

УДК 614.8

М. В. Кустов, д.т.н., доцент, нач. наук. від. (ORCID 0000-0002-6960-6399)

О. І. Федоряка, ад'юнкт (ORCID 0000-0001-6381-5985)

Р. В. Корнієнко, к.т.н., н.с. від. (ORCID 0000-0003-4854-283X)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ЕФЕКТИВНІСТЬ МЕТОДУ ТЕРИТОРІАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ ПОЖЕЖНИХ ПІДРОЗДІЛІВ РІЗНОЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СПРОМОЖНОСТІ

Розроблено автоматизований програмний комплекс Fire Emergency Department Direction для перевірки достовірності математичної моделі просторового розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності на локальних територіях з різними соціально-техногенними властивостями та працездатності методу на її основі. Програмний комплекс дозволяє спростити процес оптимізації територіального розміщення пожежних підрозділів та вибору оптимального шляху руху до місця пожежі. Проведені розрахунки показали, що запропонована математична модель дозволяє оптимізувати місце розташування декількох пожежних підрозділів відносно потенційно-небезпечних об'єктів по часу прямування до місця пожежі в якості визначального критерію. Розроблений програмний комплекс на основі математичної моделі просторового розміщення пожежних підрозділів може використовуватись керівниками гасіння пожежі для автоматизації управління пожежними підрозділами та задіяння додаткових ресурсів. Перевірена ефективність розробленого методу територіального розміщення пожежних підрозділів шляхом порівняння результатів розрахунку коефіцієнтів покриття із найближчим за властивостями методом, який обрано в якості прототипу та має практичну апробацію. Порівняння результатів розрахунків показали, що при використанні усередненої тотожної функціональної спроможності пожежних підрозділів на окремій територіальній громаді розроблений метод та прототип дають співставні результати з похибкою близько 1 %, тоді як врахування різної функціональної спроможності призводить до уточнення результатів за прототипом близько 15 %. Запропонований метод просторового розміщення пожежних підрозділів може бути використаний при перевірці відповідності розміщення існуючих пожежних підрозділів соціально-техногенним властивостям локальної території, при проектуванні забудови нових локальних територій та облаштуванні центрів допомоги громадян на території об'єднаних територіальних громад.

Ключові слова: територіальне розміщення, функціональна спроможність, пожежні підрозділи, оптимальний маршрут руху

1. Вступ

Для забезпечення належного рівня безпеки населення в межах певної локальної території розміщуються різні підрозділи оперативних служб. Перш за все до таких служб відносяться пожежні підрозділи, оперативно-рятувальні підрозділи, пункти швидкої медичної допомоги та поліції. Виходячи з того, що для таких служб час прибуття до місця виклику відіграє критично важливу роль, то їх кількість в межах населеного пункту та територіальне розміщення відіграє важливу роль. Перевищення часу прямування пожежних підрозділів до місця пожежі призводить до збільшення постраждалих та загиблих, надмірного зростання матеріальних збитків за рахунок швидкого розповсюдження пожежі, викиду в атмосферу небезпечних газів та надмірного викиду продуктів горіння [1]. Основними причинами перевищення нормованого часу прибуття пожежних підрозділів є перевищення нормованих відстаней до небезпечних об'єктів, некоректний вибір маршрутів прямування від пожежної частини до осередку пожежі та невідповідність стану транспортної мережі [2]. Для пожежних підрозділів визначальними критеріями при розміщенні пожежних підрозділів по локальній території є кількість

населення в районі виїзду, наявність небезпечних об'єктів та максимально допустима відстань маршруту прямування [3]. Тобто питання розміщення пожежних підрозділів з урахуванням найбільш значущих параметрів актуальне при проектуванні нових населених пунктів, розбудові міст та облаштування об'єднаннях територіальних громад. Крім великої кількості значущих параметрів питання територіального розміщення пожежних підрозділів ускладнюється постовою зміною цих параметрів з часом, що потребує періодичного уточнення та при критичній зміні перенесення місця розташування пожежних підрозділів.

Таким чином, існуюча проблема полягає у відсутності методів врахування більшості значущих параметрів при територіальному розміщенні пожежно-рятувальних підрозділів різної функціональної спроможності.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для мінімізації кількості постраждалих та матеріальних збитків при організації аварійно-рятувальних робіт намагаються мінімізувати час прямування пожежно-рятувальних підрозділів до місця пожежі [4]. Мінімізація часу прямування до місця пожежі досягається вибором оптимального маршруту слідування та оптимальним розміщенням пожежно-рятувальних частин в межах локальної території [5]. При цьому від технічних характеристик пожежно-рятувальних автомобілів час прямування залежить не суттєво, що пов'язано із внутрішніми обмеженнями загально транспортного трафіку руху [6]. Однак, в роботі не розглядаються питання прохідності по дорогам із поганим покриттям та рух великогабаритних автомобілів по вузьким дорогам.

Задачі оптимального розміщення пожежних підрозділів відноситься до задач оптимального геометричного покриття, тоді як задачі оптимізації маршрутів руху пожежних підрозділів відносяться до транспортно-логістичних задач. Задачі транспортної логістики при оптимізації маршруту руху здатні враховувати всі можливі маршрути руху до пункту призначення, стан цих маршрутів, щільність трафіку в певний момент часу та інше [7]. Однак, при цьому не враховується особливості режиму руху спеціального транспорту із спеціальними сигналами.

При вирішенні задач оптимального розміщення пожежно-рятувальних підрозділів використовують метод щільного розміщення кіл із радіусом, що відповідає максимально допустимій довжині маршруту виїзду [8]. Однак, такий метод призводить до суттєвих похибок, так як скривленість транспортної мережі може змінювати реальну дистанцію руху на 50–120 %. При врахування скривленості маршрутів форма нормованого району виїзду набуває форми багатокутника [9]. Відповідно задача зводиться до геометричного розміщення багатокутників різних форм. Однак, в цих роботах не враховується стан пожежного ризику об'єктів, що знаходяться в межах району виїзду. Оцінка пожежного ризику проводиться в роботах [10]. Однак, запропоновані в цих роботах методи визначення пожежного ризику не дозволяють співставити отримані результати із можливостями забезпечення пожежної безпеки наявними підрозділами. Тому, в роботі [11] було запропоновано ранжування пожежних ризиків за допомогою отриманої нейромережевої моделі. Відповідне ранжування кожного об'єкту дозволяє оцінити відповідність наявних сил та засобів для успішного гасіння можливої пожежі із залученням декількох пожежних підрозділів. Вирішення задач просторового розміщення пожежно-рятувальних підрозділів із умовою перекриття їх районів виїзду для забезпечення можливості нарощування сил та засобів розглядається в роботах [12].

ті [12]. Однак, в роботі не вирішено питання поступового нарощування сил у часі та варіативність функціональної спроможності різних пожежно-рятувальних підрозділів. В роботі [13] запропоновано метод територіального розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності із врахуванням пожежних ризиків об'єктів. Однак, відсутність перевірки ефективності цього методу та достовірності моделей, на яких базується цей метод, не дозволяє ефективно використовувати його у практичній діяльності.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми є відсутність перевірки ефективності нових методів територіального розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є перевірка ефективності методу територіального розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

1. Розробка програмної реалізації методу територіального розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності.
2. Перевірити достовірність математичної моделі просторового розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності.
3. Перевірити ефективність методу територіального розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності.

4. Матеріали та методи дослідження

Програмна реалізація методу просторового розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності побудована в програмному просторі DELPHI з використанням геоінформаційних систем (GIS). Архітектура геоінформаційної системи управління пожежними підрозділами використовує стандартні розширення для SQL серверів та включає в себе що найменш 9 шарів, деякі з яких мають інтерактивні зв'язки із додатковими базами даних.

Метод територіального розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності базується на моделях просторового геометричного моделювання. Цільовою функцією такої задачі є мінімізація кількості пожежних підрозділів із забезпеченням можливості прибуття пожежних підрозділів у такій кількості, щоб реалізувати успішне гасіння пожежі на об'єкті. Додатковими умовами розв'язання задачі територіального розміщення пожежних підрозділів є мінімізація областей перекриття районів їх виїзду та поетапність нарощування сил та засобів на гасіння пожежі.

Розв'язання задачі комбінаторної оптимізації проводилось за допомогою дерева рішень з використанням способів та алгоритмів автоматизованого розв'язання.

5. Програмна реалізація методу територіального розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності

З метою перевірки достовірності математичної моделі просторового розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності на локальних територіях різної щільності населення та промислово-технічного навантаження було розроблено автоматизований програмний комплекс Fire Emergency Department Direction (FEDDIR) (рис. 1).

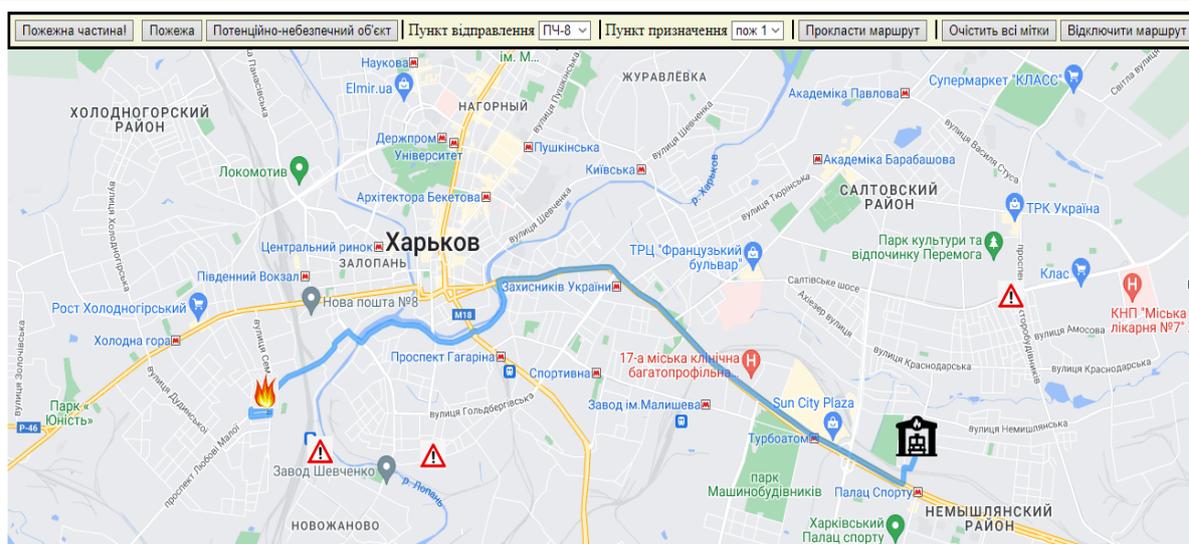


Рис. 1. Інтерфейс програми FEDDIR

Автоматизований програмний комплекс FEDDIR побудовано на базі інтерактивної мапи місцевості, що дозволяє автоматично будувати маршрути руху між точками та визначати середній час прямування до пункту призначення. В програму FEDDIR інтегровано алгоритм розв'язання моделі територіального розміщення пожежних підрозділів. Пошарова архітектура побудови FEDDIR дозволяє інтегрувати додаткові шари напруженості транспортного трафіку по шляхам, що дозволяє корегувати маршрути руху шляхом мінімізації часу прямування. Для автоматизації роботи у програмний комплекс вноситься база розміщення пожежних підрозділів, потенційно-небезпечних об'єктів із описом основних параметрів цих об'єктів. Оператор програми також має змогу оперативно вводити розміщення пожеж, що виникли (рис. 2).

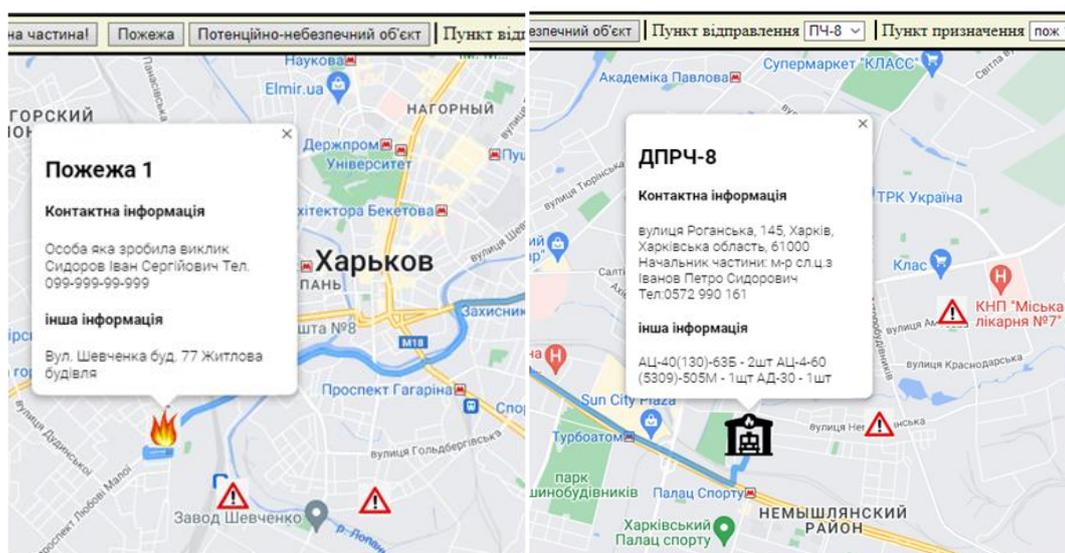


Рис. 2. Приклади інтерактивних позначок у програмі FEDDIR

Як видно з рис. 2 в якості додаткової інформації надається адреса пожежі, тип забудови та данні особи, що зробила виклик. Перелік наявної в пожежній частині аварійно-рятувальної техніки допомагає керівнику гасіння пожежі правильно оцінити потенційні можливості найближчих підрозділів на випадок ускладнення ситуації.

6. Перевірка достовірності математичної моделі просторового розміщення пожежних підрозділів

Відповідно до методу [13] математична модель просторового розміщення пожежних підрозділів представляє собою задачу комбінаторної оптимізації просторового покриття області $S_0(m_0)$ об'єктами $S_{F,n}(m_{F,n}(\tau), u_{F,n}, R_{F,n})$:

$$\min_w N(m_{F,1}(\tau), u_{F,1}, \dots, m_{F,N}(\tau), u_{F,N}); \quad (1)$$

при цьому:

– межі адміністративного району представити у вигляді багатокутника $S_0(m_0)$, де $m_0 = \{x_{0,1}, y_{0,1}, \dots, x_{0,i}, y_{0,i}\}$ координати його вершин, а початок координат співпадає з однією з вершин та є центром глобальної нерухомої системи координат;

– межі району виїзду пожежно-рятувальних частин $S_{F,n}(m_{F,n}(\tau))$ будуть знаходитись в межах $S_0(m_0)$, тобто $S_{F,n}(m_{F,n}(\tau)) \in S_0(m_0)$;

– область припустимих рішень W може бути представлена за допомогою наступних обмежень;

– розміри об'єктів $S_{F,n}$ змінюються в залежності від τ з кроком $\Delta\tau = 5$ хв та початковим часом $\tau_0 = 5$ хв.;

– в кожній точці області $S_0(m_0)$ з рівнем пожежної небезпеки $R_{L,n} = \{x_{L,n}, y_{L,n}\}$, з урахуванням її покриття одним або декількома об'єктами $S_{F,n}$, повинна виконуватись умова:

$$\sum_{n=1}^N R_{F,n} \geq R_{L,n}; \quad (2)$$

– нарощування сил та засобів в зоні гасіння пожежі $\sum_{n=1}^N R_{F,n}$ може відбуватись

поступово з кроком в часі $\Delta\tau = 5$ хв., з початковим часом $\tau_0 = 5$ хв. та $R_{F,n}(\tau_0) = 2$;

– площі взаємного перетину об'єктів покриття з початковим часом $S_{F,n}(m_{F,n}(\tau_0), u_{F,n}, R_{F,n})$ мають бути мінімальними:

$$S_{F,n}(m_{F,n}(\tau_0), u_{F,n}) \cap S_{F,h}(m_{F,h}(\tau_0), u_{F,h}) \rightarrow \emptyset; \quad (3)$$

$$n = 1, \dots, N-1; h = j+1, \dots, N;$$

– мінімум площі перетину об'єктів покриття $S_{F,n}(m_{F,n}(\tau), u_{F,n}, R_{F,n})$ та $cS_0(m_{cS_0}, u_{cS_0})$ – доповнення області $S_0(m_0)$ до простору R^2 :

$$S_{F,n}(m_{F,n}(\tau), u_{F,n}) \cap cS_0(m_{cS_0}, u_{cS_0}) \rightarrow \emptyset; \quad (4)$$

$$n = 1, \dots, N; S_0 \cup cS_0 = R^2.$$

Перевірка достовірності проводилась наступним чином: за допомогою моделі (1)–(4) визначались оптимальні місця розміщення пожежних підрозділів в межах міста Харкова із стаціонарними позиціями потенційно-небезпечних об'єктів. У програмі FEDDIR визначався мінімальний час прямування до потенційно-небезпечних об'єктів (рис. 3).

Далі обирались декілька варіантів зміни місць розташування пожежних під-

розділів від визначеного оптимального та у програмі FEDDIR визначався мінімальний час прямування до тих же місць призначення. Результати порівняння представлені в табл. 1.

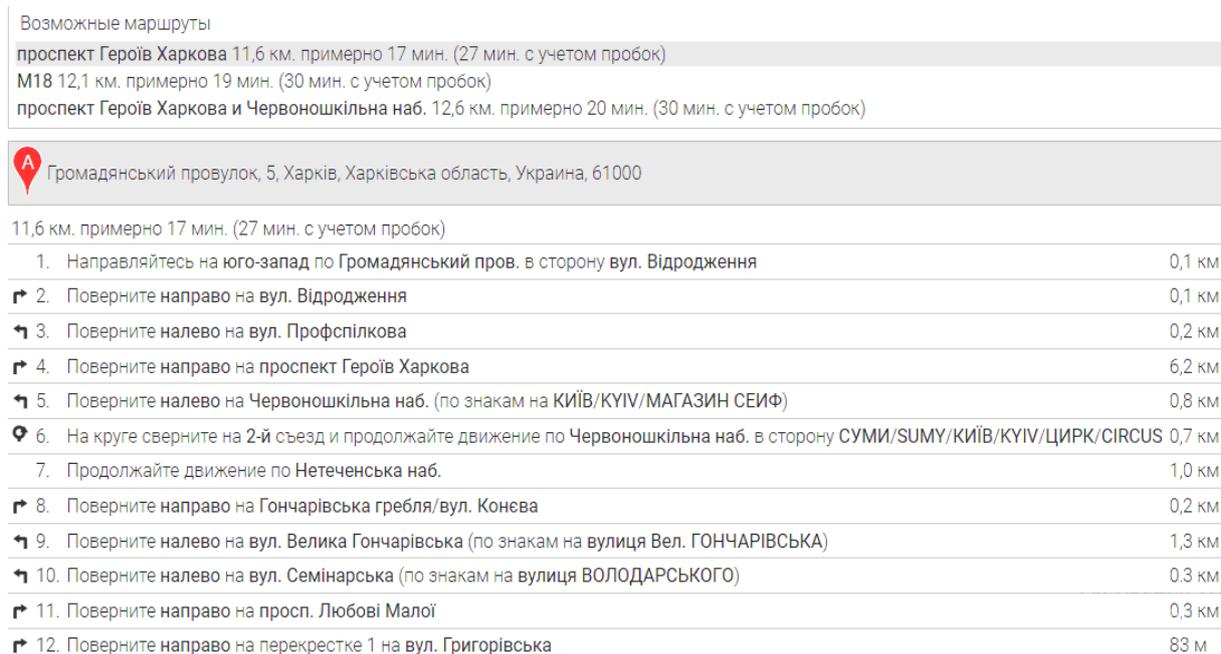


Рис. 3. Визначення оптимального маршруту до місця пожежі у програмі FEDDIR

Табл. 1. Час прямування від пожежних підрозділів від місць постійного розташування до потенційно-небезпечних об'єктів

Варіанти розміщення	Координати пожежного підрозділу	Час прямування до об'єктів (А - Завод ім. Шевченко; В – Новожанівський м'ясокомбінат)
Оптимізований	49.958064, 36.206050	А – 4`37``; В – 7`12``
Варіант 1	49.962340, 36.226363	А – 5`49``; В – 8`07``
Варіант 2	49.958649, 36.219254	А – 3`22``; В – 11`56``
Варіант 3	49.964940, 36.213047	А – 8`02``; В – 6`45``
Варіант 4	49.956748, 36.204352	А – 10`31``; В – 4`52``
Варіант 5	49.966714, 36.221475	А – 1`04``; В – 18`32``

В якості прикладу обрані найбільш потенційно пожежонебезпечних об'єктів Новобоварського району міста Харкова та одна з пожежних частин цього району. Найбільш пожежонебезпечними об'єктами Новобоварського району є промислово-виробниче підприємство Завод імені Т. Г. Шевченко та Новожанівський м'ясокомбінат. Варіювання місцем розташування пожежної частини проводилось в межах її району виїзду.

7. Перевірка ефективність методу територіального розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності

Перевірка ефективності методу територіального розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності [13] проводилась методом порівняння результатів оптимізації розміщення підрозділів із результатами оптимізації, отриманими за найбільш близькою методу [12], обраною як прототип.

Згідно за методу [12] основним рівнянням є мінімізаційна функція:

$$\frac{\min N}{W} (m_{c,1}, u_{c,1}, \dots, m_{c,N}, u_{c,N}), \quad (5)$$

де W :

$$\omega_{\Omega}(m_{c,i}, m_{c,h}, u_{c,i}, u_{c,h}) \rightarrow 0, \quad (6)$$

$$i = 1, \dots, N-1; h = i+1, \dots, N;$$

$$\omega(m_{c,i}, m_{cS_0}, u_{c,i}, u_{cS_0}) \rightarrow 0, \quad (7)$$

$$i = 1, \dots, N; S_0 \cup cS_0 = R^2;$$

$$u_{c,i} \in P_{\xi}(x_{\xi}, y_{\xi}); i = 1, \dots, N; \xi \in \{1, \dots, N_{\xi}\}; N_{\xi} \geq N_k; \quad (8)$$

$$\omega_{\Omega} \left(\begin{matrix} m_{N_k} \\ \cup_{k=1} \\ m_N \\ \cup_{i=1} S_{c,i} \\ u_0, u_N \\ \cup_{i=1} S_{c,i} \end{matrix} \right) = S \left(\begin{matrix} N_k \\ \cup_{k=1} v_k(m_k, u_0) \end{matrix} \right); \quad (9)$$

$$O_{d,j}(x_{d,j}, y_{d,j}) \in \bigcap_{\mu}^{M_j} S_{c,\mu}(m_{c,\mu}, u_{c,\mu}), j = 1, \dots, N_d; \mu \in \{1, \dots, N\}; \quad (10)$$

$$m_{c,i} = f(t); i = 1, \dots, N, \quad (11)$$

де t – параметр, що впливає на метричні характеристики об'єктів покриття $m_{c,i}, i = 1, \dots, N$.

У даній моделі вираз (5) являє собою цільову функцію; вираз (6) – обмеження на мінімум площі взаємного перетину об'єктів покриття $S_{c,i}(m_{c,i}, u_{c,i}), i = 1, \dots, N$; вираз (7) – обмеження на мінімум площі перетину об'єктів покриття $S_{c,i}(m_{c,i}, u_{c,i}), i = 1, \dots, N$; та $cS_0(m_0, u_0)$ – доповнення області $S_0(m_0, u_0)$ до простору R^2 ; вираз (8) – умова належності локальних систем координат об'єктів покриття заданим точкам; вираз (9) – умова повного покриття підобластей $v_k(m_k, u_0), k = 1, \dots, N_k$; вираз (10) – обмеження спеціального виду, що полягає у належності точок $O_{d,j}(x_{d,j}, y_{d,j}), j = 1, \dots, N_d$, областям перетину заданої кількості M об'єктів покриття; вираз (11) – обмеження спеціального виду, що визначає форму та розміри об'єктів покриття.

Визначаючим критерієм для порівняння ефективності методу за моделями (1)–(4) [13] та (5)–(11) [12] обрано коефіцієнт покриття $k_{\text{покр}}$, який безпосередньо впливає на час прибуття пожежних підрозділів до місця пожежі та визначається як:

$$k_{\text{покр}} = \frac{S \left(\bigcup_{i=1}^N S_{c,i}(m_{c,i}, u_{c,i}) \right)}{S(S_0(m_0, u_0))}. \quad (12)$$

Так як основною відмінністю та перевагою методу [13] є можливість оптимізації територіального розміщення пожежних підрозділів з різною функціональною спроможністю, то порівнювались два варіанти розрахунку: при однаковій функціональній спроможності всіх пожежних підрозділів та при варіюванні рангу функціональної спроможності (R_F) від I до IV, відповідно до [13]. Результати розраху-

нків для деяких обласних центрів України та об'єднаних територіальних громад існуючими підрозділами приведені в табл. 2.

Табл. 2. Коефіцієнти покриття за методами [12] та [13]

Локальна територія	Варіанти функціональної спроможності різних пожежних підрозділів	$k_{\text{покр. за [12]}}$	$k_{\text{покр. за [13]}}$
м. Київ	Однакова	0,87	0,85
	Різна	0,87	0,72
м. Харків	Однакова	0,81	0,79
	Різна	0,81	0,7
Чугуївська міська територіальна громада	Однакова	0,69	0,7
	Різна	0,69	0,64
Солоницівська селищна територіальна громада	Однакова	0,53	0,52
	Різна	0,53	0,45

Для порівняння обрані чотири типи локальної території по щільності пожежної навантаги та населення. Найбільший рівень пожежної небезпеки має столичне місто Київ з населенням близько 5 млн. чоловік. На другому місці розглянуто обласний центр м. Харків з населенням 1,5 млн. чоловік. Далі обрана територіальна громада з містом районного значення та найнижчий рівень пожежного ризику має селищна територіальна громада.

8. Обговорення результатів перевірки ефективності методу територіального розміщення пожежних підрозділів

Розробка програмного комплексу FEDDIR дозволило автоматизувати процес оптимізації територіального розміщення пожежних підрозділів. Використання програмного комплексу FEDDIR дозволило перевірити достовірність розроблених моделей та методу територіального розміщення пожежних підрозділів шляхом порівняння мінімального часу прямування пожежних підрозділів до місця пожежі. Результати розрахунку, представлені у табл. 1 показують, що зміщення одного підрозділу на 1 км від оптимальної позиції призводить до збільшення часу прямування на 7 %, при збільшенні відстані до 2 км час збільшується на 15 %.

При цьому якщо змістити на 1 км від визначеної оптимальної позиції 2 пожежних підрозділи то зростання часу прямування досягає 16 %, а переміщення на ту ж відстань 3-х підрозділів дає приріст часу слідування 24 %. Відповідно, перевірка за допомогою програми FEDDIR показала, що розрахунки оптимального територіального розміщення пожежних підрозділів за моделями (1)–(4) дозволяють досягти мінімально можливого часу слідування пожежних підрозділів до місця пожежі.

Запропонований автоматизований програмний комплекс FEDDIR можливо використовувати в практичній діяльності оперативно-рятувальних служб. FEDDIR може використовуватись для вирішення наступних практичних задач:

1. Розрахунок оптимального розміщення майбутніх підрозділів оперативних служб (пожежні, рятувальні, швидка допомога, поліція, центри допомоги громадян) при проектуванні забудови міст, розбудови районів та облаштування об'єднаних територіальних громад.

2. Перевірка коректності вже розміщених підрозділів оперативних служб з умовами зміни рівнів ризику різних об'єктів та зміни функціональної спроможності самих підрозділів.

3. Оптимізація роботи чергових диспетчерів оперативних служб при визначенні конкретного підрозділу для обслуговування екстреного виклику та визначення оптимального маршруту руху для них.

4. Автоматизація роботи штабу з ліквідації масштабної надзвичайної ситуації при визначенні оперативних можливостей резервних підрозділів та планування за діяння додаткових сил та засобів.

Перелічені вище практичні задачі вирішуються шляхом інтегрування до програмного комплексу FEDDIR мапи стану дорожнього трафіку у визначений момент часу, алгоритму оптимізації розміщення підрозділів оперативних служб, можливості гнучкої зміни стану як пожежної обстановки так і переміщення пожежних підрозділів.

Перевірка ефективності розробленої моделі (1)–(4), методу на її основі та програмного комплексу проводилась шляхом порівняння з результатами розрахунків за аналогічним методом [12], заснованою на моделях (5)–(11). Ефективність та достовірність цього методу перевірена раніше іншими дослідниками та не викликає сумніву. Результати перевірки ефективності (табл. 2) показали, що при однаковій функціональній спроможності відмінність коефіцієнтів покриття для локальних територій з різною щільністю населення несуттєва та знаходиться в межах 0,3–1,1 %. Тоді як при різній функціональній спроможності пожежних підрозділів відмінність перевищує 20 %. При цьому спостерігається наступна залежність: найбільше уточнення коефіцієнту покриття при різній функціональній спроможності пожежних підрозділів за моделлю (1)–(4) спостерігається у великих населених пунктах (м. Київ, м. Харків) – 15 %. При зменшенні щільності забудови та населення на прикладі Чугуївської міської територіальної громади відмінність для $k_{\text{покр.}}$ падає до 7 %, а при подальшому зменшенні щільності населення на прикладі Солоницівської селищної територіальної громади відмінність для $k_{\text{покр.}}$ знов зростає до 17 %. На нашу думку це пояснюється великою кількістю та щільністю пожежних підрозділів у великих містах, що дозволяє збільшити варіативність їх функціональної спроможності. Відповідно ігнорування цими параметрами у моделі (5)–(11) призводить до значного інтегрального відхилення. Відповідно зменшення кількості пожежних підрозділів Чугуївській міській територіальній громаді знижує відхилення інтегруючого коефіцієнту покриття. Однак, на локальних територіях сільського та селищного типу на прикладі Солоницівської селищної територіальної громади поряд із зменшенням кількості пожежних підрозділів суттєво зростає відстань прямування до місця пожежі. Так як коефіцієнт покриття $k_{\text{покр.}}$ залежить від відстаней між пожежними підрозділами та місцями виникнення пожеж, то відповідно вплив параметру функціональної спроможності навіть для невеликої кількості пожежних підрозділів зростає.

В якості недоліків запропонованого методу та автоматизованого програмного комплексу слід відмітити низьку варіативність можливого технічного оснащення аварійно-рятувальних підрозділів при їх ранжуванні.

9. Висновки

1. Розроблено програмний комплекс Fire Emergency Department Direction, який дозволяє автоматизувати процес визначення місць оптимального розміщення пожежних підрозділів. За допомогою програмного комплексу Fire Emergency Department Direction можливо оптимізувати місця розміщення пожежних підроз-

ділів різної функціональної спроможності та визначати найшвидший шлях прямування до місця пожежі із врахуванням щільності трафіку на дорогах. Математичною основою процесу оптимізації у програмі Fire Emergency Department Direction є модель просторового геометричного розміщення багатокутного об'єкту. Цільовою функцією такої моделі є мінімізація кількості пожежних підрозділів.

2. Проведено перевірку достовірності математичної моделі просторового розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності. Достовірність розробленої моделі перевірялась шляхом порівняння часу прямування двох пожежних підрозділів до визначених потенційно-небезпечних об'єктів з різними координатами розміщення. Всі довільно обрані варіанти розміщення пожежних підрозділів у порівнянні з оптимізованим збільшує час прямування до потенційних місць пожежі від 7 % до 4 разів. Перевірка працездатності розробленої математичної моделі показала, що її використання при оптимізації розміщення ≥ 3 пожежних підрозділів дозволяє скоротити час прямування до 24 %.

3. Перевірка ефективності запропонованого методу територіального розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності показала, її використання дозволяє уточнити коефіцієнт покриття локальної території з населенням ≥ 1 млн. чол. до 15 %; з населенням від 50 000 до 1 000 000 чол. до 7 %; з населенням $\leq 50 000$ чол. > 15 %. Перевірка ефективності проводилась шляхом порівняння розрахунків запропонованого методу із найбільш близьким прототипом, який вже пройшов практичну апробацію.

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. P. 138–145. doi:10.3390/ijgi8030138
2. Oh J. Y., Hessami A., Yang H. Y. Minimizing Response Time with Optimal Fire Station Allocation. *Studies in Engineering and Technology*. 2019. Vol. 6(1). P. 47-58. doi:10.11114/set.v6i1.4187
3. Murray A. T. Optimizing the spatial location of urban fire stations. *Fire safety journal*. 2013. Vol. 62(1). P. 64–71. doi:10.1016/j.firesaf.2013.03.002
4. Murray A. T., Tong D., Kim K. Enhancing Classic Coverage Location Models. *International regional science review*. 2010. Vol. 33(2). P. 115–133. doi:10.1177/0160017609340149
5. Green L. V., Kolesar P. J. Improving emergency responsiveness with management science. *Management Science*. 2017. Vol. 50(8). P. 1001–1014. doi:10.1287/mnsc.1040.0253
6. Ko Y. D., Song B. D., Morrison R. J., Hwang H. Location Design For Emergency Medical Centers Based On Category of Treatable Medical Diseases and Center Capability. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*. 2014. Vol. 21(3). P. 117–128. doi:10.2305/ijietap.2014.21.3.1270
7. Kwan M. P., Lee J. Emergency response after 9/11: the potential of real time 3D GIS for quick emergency response in micro-spatial environments. *Computers, environment and urban systems*. 2005. Vol. 29(2). P. 93–113. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2003.08.002
8. Lai M. C., Sohn H. S., Tseng T. L., Bricker L. D. A Hybrid Benders/Genetic Algorithm for Vehicle Routing and Scheduling Problem. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*. 2012. Vol. 19(1). P. 33–46. doi:10.52363/2524-0226-2022-36-5

doi:10.23055/ijietap.2012.19.1.610

9. Liu N., Huang B., Chandramouli M. Optimal siting of fire stations using GIS and ANT algorithm. *Journal of computing in civil engineering*. 2006. Vol. 20(5). P. 361–369. doi:10.1061/(ASCE)0887-3801(2006)20:5(361)

10. Kravtsiv S. Ya., Sobol O. M., Samiliv T. Ya. Determination of the limits of the application of the statistical method for evaluation integral fire risks. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків. 2018. Вип. № 27. С. 47–51. URL: <http://pes.nuczu.edu.ua/uk/arkhiv-nomeriv/47-vipusk-29>

11. Кустов М. В., Тютюник В. В., Федоряка О. І. Оцінка рівня пожежної небезпеки локальної території. *Проблеми пожежної безпеки*. 2020. Вип. № 48. С. 67-79. URL: <https://nuczu.edu.ua/ukr/arkhiv-nomeriv?view=article&id=3435&catid=74>

12. Комяк В. М., Соболев О. М., Кравців С. Я. Модель та метод оптимального покриття неопуклими багатокутниками заданої області з дискретними елементами. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнічного університету*. 2018. Вип. 8. Т. 1. С. 11–22. URL: <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdata/V8T1.html>

13. Кустов М. В., Соболев О. М., Федоряка О. І. Територіальне розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2021. Вип. № 33. С. 181–192. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-14

M. Kustov, DSc, Associate Professor, Deputy Head of Department

O. Fedoryaka, Adjunct

R. Kornienko, PhD, Researcher of the Department

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

EFFECTIVENESS OF THE METHOD OF TERRITORIAL PLACEMENT OF FIRE DEPARTMENTS OF DIFFERENT FUNCTIONAL CAPACITY

In order to check the reliability and efficiency of the mathematical model of the spatial placement of fire departments of different functional capacity in local territories with different socio-technological properties, an automated software complex Fire Emergency Department Direction was developed. The software complex allows you to simplify the process of optimizing the territorial placement of fire departments and choosing the optimal route to the fire site. The performed calculations showed that the proposed mathematical model allows to optimize the location of several fire departments relative to potentially dangerous objects in terms of travel time to the place of fire as a determining criterion. The developed software complex based on the mathematical model of the spatial location of fire departments can be used by fire chiefs to automate the management of fire departments and to allocate additional resources. The effectiveness of the developed method of territorial placement of fire departments was verified by comparing the results of calculation of coverage coefficients with the closest method in terms of properties, which was chosen as a prototype and has practical approval. Comparison of calculation results showed that when using the same averaged functional capacity of fire departments in a separate territorial community, the developed method and the prototype give comparable results with an error of about 1 %, while taking into account different functional capacity leads to a refinement of the prototype results by about 15 %. The proposed method of spatial placement of fire departments can be used when checking the compliance of the placement of existing fire departments with the socio-technological properties of the local area, when designing the development of new local areas and arranging citizen assistance centers on the territory of united territorial communities.

Keywords: territorial location, functional capacity, fire departments, optimal traffic route

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, 138–145. doi:10.3390/ijgi8030138

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

3. Murray, A. T. (2013). Optimizing the spatial location of urban fire stations. *Fire safety journal*, 62(1), 64–71. doi:10.1016/j.firesaf.2013.03.002

4. Murray, A. T., Tong, D., Kim, K. (2010). Enhancing Classic Coverage Location Models. *International regional science review*, 33(2), 115–133. doi:10.1177/0160017609340149

5. Green, L. V., Kolesar, P. J. (2017). Improving emergency responsiveness with management science. *Management Science*, 50(8), 1001-1014. doi:10.1287/mnsc.1040.0253

6. Ko, Y. D., Song, B. D., Morrison, R. J., Hwang, H. (2014). Location Design For Emergency Medical Centers Based On Category of Treatable Medical Diseases and Center Capability. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 21(3), 117-128. doi:10.23055/ijietap.2014.21.3.1270

7. Kwan, M. P., Lee, J. (2005). Emergency response after 9/11: the potential of real time 3D GIS for quick emergency response in micro-spatial environments. *Computers, environment and urban systems*, 29(2), 93-113. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2003.08.002

8. Lai, M. C., Sohn, H. S., Tseng, T. L., Bricker, L. D. (2012). A Hybrid Benders/Genetic Algorithm for Vehicle Routing and Scheduling Problem. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 19(1), 33-46. doi:10.23055/ijietap.2012.19.1.610

9. Liu, N., Huang, B., Chandramouli, M. (2006). Optimal siting of fire stations using GIS and ANT algorithm. *Journal of computing in civil engineering*, 20(5), 361-369. doi:10.1061/(ASCE)0887-3801(2006)20:5(361)

10. Kravtsiv, S. Ya., Sobol, O. M., Samiliv, T. Ya. (2018). Determination of the limits of the application of the statistical method for evaluation integral fire risks. *Problem of emergency situations*, 27, 47–51. URL: <http://pes.nuczu.edu.ua/uk/arkhiv-nomeriv/47-vipusk-29>

11. Kustov, M. V., Tyutyunyk, V. V., Fedoryaka, O. I. (2020). Otsinka rivnya pozhezhnoyi nebezpeky lokal'noyi terytoriyi (Assessment of the level of fire danger in the local area). *Problems of fire safety*, 48, 67-79. URL: <https://nuczu.edu.ua/ukr/arkhiv-nomeriv?view=article&id=3435&catid=74>

12. Komyak, V. M., Sobol, O. M., Kravtsiv, S. Ya. (2018). Model' ta metod optimal'noho pokryttya neopuklymy bahatokutnykamy zadanoyi oblasti z dyskretnymy elementamy (Model and method of optimal coverage of a given area with discrete elements by non-convex polygons). *Scientific Bulletin of the Tavri State Agrotechnical University*, 8(1), 11–22. URL: <http://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdata/V8T1.html>

13. Kustov, M. V., Sobol, O. M., Fedoryaka, O. I. (2021). Terytorial'ne rozmishchennya pozhezhnykh pidrozdiliv riznoyi funktsional'noyi spromozhnosti (Territorial placement of fire departments of different functional capacity). *Problems of emergency situations*, 33, 181-192. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-14

Надійшла до редколегії: 18.10.2022

Прийнята до друку: 25.11.2022