 179(1–2), 120–129. doi: 10.1016/j.ins.2008.08.019

17. Chen, H., Xu, R. (2023). Achieving Least Relocation of Existing Facilities in Spatial Optimisation: A Bi-Objective Model. *12th International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2023)*, 277, 19:1–19:5. doi: 10.4230/LIPIcs.GIScience.2023.19

18. Yao, J., Zhang, X., Murray, A. T. (2019). Location optimization of urban fire stations: Access and service coverage. *Computers, Environment and Urban Systems*, 73, 184–190. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2018.10.006

19. Kustov, M., Tiutiunik, V., Fedoryaka, O. (2020). The fire safety level assessment of the local territory. *Problems of fire safety*, 48, 83–93. Available at: <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/zbirky-naukovykh-prats-ppb/ppb48/12.pdf>

Надійшла до редколегії: 25.09.2023

Прийнята до друку: 07.11.2023