

УДК 519.17:519.857:351.861

І. М. Неклонський¹, к.військ.н., викл. каф. (ORCID 0000-0002-5561-4945)

С. Ю. Рагімов¹, к.т.н., доцент, викл. каф. (ORCID 0000-0002-8639-3348)

М. В. Новожилова², д.ф.-м.н., професор, зав. каф. (ORCID 0000-0002-9977-7375)

¹Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

²Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна

АНАЛІЗ ОПЕРАТИВНИХ ДІЙ РЯТУВАЛЬНИХ ФОРМУВАНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ МЕРЕЖЕВОГО ПЛАНУВАННЯ

Для проведення аналізу оперативних дій рятувальних формувань під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій і гасіння пожеж запропоновано метод мережевого планування. Для цього застосовано системний підхід, в межах якого використані наукові методи узагальнення й порівняння, аналізу і синтезу, математичного моделювання, мережевого планування та динамічного програмування. Розроблена мережева модель оперативних дій рятувальних формувань у графічному та математичному поданні, яка дає можливість аналізувати їх ефективність виходячи з раціонального використання наявних ресурсів. Сформульована задача формування виконавців окремих робіт під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. Суть задачі зведено до можливості вибрати із множини підрозділів цивільного захисту, що складають угруповання сил, потрібних виконавців та призначити їх на відповідні роботи так, щоб був виконаний весь комплекс робіт в заданий директивний термін і з мінімальними затратами. Формалізація відповідної задачі дала можливість привести її до класичної задачі про призначення, яка вирішується алгоритмом Куна. Застосування алгоритму динамічного програмування дозволило отримати початкове наближення рішення задачі, при якому затрати на виконання комплексу аварійно-рятувальних робіт будуть мінімальними. Для оптимізації мережевого графу оперативних дій за рахунок зменшення довжини критичного шляху запропонований підхід заснований на використанні методу динамічного програмування. Результати дослідження синтезовані у алгоритм, реалізація якого полягає в послідовному уточненні призначень виконавців на роботи, що дозволяє визначити мінімальні витрати на реалізацію плану рятувальної операції в задані терміни (якщо таке рішення існує), а також оцінити мінімальний час проведення аварійно-рятувальних робіт при заданій множині можливих виконавців шляхом вирішення двоїстої задачі.

Ключові слова: тактичні можливості, оперативні дії, мережевий граф, критичний шлях

1. Вступ

Сучасний стан техногенної безпеки вимагає від сил цивільного захисту підвищення ефективності оперативних дій під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (НС). До основних напрямків наукової діяльності в сучасних умовах, які сприяють вирішенню цього завдання, можна віднести дослідження тактичних можливостей і ефективності оперативних дій аварійно-рятувальних формувань.

Важливість і необхідність дослідження викликана безпосередніми запитам практиці, так як відсутність спеціальних оціночних показників з тактичних можливостей і ефективності оперативних дій підрозділів не дозволяє якісно оцінити їх роботу під час ліквідації наслідків НС чи гасіння пожежі.

В сучасних умовах під час аналізу дій рятувальних формувань використовується інформація, яка міститься в оперативній документації штабу з ліквідації наслідків НС (штабу на пожежі). Для дослідження, як правило, будуються лінійні або стрічкові графіки (плани), які відображають тривалість оперативних дій та залучені сили і засоби (ресурси). Основним недоліком таких графіків (планів) є відсутність можливості тісної взаємозв'язки окремих видів оперативних дій (робіт) в єдину систему або загальний процес досягнення запланованих кінцевих цілей рятувальної операції. Весь процес аналізу зводиться до визначення показни-

ків тактичних можливостей підрозділів як кількісних показників роботи окремих пристроїв гасіння або окремих елементів оперативних дій чи роботи пожежного (аварійно-рятувального) автомобіля. Однак ці показники не відображають реальних відносин органу управління і підрозділів ЦЗ (виконавців) коли реалізація комплексу рятувальних робіт має бути більш ефективною.

Таким чином, на сьогодні існує потреба в такому апараті аналізу оперативних дій, який би, по-перше, був ефективним засобом під час планування різноманітних робіт, координації їх між органом управління та виконавцями, а по-друге, дозволяв визначати необхідні ресурси та їх раціональне використання.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Дослідження проблемних питань щодо забезпечення ефективності ліквідації наслідків НС, як правило здійснюється у багатьох напрямках, досліджуються різні фактори [1, 2]. З точки зору кризового управління актуальним є оцінювання готовності аварійно-рятувальних формувань до дій за призначенням та обґрунтування або аналіз їх тактичних можливостей.

Так в роботі [3] запропоновано системний підхід і принцип оцінки готовності підрозділів ЦЗ до дій при НС, оснований на врахуванні комплексних показників технічного оснащення підрозділів і професійної підготовленості їх особового складу. В якості показника рівня готовності підрозділу ЦЗ використана ймовірність оцінки ступеню професійно-технічної готовності виконати завдання з ліквідації наслідків НС у встановлені терміни. Отримані аналітичні залежності рівня готовності підрозділів ЦЗ від рівня їх оснащення як однотипною, так і різнотипною технікою. Рівень готовності підрозділу оцінюється за загальною шкалою – «готовий до виконання завдань», «обмежено готовий до виконання завдань», «не відповідає вимогам».

Разом з тим, запропонований показник рівня готовності підрозділів до дій у НС дає змогу провести тільки порівняльний аналіз стану готовності підрозділів. Тобто запропонована модель оцінки рівня готовності підрозділу ЦЗ до дій при НС не описує комплекс взаємопов'язаних операцій (робіт), виконання яких забезпечить досягнення кінцевої мети у встановлений час, і не враховує динаміку зміни тактичних можливостей підрозділів з урахуванням перерозподілу наявних ресурсів. Таким чином, отримані результати можуть бути враховані під час планування аварійно-рятувальних робіт тільки як фактор попередньої підготовки підрозділів.

Під час обґрунтування або аналізу тактичних можливостей, як правило, досліджуються лише певні нормовані показники: час роботи пристроїв гасіння, можливі площа і об'єм гасіння повітряно-механічною піною, площа гасіння одним стволом, гранична відстань подачі вогнегасних речовин, параметри розвитку або гасіння пожежі і т.п. Як правило, визначення цих показників дає можливість оцінити зможе або не зможе рятувальне формування виконати ці кількісні показники. Так в роботі [4] отримані залежності, що дають змогу встановити значення площі пожежі від тривалості її вільного розвитку та лінійної швидкості розповсюдження, визначити значення тривалості слідування пожежного автомобіля до місця виклику та площі пожежі відповідно. На основі отриманих залежностей розроблено імітаційну модель ефективного управління діями пожежно-рятувальних підрозділів. Суть моделі зводиться до мінімізації часу вільного розвитку пожежі, часу локалізації та часу ліквідації пожежі за рахунок оптимізації маршруту руху пожежно-рятувальної техніки.

Разом з тим, оптимізація маршруту слідування розглядається з точки зору витрат на проїзд дорожньою мережею. Тобто оптимізується по суті тільки один елемент одного виду оперативних дій (збір, виїзд та прямування до місці пожежі), і робиться припущення, що за рахунок цього мінімізуються параметри розвитку і гасіння пожежі. Разом з тим, на відповідні параметри, насамперед, можуть впливати час проведення розвідки пожежі, час оперативного розгортання тощо. Крім того, залишаються без відповіді питання «Як оцінити ефективність всього комплексу оперативних дій? Як оптимізувати ці дії, щоб вони були більш ефективними», «Як вплинути на ефективність їх ведення в процесі ліквідації пожежі чи наслідків аварії».

В роботі [5] запропонована імітаційна модель рятування постраждалого з третього поверху з використанням похилої переправи за допомогою нош рятувальних вогнезахисних. Для моделювання використані методи мережевого планування. З метою оцінювання ефективності дій рятувальників розраховані основні параметри мережної моделі, визначені значення математичного очікування та дисперсії критичного шляху. Разом з тим, проведене моделювання дає можливість, шляхом порівняння відповідних значень, сформулювати рекомендації щодо підвищення ефективності виконання рятувальниками типових операцій під час ведення оперативних дій. При чому дослідження стосується технології виконання локального завдання, і не враховує комплекс робіт з ліквідації наслідків НС.

Таким чином, в процесі дослідження проблемних питань щодо оцінювання ефективності оперативних дій рятувальних формувань запропоновані моделі, реалізація яких основана на застосуванні або комплексного показника оцінювання готовності формувань до дій за призначенням або критеріїв оптимізації окремих оперативних дій (робіт). Крім того, ідея, яка закладена в основу досліджень – це обчислення певних показників і порівняння їх між собою або з критеріями оцінювання оперативної діяльності формувань, причому останні визначені на основі статистичного аналізу оперативних дій або експертним шляхом. Тобто, в кінцевому підсумку, отримані результати досліджень дозволяють аналізувати або етап попередньої підготовки підрозділів до дій або окремих вид оперативних дій під час виконання локального завдання, а не весь комплекс робіт з ліквідації наслідків НС. Тобто залишається невирішеним проблема аналізу оперативних дій як комплексу взаємопов'язаних операцій (робіт) з урахуванням раціонального розподілу наявних ресурсів.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розроблення мережевої моделі оперативних дій рятувальних формувань під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, яка б давала можливість аналізувати їх ефективність виходячи з раціонального використання наявних ресурсів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити мережеву модель оперативних дій аварійно-рятувальних формувань під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій;
- сформулювати та формалізувати задачу формування виконавців окремих робіт під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій;
- оптимізувати мережевий граф оперативних дій за рахунок зменшення довжини критичного шляху.

4. Розроблення мережевої моделі оперативних дій

У практичній діяльності на етапах попереднього планування оперативних дій, під час підготовки задумів проведення командно-штабних і тактико-спеціальних навчань, під час оцінювання дій рятувальних формувань важливо розглядати процес гасіння пожежі або ліквідації наслідків НС як комплекс взаємопов'язаних операцій (робіт), виконання яких забезпечить досягнення кінцевої мети у встановлений час. З цієї точки зору для дослідження пропонується використовувати метод мережевого планування [6, 7].

В основі методу мережевого планування лежить мережева модель (граф), що відображає планований процес. Методи мережевого планування засновані на ідеї оптимізації критичного шляху [8, 9]. Для визначення оптимального розподілу ресурсу (призначення виконавців) для виконання робіт проекту необхідно знайти критичні шляхи для кожного розподілу (призначення), оцінити їх довжину і вартість. Мережева модель – математична модель, що відображає весь комплекс робіт і подій, пов'язаних з реалізацією проекту в їх логічній і технологічній послідовності у вигляді графа G.

Виходячи з вище зазначеного, любий процес гасіння пожежі або ліквідації наслідків НС (комплекс взаємопов'язаних операцій (робіт)) можна описати за допомогою мережевої моделі. Наприклад, графічна модель дій підрозділів з гасіння пожежі (рис. 1) являє собою зображення окремих видів оперативних дій в логічній послідовності і взаємозв'язку. Характеристика комплексу оперативних дій (робіт) з гасіння пожежі й подій, що настають в ході виконання оперативних дій, наведені в табл. 1.

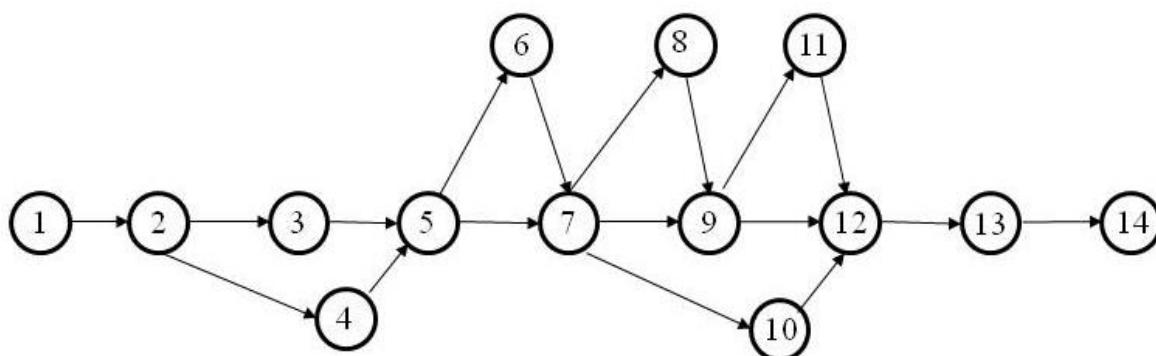


Рис. 1. Мережева модель (граф) дій підрозділу з гасіння пожежі (варіант)

Табл. 1. Характеристика дій і подій

Код дій	Характеристика дій	№ події	Характеристика події
1-2	Отримано сповіщення про пожежу	1	Сповіднення прийняте
2-3	Збір та виїзд караулу за тривоною	2	Караул зібрався й виїхав
1-3	Прямуювання до місця пожежі	3	Караул прибув до місця пожежі
2-4	Розвідка на шляху прямування	4	Попередня інформація зібрана
3-5	Розвідка після прибуття на пожежу	5	Оцінка ситуації проведена
5-6	Видалення диму та зниження температури	6	Дим видалений
5-7	Проведення оперативного розгортання в засобах захисту органів дихання	7	Сили та засоби розгорнуті
6-7	Проведення оперативного розгортання	7	
7-8	Рятування людей	8	Люди врятовані

Продовження табл. 1.

7-9	Подача вогнегасних речовин	9	Пожежа локалізована
8-9	Нарощування сил і засобів	9	
7-10	Захист конструкцій від нагрівання	10	Конструкції захищені
9-11	Розкриття і розбирання конструкцій	11	Конструкції розібрані
9-12	Подача вогнегасних речовин з метою припинення горіння	12	Пожежа ліквідована
11-12	Подача вогнегасних речовин для гасіння прихованих осередків горіння	12	
12-13	Згортання технічних засобів	13	Пожежно-технічне оснащення зібране
13-14	Прямуювання до місця постійної дислокації	14	Караул прибув до місця постійної дислокації

Математичний опис моделі буде мати наступний вигляд. Нехай мережевий граф G є системою (V, U, φ, w) , де $V = \{1, 2, \dots, v\}$ – множина вершин графа (події); $U = \{u\}$ – множина ребер графа (робіт), причому $V \cap U = \emptyset$; φ – функція інцидентності, що ставить у відповідність кожному ребру $u \in U$ упорядковану пару вершин (v_1, v_2) – початком і кінцем ребра u .

Ребро u знаходиться у відношенні інцидентності зі своїми вершинами. Функція $w(u)$ визначає трудомісткість виконання роботи u виходячи з нормативів експертних оцінок або досвіду і вимірюється в одиницях трудомісткості, вартості і т.п.

До розрахункових параметрів моделі (графіка) відносяться: тривалість ведення окремих робіт, ранні та пізні терміни початку і закінчення робіт, резерви часу, резерви повних шляхів.

Тривалість якої роботи t_{ij} визначається за нормативними показниками, довідників або як ймовірна очікувана величина за даними експертних оцінок.

Ранній термін настання події $T_j^{p.n.}$ показує найдовшу тривалість шляху між подіями i та j . Якщо для події j більше однієї вхідної роботи, то $T_j^{p.n.}$ визначається за формулою:

$$T_j^{p.n.} = \max_{(i,j) \in E_j} \{T_i^{p.n.} + t_{ij}\}, \quad (1)$$

де $T_i^{p.n.}$ – ранній термін настання події i ; t_{ij} – тривалість виконання роботи між подіями i та j ; E_j – множина всіх робіт, які завершуються в події j .

Пізній термін настання події $T_i^{i.f.}$ – різниця між пізнім терміном настання події j ($T_j^{i.f.}$) та тривалістю роботи t_{ij} . Це найпізніший допустимий термін, до якого подія повинна закінчитись, щоб не привести при цьому до зриву термінів виконання кінцевої події. Якщо з події i є більше однієї вихідної роботи, то вибирають найменшу серед різниць:

$$T_i^{i.f.} = \min_{(i,j) \in E_i} \{T_j^{i.f.} - t_{ij}\}, \quad (2)$$

де E_i – множина всіх робіт, які виходять з події i .

Пізній термін настання подій визначається зворотним ходом, починаючи з останньої події, тому для останньої події K ранній термін настання події дорівнює пізньому терміну ($T_k^{p.n.} = T_k^{n.n.}$).

Резерв часу настання подій Rt_i показує на який гранично допустимий термін можна затримати настання події, не викликаючи при цьому збільшення терміну виконання всього комплексу робіт, і визначається за формулою:

$$Rt_{ij} = T_j^{p.n.} - T_i^{p.n.} - t_{ij}, \quad (3)$$

де $T_j^{p.n.}$ – ранній термін настання останньої події j ; $T_i^{p.n.}$ – ранній термін настання початкової події i .

Повний резерв часу роботи Rt_{ij}^i – це той час, на який можна затримати виконання настання події, не викликаючи при цьому збільшення терміну виконання всього комплексу робіт, але при цьому порушуються терміни виконання деяких робіт та настання деяких подій. Він визначається за формулою:

$$Rt_{ij}^i = T_j^{p.n.} - T_i^{p.n.} - t_{ij}. \quad (4)$$

Шлях характеризується тривалістю та резервом. Тривалість шляху – це сума тривалостей тих робіт, які його утворюють. Резерв шляху – це різниця між довжиною критичного шляху та того шляху, який досліджується. Критичний шлях ($L_{кр}$) – це шлях найбільшої тривалості. Роботи, які лежать на критичному шляху, резерву часу не мають.

Найважливішим параметром мережевого графіка є довжина критичного шляху $T_{кр}$, так як вона визначає загальний час проведення оперативних дій. Тому $T_{кр}$ не повинна перевищувати встановлений, директивний термін $T_{дир.}$.

Моделювання мережевого графа G доцільно здійснювати за наступним порядком:

- розбиття процесу ліквідації наслідків НС на роботи;
- формування переліку робіт та подій;
- з'ясування логічних взаємозв'язків між роботами та подіями і послідовності їх виконання;
- закріплення робіт за виконавцями;
- визначення тривалості робіт;
- складання та зображення мережевого графу;
- розрахунок числових характеристик подій та робіт, визначення критичного шляху;
- аналіз та оптимізація графу G .

Планування і управління процесом за методом мережевого планування здійснюється послідовно в три етапи. На першому етапі будується мережева модель (графік), на другому етапі – визначаються розрахункові параметри графіка, і виконується його оптимізація, на третьому – здійснюється оперативний контроль і управління ходом виконання оперативних завдань.

5. Постановка задачі визначення виконавців окремих робіт

В основі організації аварійно-рятувальних робіт та гасіння пожеж лежить раціональне поєднання в часі та в просторі всіх видів оперативних дій аварійно-рятувальних формувань. Ефективність оперативних дій, в першу чергу, залежить від того наскільки повно підрозділи використали свої тактичні можливості. Під тактичними можливостями розуміється здатність тактичного підрозділу, оснащеного технічними засобами, виконати певні завдання за визначений час. Іншими словами, підрозділ має ефективно виконати певну роботу. Саме робота характеризує любую дію, яка вимагає витрат часу та ресурсів.

В умовах ліквідації наслідків НС важливою задачею для органу управління є задача визначення необхідних виконавців. Тобто органу управління важливо із наявних підрозділів, які можуть мати різні тактичні можливості, поставити завдання саме тим виконавцям і саме такі, виконання яких дасть можливість більш ефективно виконати весь комплекс робіт. Мережева модель у такому випадку може мати велику розмірність через складність структури всього комплексу робіт, що значно ускладнює розв'язання відповідної задачі.

У такому випадку суть задачі доцільно звести до наступного: вибрати із множини підрозділів ЦЗ, що складають угруповання сил, потрібних виконавців та призначити їх на відповідні роботи так, щоб був виконаний весь комплекс робіт в заданий директивний термін і з мінімальними затратами.

У такому вигляді задача схожа на класичну задачу про призначення [10, 11], але є відмінність – вводиться обмеження у вигляді заданого директивного терміну ($T_{дир.}$). Досвід рішення таких задач є у сфері дослідження складних технічних систем [12]. Тому з урахуванням ідей [11, 12] проведемо формалізацію поставленої задачі.

Нехай є множина виконавців $I = \{1, 2, \dots, n\}$, множина робіт $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ і $(n \times n)$ – матриця чисельних оцінок (тактичних можливостей) $C = \{c_{ij}\}$, де c_{ij} – оцінка закріплення виконавця i за роботою r_j , $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$.

Призначення – взаємно однозначні відображення множини $\{1, 2, \dots, n\}$; призначення q виконавцю i розподіляє роботу $r_{q(i)}$, чисельної оцінкою якого є $c_{iq(i)}$ – елемент матриці C , $i = 1, 2, \dots, n$.

Кожне призначення q оцінюємо за критерієм $K_q = \sum_{i=1}^n c_{iq(i)}$. Зміст цього критерію – сумарні витрати виконавців при призначенні q . Потрібно знайти призначення, при якому сумарні витрати виконавців мінімальні. Задача може бути сформульована у вигляді

$$\sum_{i=1}^n c_{iq(i)} \xrightarrow{q} \min, \quad (5)$$

$$T_{кр} = T[L_{кр}(G, q)] \leq T_{дир.}, \quad (6)$$

де $T_{кр}$ – довжина критичного шляху $L_{кр}$ мережевого графа G .

Вирішити сформульовану задачу Z можливо методом динамічного програмування [13, 14]. Нехай існує сукупність окремих завдань $Z(i, z_i)$, сформульованих за вихідними даними завдання Z , де $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, z_i – i -елементні підмножини множини $\{1, 2, \dots, n\}$. В задачі $Z(i, z_i)$ між виконавцями $\{1, 2, \dots, i\}$ необхідно розподілити роботи, індекси яких перелічені у z_i .

Критерій задачі – сумарна продуктивність наявних виконавців. Оптимальне значення критерію в задачі $Z(i, z_i)$ позначимо $K_{op}(i, z_i)$. Тобто $K_{op}(n, \{1, 2, \dots, n\})$ – оптимальне значення критерію у задачі Z .

Тоді

$$K_{op}(n, \{j\}) = c_{1j} \text{ для всіх } j \in \{1, 2, \dots, n\}. \quad (7)$$

Якщо $i > 1$, то

$$K_{op}(i, z_i) = \min_{j \in z_i} (c_{ij} + K_{op}(i-1, z_i \setminus \{j\})), \quad (8)$$

де $i = 2, 3, \dots, n$; z_i – довільна i -елементна підмножина $\{1, 2, \dots, n\}$.

Вирази (7), (8) є співвідношеннями динамічного програмування для вирішення задачі Z . Класична задача про призначення вирішується угорським алгоритмом [15, 16]. Рішення відповідної задачі із застосуванням алгоритму динамічного програмування дозволяє отримати початкове наближення рішення сформульованої задачі, при якому затрати на виконання комплексу аварійно-рятувальних робіт будуть мінімальними. Проте обмеження часу (2) може не виконуватися. У такому випадку, щоб розв'язати загальну задачу необхідно провести оптимізацію мережевого графа.

6. Оптимізація мережевого графа оперативних дій

Оптимізація мережевого графу проводиться з метою скорочення довжини критичного шляху до заданого (якщо це можливо) за рахунок перерозподілу виконавців робіт. В першу чергу приймаються заходи по скороченню тривалості робіт, що знаходяться на критичному шляху. У процесі скорочення тривалості робіт критичний шлях може змінитися, і в подальшому процес оптимізації повинен бути спрямований на скорочення тривалості робіт нового критичного шляху. Процес оптимізації припиняється, якщо подальше скорочення неможливо.

Для вирішення задачі знаходження критичних шляхів мережевого графа застосуємо підхід, представлений в [12], заснований на методі динамічного програмування.

Нехай заданий кінцевий зважений орієнтований граф G з множиною вершин $V = \{1, 2, \dots, v\}$, значення ваги всіх дуг невід'ємні. Вагу дуг ототожнюємо з їх довжиною. Послідовність i_1, i_2, \dots, i_k вершин графа G визначає шлях з вершини i_1 у вершину i_k якщо для кожного $l = 1, 2, \dots, k-1$ в даному графі є дуга (i_l, i_{l+1}) . Зазначені дуги утворюють шлях i_1, i_2, \dots, i_k . Сума довжин дуг, що утворюють шлях, називається довжиною цього шляху. Для кожної вершини x графа потрібно знайти шлях мінімальної довжини (критичний шлях) з вершини 1 у вершину x .

Якщо припустити, що є множина H вершин графа G , довжина критичних шляхів в які із вершини 1 уже відома, то рекурентним співвідношенням для вирішення задачі визначення критичних шляхів методом динамічного програмування є

$$s(1, M \setminus H) = \max_{i \in H, j \in N \setminus H} (s(i) + \tau(i, j)), \quad (9)$$

де $s(1, N \setminus H)$ – мінімальне значення із довжин критичного шляху від вершини 1 до вершини множини M , $M \subseteq \{2, 3, \dots, v\}$; $s(i)$ – довжина критичного шляху із вершини 1 до вершини i ; $\tau(i, j)$ – вага дуги графа G .

Користуючись цією формулою, на першому кроці визначаємо найближчу до вершини 1 вершину i_1 із множини $\{2,3,\dots,v\}$. На другому кроці знаходимо найближчу до вершини 1 вершину i_2 із множини $\{2,3,\dots,v\} \setminus \{i_1\}$; на третьому кроці – найближчу до вершини 1 вершину i_3 множини $\{2,3,\dots,v\} \setminus \{i_1, i_2\}$ і т.д. В процесі розрахунку будується дерево D критичних шляхів з вершини 1 в інші вершини. Коренем D є вершина 1. Якщо на довільному кроці розрахунку мінімум правої частини (9) реалізується на парі (i_x, j_x) , то до побудованого дерева додається ребро (i_x, j_x) .

Таким чином, вирішення спільного завдання, формалізованого виразами (5), (6), можна описати алгоритмом, блок-схема якого представлена на рис. 2.

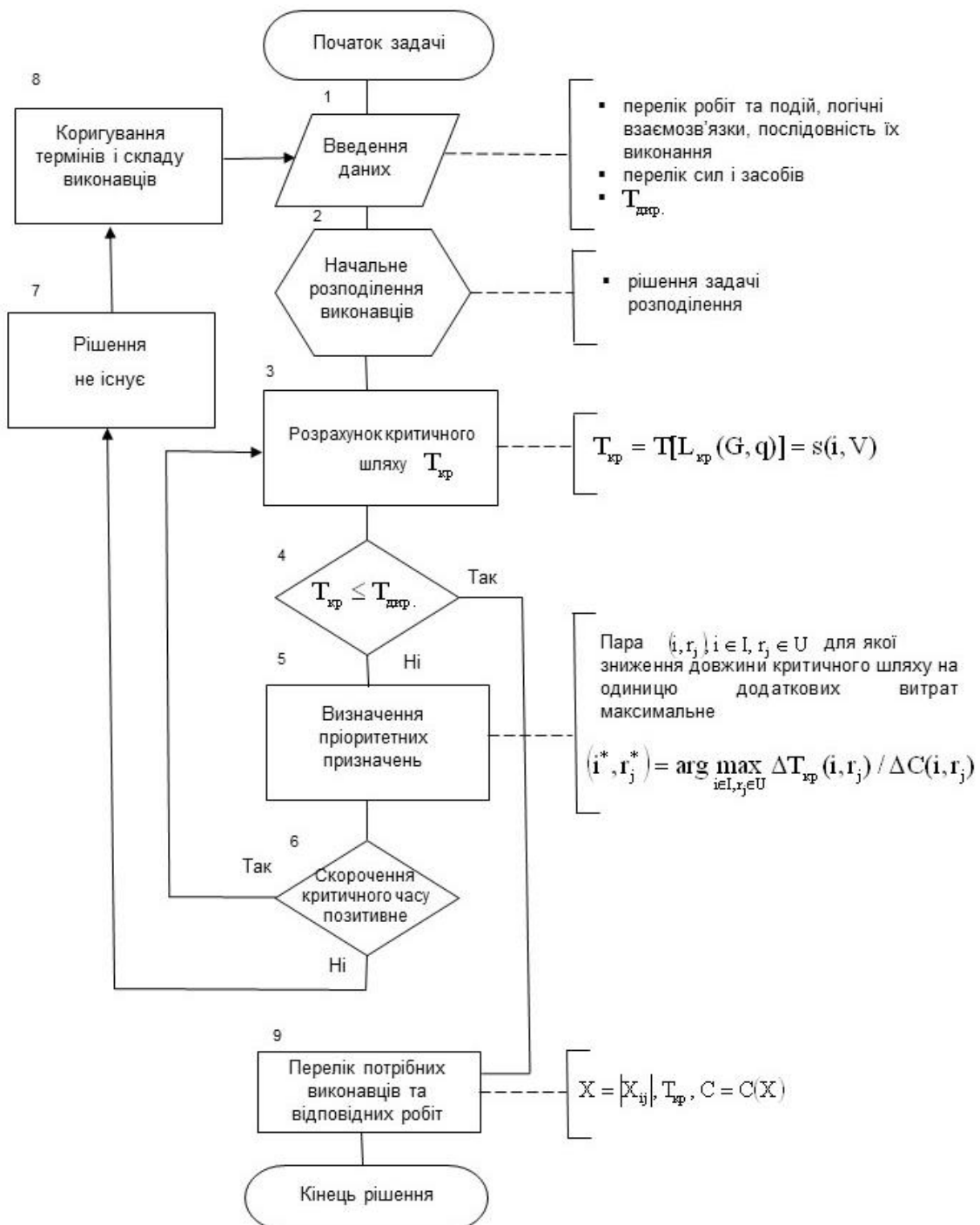


Рис. 2. Блок-схема алгоритму вирішення задачі розподілення виконавців

Представлений алгоритм вирішення задачі дозволяє визначити мінімальні витрати на реалізацію плану рятувальної операції в задані терміни (якщо таке рішення існує), а також оцінити мінімальний час проведення аварійно-рятувальних робіт при заданій множині можливих виконавців шляхом вирішення двоїстої задачі.

Запропонована модель оптимізації може бути застосована, як правило, до простих мережеских моделей. Для більш складних доцільно розглянути чисельні методи оптимізації [17, 18]. Так при обмеженнях за ресурсами застосування так званого мурашиного алгоритму [19, 20] дозволяє значно зменшити загальний цикл виконання робіт.

7. Обговорення результатів побудови та оптимізації мережевої моделі оперативних дій

Вирішення наукового завдання здійснено із застосуванням мережевої моделі. На мережеских моделях розв'язуються задачі оптимізації термінів реалізації комплексу операцій, оптимізації розподілу і використання ресурсів. Аналіз мережеских моделей полягає у визначенні певних характеристик, виходячи із заданих параметрів, використаних у цій моделі. Базовими характеристиками є ранні і пізні терміни настання подій, пізнього початку і раннього закінчення операцій, резервів часу подій та операцій, критичний шлях. Результати здійсненого аналізу мережевої моделі дає змогу зробити висновок щодо міри задоволення визначеного плану виконання рятувальної операції прийнятним вимогам і, за необхідності, обумовлюють зміни цього плану у потрібному напрямі. Сутність вирішення спільного завдання, формалізованого виразами (5), (6), полягає в послідовному уточненні призначень виконавців на роботи.

Важливо зауважити, що під час проведення аварійно-рятувальних робіт будь-яке угруповання сил ЦЗ зазвичай має не тільки обмежені ресурси (матеріально-технічні, людські), але й обмеження за часом проведення робіт. Зважаючи на це, після приведення мережеского графа до заданого терміну необхідно проаналізувати чи володіє відповідне угруповання сил достатньою кількістю ресурсів для виконання аварійно-рятувальних робіт згідно з передбаченим мережеским графом, а вже потім провести оптимізацію по скороченню тривалості робіт, що знаходяться на критичному шляху.

Перевага мережного планування полягає в тому, що аналіз критичного шляху визначає завдання, які повинні бути виконані вчасно, щоб рятувальна операція в цілому була виконаний в установлений термін, а також визначає, які завдання можна на певний час відкласти, чи необхідно перерозподілити ресурси для вирішення невиконаних завдань.

Ще одна перевага методу аналізу критичного шляху полягає в тому, що він допомагає визначити мінімальний час, необхідний для виконання робіт. Якщо потрібно провести рятувальну операцію швидше, він допомагає визначити, які етапи робіт слід прискорити, щоб завершити рятувальну операцію у межах відпущеного часу. Це допомагає мінімізувати витрати, досягнувши при цьому мети. Аналіз мережного графіка спрямовано на виявлення можливості скорочення загального терміну виконання всього комплексу робіт за рахунок зменшення тривалості робіт критичного шляху. У цьому тривалість критичних робіт, які мають резерв часу, може бути збільшена без шкоди загального терміну виконання.

Недоліком методу аналізу критичного шляху є не такий очевидний взаємозв'язок завдань та часу у разі складних рятувальних операцій. Це може, ускладнити розуміння завдань для тих, хто не знайомий з цим методом. Крім того, оп-

тимізація робіт з урахуванням зміни ресурсів, як правило, може бути застосована до простих мережевих моделей. Для більш складних необхідно застосовувати чисельні методи оптимізації.

Зауважимо, що як така величина резерву часу ще не достатньою мірою характеризує залежність виконання всього комплексу від тієї чи іншої роботи некритичного шляху. Важливо розуміти із якою послідовністю робіт цей резерв часу співвідноситься – яка напруженість цих робіт. Крім того, запропонований підхід не враховує коливання тривалості роботи. Для оцінювання часу завершення використовується найсприятливіший прогноз. Врахувати ймовірнісний характер тривалості усіх або окремих робіт під час розрахунку параметрів часу у мережевій моделі можливо шляхом застосування методу PERT. Відповідно, отримані результати дослідження можуть набути подальшого розвитку. Наприклад, замість однієї детермінованої величини тривалості робіт задаються три оцінки тривалості: оптимістична; песимістична і найбільш ймовірна. Потім імовірнісна мережева модель перетворюється на детерміновану шляхом заміни трьох оцінок тривалості кожної з робіт однією величиною, яка називається очікуваною тривалістю і розраховується як середньозважене арифметичне трьох оцінок тривалості даної роботи.

У сучасних системах підтримки прийняття рішень мережеві методи планування можуть бути реалізовані на високому професійно-технічному рівні в процесі застосування програмного забезпечення пакету Microsoft Office Project, що забезпечує широкий спектр функціональних можливостей рішення і аналізу завдань організації, планування та управління аварійно-рятувальними роботами під час ліквідації наслідків НС та гасіння пожеж.

Запропонований підхід дає можливість на основі застосування сучасних методів прийняття управлінських рішень удосконалити управління оперативними діями рятувальних формувань шляхом оптимізації їх тактичних можливостей в ході ліквідації наслідків НС.

8. Висновки

1. Розроблена мережева модель оперативних дій аварійно-рятувальних формувань під час ліквідації наслідків НС у графічному та математичному поданні. Перевага методу мережевого планування в порівнянні з використовуваними в тому, що він дозволяє не тільки планувати або аналізувати процес, а й управляти ходом його виконання, що особливо актуально для планового періоду ліквідації наслідків НС.

2. Сформульована задача формування виконавців окремих робіт під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. Суть задачі зведено до можливості вибрати із множини підрозділів цивільного захисту, що складають угруповання сил, потрібних виконавців та призначити їх на відповідні роботи так, щоб був виконаний весь комплекс робіт в заданий директивний термін і з мінімальними затратами. Формалізація відповідної задачі дала можливість привести її до класичної задачі про призначення, яка вирішується алгоритмом Куна. Застосування алгоритму динамічного програмування дозволило отримати початкове наближення рішення задачі, при якому затрати на виконання комплексу аварійно-рятувальних робіт будуть мінімальними.

3. Для оптимізації мережевого графу оперативних дій за рахунок зменшення довжини критичного шляху запропонований підхід заснований на використанні методу динамічного програмування. Однак оптимізація робіт з урахуванням зміни ресурсів застосовується, як правило лише до простих мережевих моделей. Для більш

складних необхідно застосовувати чисельні методи оптимізації. Результати дослідження синтезовані у алгоритм, реалізація якого полягає в послідовному уточненні призначень виконавців на роботи, що дозволяє визначити мінімальні витрати на реалізацію плану рятувальної операції в задані терміни (якщо таке рішення існує), а також оцінити мінімальний час проведення аварійно-рятувальних робіт при заданій множині можливих виконавців шляхом вирішення двоїстої задачі. За попередніми розрахунками використання методу мережевого планування сприяє скороченню термінів проведення аварійно-рятувальних робіт на 15-20 %, забезпечує раціональне використання людських ресурсів і техніки. Таким чином, застосування методу мережевого планування в системі управління силами цивільного захисту дає можливість аналізувати ефективність виконання аварійно-рятувальних робіт і гасіння пожеж в контексті раціонального використання наявних ресурсів. Запропонований підхід може бути використаний під час попереднього планування оперативних дій, підготовки задумів проведення командно-штабних і тактико-спеціальних навчань, під час оцінювання дій аварійно-рятувальних формувань тощо.

Література

1. Geng S., Hou H., Geng J. The Mechanism of Operation Effectiveness of Emergency Shelter Rescue Systems. *Sustainability*. 2021. 13. 16 p. doi: 10.3390/su13105540
2. Factors that affect rescue time in urban search and rescue (USAR) operations / M. Statheropoulos and av. *Natural Hazards*. 2015. 75. P. 57–69. doi: 10.1007/s11069-014-1304-3
3. Tiutiunyk V. V., Ivanets H. V., Tolkunov I. A., Stetsyuk E. I. System approach for readiness assessment units of civil defense to actions at emergency situations. *Наукoвий вісник НГУ*. 2018. № 1. С. 99–105. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/8390>
4. Pasnak I., Prydatko O., Gavrilyk A.. Development of algorithms for efficient management of fire rescue units. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. 3/3 (81). P. 22–28. doi: 10.15587/1729-4061.2016.71604P
5. Бородич П. Ю., Пономаренко Р. В. Імітаційне моделювання рятування постраждалого з третього поверху з використанням похилої переправи за допомогою НРВ-1. *Проблеми пожежної безпеки*. 2016. № 39. С. 49–54. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/1082>
6. Briggs D. G. Comparison between Deterministic and Stochastic Time Estimating Techniques. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. IJARSET. 2017. URL: <http://www.ijarset.com/upload/2017/july/21-IJARSET-daketima.pdf>
7. Mašće Irena, Singolo Romaldo, Jurišić Ino. Network Planning Method in Optimizing Vessel Utilization – Laytime Calculation. *Naše more*. 2018. 5(3). P. 146–150. doi: 10.17818/NM/2018/3.3
8. Atin S., Lubis Rehansyah. Implementation of Critical Path Method in Project Planning and Scheduling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. P. 1–6. doi: 10.1088/1757-899X/662/2/022031
9. Nowpada Ravi Shankar, Rao Peddi, Siresha S., Madhuri K.Usha. (2011). Critical Path Method in a Project Network using Ant Colony Optimization. *International Journal of Computational Intelligence Research*. 2011. Vol. 7. № 1. P. 7–16. URL: <http://www.ripublication.com/ijcir.htm>
10. Neha Rai1, Khan A. J., Brief A. Review on Classic Assignment Problem and its Applications. *Journal of Engineering (IOSRJEN)*. 2019. Vol. 09. Is. 9. Series I. P. 73–81. URL: http://iosrjen.org/Papers/vol9_issue9/Series-1/M0909017381.pdf

11. A New Technique for Finding the Optimal Solution to Assignment Problems with Maximization Objective Function / Haleemah Jawad Kadhim et al. Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1963. P. 1–8. doi: 10.1088/1742-6596/1963/1/012104

12. Допира Р. В., Кордюков Р. Ю., Беглецов А. А., Сергиенко С. В. Метод сетевого планирования разработки сложных технических систем. Программные продукты и системы. 2014. № 2(106). С. 22–26. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-setevogo-planirovaniya-razrabotki-slozhnyh-tehnicheskikh-sistem-1>

13. Alexander Shapiro. Analysis of stochastic dual dynamic programming method. European Journal of Operational Research. 2011. Vol. 209. Is. 1. P. 63–72.

14. Michael Solty. An Introduction to the Analysis of Algorithms. Chapter 4: Dynamic Programming. 2018. P. 71–93. URL: https://doi.org/10.1142/9789813235915_0004

15. Munapo E. Development of an accelerating hungarian method for assignment problems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. 4/4 (106). P. 6–13. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209172>

16. Algorithm Examples. URL: <http://cplusplus.algorithmexamples.com/web/Graphs/BipartiteMatchingKuhn.html>

17. Sergiy Butenko, Panos M. Pardalos. Numerical Methods and Optimization An Introduction. Chapman and Hall/CRC. 2014. 412 p.

18. Tyatyushkin A. Numerical optimization methods for controlled systems with parameters. Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2017. 57. P. 1592–1606. doi:10.1134/S096554251710013X

19. Vijayan Vishnu, Achu V., Riyana M. S, Jayakrishnan R. Time-cost-risk optimization in construction work by using ant colony algorithm. International Research Journal of engineering and Technology. 2018. Vol. 05. Is. 04. P. 2298–2306.

20. Mahmudova Shafagat. Application of Ant Algorithm for Software Optimization. Review of Information Engineering and Applications. 2020. 7. 6–17. doi:10.18488/journal.79.2020.71.6.17

I. Neklonskyi¹, PhD, Lecturer of the Department

S. Ragimov¹, PhD, Associate Professor, Lecturer of the Department

M. Novozhylova², DSc, Professor, Head of Department

¹*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

²*O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine*

ANALYSIS OF OPERATIONAL ACTIONS OF EMERGENCY RESCUE FORMATIONS USING THE METHOD OF NETWORK PLANNING

A network model of operational actions of emergency rescue teams in the elimination of the consequences of emergency situations in a graphical and mathematical representation has been developed. The use of the model makes it possible to plan or analyze the process of organizing operational actions of civil protection units, to manage the course of its implementation. This is relevant for the planned period of emergency response. The task of forming performers of individual works in the elimination of the consequences of emergency situations has been formulated. The essence of the task is reduced to the ability to choose from a variety of civil protection units the necessary performers and assign them to work. Moreover, upon the appointment, the entire complex of works was completed within a given deadline and with minimal costs. Formalization of the corresponding problem made it possible to bring it to the classical assignment problem, which is solved by Kuhn's method. The use of a dynamic programming algorithm made it possible to obtain an initial approximation of the solution of the problem,

at which the cost of performing a complex of emergency rescue operations will be minimal. To optimize the network graph of operational actions by reducing the length of the critical path, a dynamic programming method is proposed. The research results are synthesized into an algorithm. The implementation of the algorithm is to consistently clarify the assignments of performers to work. This makes it possible to determine the minimum costs for the implementation of the rescue plan within a given time frame (if such a solution exists), as well as to estimate the minimum time for carrying out emergency rescue operations for a given set of possible performers.

Keywords: tactical capabilities, operational actions, network graph, critical path

References

1. Ferreira, C., Ribeiro, J., Clift, R., Freire, F. (2019). A Circular Economy Approach to Military Munitions: Valorization of Energetic Material from Ammunition Disposal through Incorporation in Civil Explosives. *Sustainability*, 11(1), 1–14. doi: 10.3390/su11010255
2. Liu, H. Wang, Y., Zhu, H. (2015). The technology method research of scrap ammunition destruction, 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Systems (ICMEIS 2015). Atlantis Press, 201–205. doi:10.2991/icmeis-15.2015.39
3. Drobakha, Hr., Neklonskyi, I., Kateshchenok, A., Sobyna, V., Taraduda, D., Borysova, L., & Lysachenko, I. (2019). Structural and functional simulation of interaction in the field of aviation safety by using matrices. *Archives of Materials Science and Engineering*, 95, 2, 67–76. Retrieved from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/9000>
4. Neklonskyi, I. M., Smyrnov, O. M. (2020). Matematychna model protsesu utylizatsii taktychnykh raket 9M21. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 1(31), 211–225. Retrieved from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11794>
5. United Nations Office for Disarmament Affairs. (2015). International ammunition technical guideline IATG 10.10:2015 [E]. Demilitarization and destruction of conventional ammunition. New York: USA. Retrieved from <https://s3.amazonaws.com/unoda-web/wp-content/uploads/2019/05/IATG-10.10-Demilitarization-and-Destruction-V.2.pdf>
6. Karlos, V., & Solomos, G. (2013). Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi: 10.2788/61866
7. Solomos, G., Larcher, M., Valsamos, G., Karlos, V., Casadei, F. (2020). A survey of computational models for blast induced human injuries for security and defence applications : JRC Technical Reports. Ispra: European Commission. doi: 10.2760/685
8. Valsamos, G., Casadei, F., Larcher, M., Solomos, G. (2015). Implementation of Flying Debris Fatal Risk Calculation in EUROPLEXUS. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi: 10.2788/058640
9. Larcher, M., Casadei F., Solomos, G. (2014). Simulation of blast waves by using mapping technology in EUROPLEXUS. Publications Office of the European Union. doi: 10.2788/98310
10. Costin, N. S. (2014). The explosive atmosphere conditions required to carry out an improvised explosive device and numerical simulation of detonation. *Revista Academiei Fortelor Terestre*, 1(73), 132–137. Retrieved from https://www.armyacademy.ro/reviste/rev1_2014/NICULAE.pdf

Надійшла до редколегії: 06.10.2021

Прийнята до друку: 16.11.2021