

*А.Я. Калиновський, канд. техн. наук., доцент, Р.І. Коваленко
(Національний університет цивільного захисту України)*

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ РЕАГУВАННЯ АВАРІЙНО-РЯТУВАЛЬНИХ ФОРМУВАНЬ НА ЛОКАЛЬНІ НАДЗВИЧАЙНІ СИТУАЦІЇ

Від часу реагування підрозділів аварійно-рятувальних формувань на локальні надзвичайні ситуації залежить ймовірність загибелі та травмування людей, а також розмір матеріальних збитків. Час реагування залежить від великої кількості чинників, а тому його визначення є складною задачею, рішення якої потребує науково обгрунтованого підходу. Метою цього дослідження є підвищення ефективності функціонування аварійно-рятувальних формувань шляхом розробки математичної моделі визначення часу реагування підрозділів на локальні надзвичайні ситуації. У якості методів дослідження у роботі використано апарат теорії множин, а також методи системного аналізу та синтезу. Запропонована математична модель визначення часу реагування аварійно-рятувальних формувань на локальні надзвичайні ситуації є системою із двох залежностей, які враховують особливості фізико-географічних умов регіону, вулично-дорожньої мережі населеного пункту, а також особливості комплектування підрозділів оперативними транспортними засобами.

Ключові слова: час реагування, локальна надзвичайна ситуація, багатофункціональний мобільний аварійно-рятувальний комплекс контейнерного типу, фізико-географічні умови регіону, вулично-дорожня мережа.

A.Ya. Kalinovsky, R.I. Kovalenko

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE RESPONSE TIME OF EMERGENCY-RESCUE UNITS ON LOCAL EMERGENCY SITUATIONS

Likelihood of death and injury to people, as well as the size of material damage, depend on the time of reaction of rescue units to local emergency situations. The response time depends on a large number of factors, and therefore its definition is a complex task, the solution of which requires a scientifically grounded approach. The purpose of this research is to increase the emergency rescue units' efficiency by developing a mathematical model for determining the response time of units to local emergency situations. As a research method, the theory of sets, as well as methods of system analysis and synthesis, are used in the work. The proposed mathematical model for determining the response time of emergency rescue units to local emergency situations is a system of two dependencies that take into account the features of the physical and geographical conditions of the region, the street and road network of the settlement, as well as the features of staffing units with operational vehicles.

Key words: response time, local emergency, multifunctional mobile rescue complex of container type, physical and geographical conditions of the region, street and road network.

Постановка проблеми. Час реагування підрозділів аварійно-рятувальних формувань (АРФ) на надзвичайні ситуації (НС) можна вважати одним із основних показників рівня готовності підрозділів до виконання дій за призначенням. Від часу реагування підрозділів АРФ залежить ймовірність загибелі і травмування людей від НС, а також ймовірні розміри матеріальних збитків від дії її негативних факторів. При цьому, основними критеріями утворення підрозділів АРФ, а конкретно державних пожежно-рятувальних частин в адміністративно-територіальних одиницях нашої держави є: кількість жителів населеного пункту, радіус району обслуговування підрозділу та нормативний показник часу прибуття сил та засобів до місця виклику. Ці критерії не дають змоги врахувати такі особливості при утворенні підрозділів АРФ, як, наприклад, фізико-географічні умови регіону, специфіка вулично-дорожньої мережі (ВДМ) відповідного населеного пункту та характер оснащення підрозділів оперативними транспортними засобами (ТЗ) (основними пожежними автомобілями загального призначення, спеціальними автомобілями, багатофункціональними мобільними аварійно-рятувальними комплексами контейнерного типу та ін.). Врахувати дані чинники дає змогу саме показник часу реагування, який можна вважати комплексним показником але процес його визначення є складною задачею, рішення якої потребує науково обгрунтованого підходу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В роботах [1, 2] було встановлено, що основні часові інтервали, які є складовими загального часу реагування підрозділів АРФ, можуть бути описані ймовірно-статистичними закономірностями, а саме законом розподілу Ерланга певного порядку.

У роботі [3] було встановлено, що використання закону розподілу Ерланга для опису окремих часових інтервалів процесу функціонування підрозділів АРФ є причиною виникнення певних похибок при розрахунках. У цій роботі було проведено експериментальні дослідження з метою встановлення залежностей впливу ряду чинників на функціонування підрозділів АРФ в процесі ліквідації локальних надзвичайних ситуацій (ЛНС), які пов'язані з пожежами. При цьому, в роботі [3] не було враховано впливу у цих чинників на функціонування підрозділів АРФ в процесі проведення ними оперативних дій, які пов'язані з дорожньо-транспортними пригодами, раптовими обвалами будинків та споруд, викидами та/або розливами небезпечних хімічних речовин та ін. Крім цього, серед чинників впливу не було враховано фізико-географічних умов регіону, а також ймовірних перешкод, які можуть виникнути на шляху руху підрозділів АРФ до місця ліквідації ЛНС.

Згідно з [4], перед відправкою підрозділів до місця виклику необхідно спершу оцінити географічні характеристики території на якій трапилася ЛНС. Особливо це стає актуальним при плануванні маршрутів прямування сил та засобів підрозділів АРФ при масштабних природних катаклізмах до місць проведення оперативних робіт, коли необхідно враховувати характеристики ВДМ населеного пункту та ймовірний час прямування за умови вибору того, чи іншого альтернативного маршруту.

Мета дослідження. Метою цього дослідження є підвищення ефективності функціонування АРФ шляхом розробки математичної моделі визначення часу реагування підрозділів на ЛНС.

У якості **методів дослідження** у роботі використано апарат теорії множин, а також методи системного аналізу та синтезу.

Виклад основного матеріалу. В процесі проведення наукових досліджень з метою однозначного тлумачення теоретичних і практичних положень важливо дотримуватись певного понятійного апарату. У зв'язку з тим, що у роботі використано поняття «ЛНС» існує необхідність у поясненні його суті. Під поняттям «ЛНС» варто розуміти небезпечну подію, яка може бути ліквідована одним територіальним підрозділом оперативно-рятувальної служби цивільного захисту і за площею не виходить за зону відповідальності цього підрозділу.

Сукупність підрозділів АРФ населеного пункту утворюють по суті логістичну систему, яка дає змогу реалізувати функцію реагування на ЛНС, що можна представити як сукупність об'єктів у загальному вигляді:

$$ЛС = \langle \{АРФ\}; \{ЛНС\} \rangle, \quad (1)$$

де $ЛС$ – логістична система; $\{АРФ\}$ – сукупність підрозділів АРФ; $\{ЛНС\}$ – сукупність ЛНС.

Відповідно до теорії логістики, підрозділи АРФ, які мають у своєму розпорядженні сукупність сил та засобів, по суті є «постачальниками послуг» з ліквідації ЛНС забезпечити достатньо високий рівень ефективності підрозділів можна за умови оснащення їх багатофункціональними мобільними аварійно-рятувальними комплексами контейнерного типу, тобто по суті автомобілями-носіями зі знімними кузовами-контейнерами [5].

Використовуючи апарат теорії множин можна представити метод вибору видів і чисельності знімних кузовів-контейнерів та автомобілів-носіїв в підрозділах АРФ, як сукупність таких складових:

$$M = \{ \{X\}, \{Z\}, K \}, \quad (2)$$

де $\{X\}$ – впливи зовнішнього середовища, які не можуть бути змінені в процесі прийняття управлінського рішення, але мають бути при цьому враховані (граничне значення радіуса району обслуговування; характеристики маршруту руху по ВДМ (кількість регульованих і нерегульованих перехресть, кількість поворотів праворуч та ліворуч, ширина проїжджої частини, кількість смуг руху, інтенсивність руху транспортних потоків та ін.)); $\{Z\}$ – вхідні впливи, які можуть бути змінені в процесі прийняття управлінського рішення (види і чисельність знімних кузовів-контейнерів та автомобілів-носіїв); $\{K\}$ – критерій ефективності.

У якості критерію ефективності може виступати показник середнього часу доставки засобів та оснащення для виконання певного цільового завдання до місця ліквідації ЛНС з підрозділів АРФ, який є складовою показника загального часу реагування.

Комплексним критерієм ефективності виступає загальний час реагування підрозділів АРФ на ЛНС, які виникають на території відповідного населеного пункту. Загальний час реагування підрозділів АРФ на ЛНС залежить від тривалості окремих етапів:

$$\tau_{\text{реагування}} = \tau_{\text{дисп.}} + \tau_{\text{зб.в.}} + \tau_{\text{прямув.}} + \tau_{\text{o/p}}, \quad (3)$$

де $\tau_{\text{дисп.}}$ – час диспетчеризації, хвилин; $\tau_{\text{зб.в.}}$ – час збору та виїзду особового складу, хвилин; $\tau_{\text{прямув.}}$ – час прямування оперативних ТЗ до місця ліквідації ЛНС, хвилин; $\tau_{\text{o/p}}$ – час виконання оперативного розгортання на місці ліквідації ЛНС, хвилин.

Оснащення підрозділів АРФ автомобілями-носіями зі знімними кузовами-контейнерами буде впливати на час збору і виїзду підрозділу. У випадках, коли на автомобіль-носіїв завантажено кузов-контейнер певного цільового призначення і виникне така ЛНС, на якій для проведення оперативних робіт буде необхідність саме у цих засобах та оснащенні, час збору і виїзду буде таким же, як і при оснащенні підрозділів оперативними ТЗ «класичної компоновки». У випадках, коли до АРФ надходить повідомлення про виникнення ЛНС, процес ліквідації якої потребуватиме наявності інших засобів та оснащення ніж ті, які перебувають у даний момент в кузові-контейнері на автомобілі-носії, тоді доведеться проводити операції із заміни кузова-контейнера у цьому підрозділі, або у випадках їх відсутності залучати необхідний вид оперативних ТЗ з іншого підрозділу. Крім цього на час збору і виїзду буде значно впливати сам порядок розміщення знімних кузовів-контейнерів та автомобілів-носіїв в підрозділі АРФ. Пояснити це можна тим, що у випадках коли перед необхідним кузовом-контейнером знаходиться декілька інших, то збільшується кількість завантажувально-розвантажувальних операцій, а тому зростає і час збору та виїзду.

На час прямування автомобіля-носія зі знімним кузовом-контейнером без урахування впливів фізико-географічних умов та часу на виконання інженерних заходів підрозділами АРФ щодо підготовки маршрутів руху до місця ліквідації ЛНС (τ_1) будуть впливати такі чинники:

$$\tau_1 = \tau_1(L; V_{\text{ср.}}; \{K_{\text{мп.}}\}), \quad (4)$$

де L – дистанція між місцем дислокації підрозділу АРФ та місцем виникнення ЛНС, км; $V_{\text{ср.}}$ – середня швидкість прямування оперативних ТЗ по ВДМ населеного пункту, км/год; $\{K_{\text{мп.}}\}$ – вектор параметрів, який визначає характеристики маршруту руху по ВДМ (кількість регульованих і нерегульованих перехресть, кількість поворотів праворуч та ліворуч, ширина проїжджої частини, кількість смуг руху, інтенсивність руху транспортних потоків та ін.).

З метою врахування фізико-географічних умов та часу затраченого підрозділами АРФ для подолання перешкод, які можуть бути викликані ними, на час реагування необхідно ввести такий комплекс:

$$\tilde{\psi} = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_z\}^T, \quad (5)$$

де ψ_1 – k -ий об'єкт фізико-географічних умов, який впливає на час реагування та виконання дій підрозділів АРФ, які спрямовані на подолання перешкод, що ними викликані; z – кількість об'єктів фізико-географічних умов та дій підрозділів АРФ, які спрямовані на подолання перешкод, що викликані ними; $\{\dots\}^T$ – операція транспонування вектор-стрічки.

У комплексі (5) під поняттям «об'єкт фізико-географічних умов» необхідно розуміти перешкоду на шляху прямування підрозділів АРФ до місця ліквідації ЛНС, яка спричинена певними фізико-географічними умовами.

Для кількісної оцінки компонент комплексу (5) можна використати відносний час, який необхідно затратити на подолання перешкод на шляху прямування підрозділів АРФ до місця ліквідації ЛНС, які спричинені певними фізико-географічними умовами.

Першим об'єктом фізико-географічних умов (ψ_1), який впливає на час реагування є час подолання підйомів та спусків, який можна визначити за формулою:

$$\psi_1 = \sum_{z=1}^z \frac{S_{n/c}}{V_{n/c}}, \quad (6)$$

де $S_{n/c}$ – довжина окремої ділянки підйому або спуску, км; $V_{n/c}$ – середня швидкість подолання окремої ділянки підйому або спуску, км/год.

Другим об'єктом фізико-географічних умов (ψ_2), який впливає на час реагування, є час подолання водних перешкод:

$$\psi_2 = \sum_{z=1}^z \frac{S_{вп.}}{V_{вп.}}, \quad (7)$$

де $S_{вп.}$ – довжина окремої ділянки водної перешкоди, км; $V_{вп.}$ – середня швидкість подолання окремої ділянки водної перешкоди, км/год.

Третім чинником (ψ_3), який впливає на час реагування є час проведення інженерних робіт підрозділами АРФ з метою підготовки шляхів руху та подолання перешкод, який може бути визначений за наступною формулою:

$$\psi_3 = \sum_{z=1}^z \frac{A_{роб.}}{V_{вик.}}, \quad (8)$$

де $A_{роб.}$ – об'єм робіт; $V_{вик.}$ – середня швидкість виконання робіт.

Об'єм робіт може оцінюватися:

- у метрах, кілометрах, кубічних метрах – при влаштуванні проходів в завалах;
- у метрах, кілометрах, кубічних метрах – при розчищенні ділянок шляху, які завалені товстим шаром снігу, що перешкоджає рухові оперативних ТЗ;
- у метрах або кілометрах – при створенні мостових переправ через ділянки водних перешкод, ярів та каналів.

Швидкість виконання робіт при цьому може оцінюватися у: м/год, км/год, м³/год.

При врахуванні розглянутих об'єктів фізико-географічних умов та часу затраченого підрозділами АРФ на їх подолання, функціонал (5) набуде такого вигляду:

$$\tilde{\psi} = \{\psi_1, \psi_2, \psi_3\}^T, \quad (9)$$

Для отримання коректних результатів при виконанні математичного моделювання необхідно врахувати обмеження, яке полягає у тому, що виконуючи оперативні дії з метою ліквідації ЛНС, підрозділи АРФ територіально не покидають кордони відповідного адміністративно-територіального утворення. За таких умов кінцева залежність для визначення часу прямування

підрозділів АРФ за умов впливу фізико-географічних умов і проведення інженерних робіт з метою підготовки шляхів руху та подолання перешкод (τ_2) буде мати такий вигляд:

$$\tau_2 = \tau_2(\tilde{\psi}; L_{max}), \quad (10)$$

де L_{max} – максимальна відстань по ВДМ від місця дислокації підрозділу АРФ до кордонів відповідного адміністративно-територіального району, який є його районом обслуговування.

Для побудови кінцевої математичної моделі визначення часу реагування підрозділів АРФ населеного пункту на ЛНС, необхідно виконати синтез запропонованих в роботі залежностей.

Формула (3) визначає загальний час реагування підрозділів АРФ на ЛНС, при цьому, час диспетчеризації, час збору та виїзду і час оперативного розгортання, ґрунтуючись на зарубіжному та вітчизняному досвіді проведення оперативних робіт в населених пунктах, можна оцінювати як нормативні або емпіричні (середні) показники. Сумарний час цих періодів (τ_3) буде становити:

$$\tau_3 = \tau_{дисп.} + \tau_{зб.в.} + \tau_{о/р}. \quad (11)$$

У зв'язку з тим, що на час прямування підрозділів впливає достатньо багато чинників, з метою їх врахування доцільно використати запропоновані в роботі залежності (4) та (10). У випадках, коли окремі чинники впливу на час прямування підрозділів АРФ, які наведені в залежностях (4) і (10) за результатами проведення аналізу фізико-географічних умов регіону практично не можуть чинити жодного впливу, їх необхідно вилучити з розгляду і подальші розрахунки часу реагування виконувати без них.

Важливим є введення логічного показника ($U_{a/\kappa}$), який відображає наявність певних типів автомобілів, платформ, кузовів-контейнерів і інших технічних засобів в підрозділах АРФ. Цей показник може мати два значення:

- 0, якщо у підрозділі АРФ, до якого надійшло повідомлення про виникнення ЛНС, відсутні необхідні типи автомобілів, платформ, кузовів-контейнерів і інших технічних засобів;
- 1, якщо у підрозділі АРФ, до якого надійшло повідомлення про виникнення ЛНС, наявні необхідні типи автомобілів, платформ, кузовів-контейнерів і інших технічних засобів.

Логічний показник $U_{a/\kappa}$ враховує така формула:

$$\tau_{реагування} = (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) \cdot U_{a/\kappa}. \quad (12)$$

Час реагування підрозділів АРФ не може дорівнювати нулю, а тому коли показник $U_{a/\kappa} = 0$ то це означає, що виклик автоматично переадресується до іншого підрозділу. Затримка часу на переадресацію повідомлення до іншого АРФ при цьому не відбудеться, бо відомості про наявність та стан оперативних ТЗ у підрозділах постійно відслідковуються оперативно-диспетчерською службою оперативно-координаційного центру відповідного територіального органу ДСНС України.

Загальний розв'язок задачі забезпечується рішенням такої системи рівнянь:

$$\begin{cases} \tau_1 = \tau_1(L; V_{ср.}; \{K_{мр.}\}); \\ \tau_2 = \tau_2(\tilde{\psi}; L_{max}); \\ \tau_{реагування} = (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) \cdot U_{a/\kappa}; \\ \tau_{реагування} > 0. \end{cases} \quad (13)$$

Висновок. Таким чином, математична модель визначення часу реагування АРФ на ЛНС представляє собою систему із двох залежностей. Перша є залежністю часу реагування від дистанції і середньої швидкості прямування, а також вектора параметрів, який визначає характеристики маршруту руху оперативних ТЗ по ВДМ. Друга є залежністю часу реагування від функціонала, який враховує особливості фізико-географічних умов регіону та час, затрачений АРФ на подолання перешкод, що ними спричинені, а також від показника макси-

мальної відстані по ВДМ від місця дислокації підрозділу до кордонів відповідного адміністративно-територіального району, який є його зоною відповідальності. Крім цього, запропонована математична модель враховує логічний показник, який відображає наявність певних типів автомобілів, платформ, кузовів-контейнерів і інших технічних засобів у АРФ. Оптимізація роботи АРФ може здійснюватися шляхом пошуку мінімального значення часу реагування. У подальших дослідженнях планується виконати перевірку адекватності запропонованої в роботі математичної моделі, а також розробити з її використанням методику визначення часу реагування АРФ населених пунктів на ЛНС.

Список літератури:

1. Климкин В. И. Совершенствование организации и управления оперативной деятельностью пожарных подразделений города Москвы на основе применения технологий имитационного моделирования: дис. ... канд. тех. Наук : 05.13.10 / Климкин Виктор Иванович – М., 2005. – 141 с.
2. Белов В. А. Проектирование гарнизонов пожарной охраны на основе технологий имитационного моделирования: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.10 / Белов Виктор Александрович – М., 2010. – 149 с.
3. Войтович Д. П. Підвищення ефективності функціонування пожежно-рятувальних підрозділів в процесі ліквідації пожеж у містах : дис. ... канд. техн. наук : спец. 21.06.02 «Пожежна безпека» / Войтович Дмитро Петрович. - Львів, 2011. – 284 с.
4. Warren T. N. Decision Making in the Fire Service [Електронний ресурс] / Warren T. N. // Magazine «Fire Engineering». – 2013. – Режим доступу : <http://www.fireengineering.com/articles/2013/08/decision-making-in-the-fire-service.html> (дата звернення 05.01.2018). – Назва з екрана.
5. Ларін О. М. Перспективи впровадження пожежно-рятувальних автомобілів контейнерного типу в оперативну діяльність рятувальних підрозділів / Ларін О. М., Калиновський А. Я., Коваленко Р. І. // Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту : зб. наук. пр. VIII Міжнар. наук.-прак. конф. 19-21 жовтня 2015 р. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – С. 93-96.

References:

1. Klimkin. V.I (2005). «Improving the organization and management of operational activities of fire departments of Moscow based on the use of simulation technologies». Thesis for Cand. Sc. (Engineering). 05.13.10, Klimkin Viktor, Academy of State Fire Service of the Ministry for Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia.
2. Belov. V.A. (2010). «Designing garrisons of fire protection on the basis of simulation technologies». Thesis for Cand. Sc. (Engineering). 05.13.10, Belov Viktor, Academy of State Fire Service of the Ministry for Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia.
3. Voitovych D.P. (2011). «Improving the efficiency of fire and rescue units operation in the process of liquidation of fires in cities». Thesis for Cand. Sc. (Engineering). 21.06.02, Voytovich Dmitry, Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine.
4. Warren. T.N. (2013). «Decision Making in the Fire Service», *Magazine «Fire Engineering»*, available at: <http://www.fireengineering.com/articles/2013/08/decision-making-in-the-fire-service.html> (access date 05.01.2018).
5. Larin, O.M., Kalinovsky, A.Ya., and Kovalenko, R. I. (2015). «The prospects of implementation of fire-rescue cars of container type in operational activities of rescue units». *Suchasni tekhnolohiyi ta perspektyvy rozvytku avtomobil'noho transportu. Zbirnyk naukovykh prats' VIII Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* [Modern technologies and prospects of motor transport development. Collection of scientific works of the VIII International scientific and practical conference], Vinnitsa. VNTU, October 19-21, 2015, pp. 93-96.

