

*Д.С. БІРЮКОВ*, канд. техн. наук, старший консультант, НІСД, Київ,  
*В.А. ЗАСЛАВСЬКИЙ*, д-р техн. наук, проф., КНУ ім. Тараса  
Шевченка, Київ,  
*А.І. СІДЛЯРЕНКО*, аспірант. КНУ ім. Тараса Шевченка, Київ

## **КРИТИЧНА ІНФРАСТРУКТУРА В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ: НА ПРИКЛАДІ МЕРЕЖІ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ**

В роботі запропонована постановка задачі оптимізації, яка полягає у визначенні плану перевезення осіб при евакуації населення автомобільними транспортними засобами з населених пунктів, що знаходяться в зоні ураження під час надзвичайної ситуації.

**Ключові слова:** евакуація населення, критична інфраструктура, надзвичайна ситуація, автомобільні транспортні засоби.

**Постановка проблеми та аналіз літератури.** Термін критична інфраструктура (КІ) увійшов в обіг ділового, наукового та дипломатичного спілкування з середини 1990-х рр., і спочатку був пов'язаний з інформаційною інфраструктурою. На сьогодні КІ – це великомасштабні фізичні або віртуальні системи та ресурси, втрата яких може призводити до неусувних наслідків для економіки та політичної стабільності держави, здоров'я населення [1, 2]. До елементів КІ прийнято відносити енергетичні системи, транспортні магістральні мережі, нафто- та газопроводи, системи супутникового зв'язку та життєзабезпечення мегаполісів, служби екстреної допомоги населенню та реагування на надзвичайні ситуації (НС), державні органи влади, високотехнологічні та оборонні підприємства тощо.

Умови НС висувають підвищені вимоги до функціонування елементів КІ, створюють специфічні обмеження, які потрібно враховувати при формуванні планів реагування, розробці математичних моделей, методів та програмних систем підтримки прийняття рішень. При реагуванні на НС техногенного (аварія на об'єкті підвищеної небезпеки) або природного характеру (повені, сильні снігопади, т.і.) автомобільні дороги є одним з основних способів доставки аварійних бригад та рятувальників, медичного обладнання та персоналу, інженерно-технічних та транспортних пасажирських засобів.

Досвід реагування на НС та проведення евакуації населення з постраждалих внаслідок НС територій показує, що необхідно враховувати, зокрема, завантаженість, вузькі ділянки та інтенсивність руху по окремим ділянкам автодоріг [3], мати резервні маршрути та

запаси ресурсів [4], враховувати роботу аварійно-рятувальних бригад [5] та відновлення ділянок автошляхів [6]. Розв'язування таких задач здійснюється із застосуванням евристичних та наближених методів [7 – 9].

Розв'язуючи задачу визначення параметрів перевезення населення та пересування автотранспортних засобів, які дозволять евакуювати населення, мінімізувавши ризик зараження людей (очікувану чисельність загиблих), необхідно враховувати: характеристики зараження території (що змінюються в часі), отримані, наприклад, на основі використання моделі просторового переносу отруйних речовин від об'єктів підвищеної небезпеки; пропускну спроможність автомобільних доріг в залежності від умов (розвитку ситуації); наявність автотранспортних засобів та палива в населених пунктах; чисельність населення та кількість місць тимчасового розміщення евакуйованих осіб.

**Мета статті** – розробити математичну задачу планування перевезення осіб автомобільними транспортними засобами при евакуації з населених пунктів, що знаходяться в зоні ураження під час НС.

**Формальна постановка задачі.** Мережа автодоріг представлена графом  $G=(V,E)$ , в якому вершини  $v_i \in V, i \in I = \{1, 2, \dots, n\}$ , відповідають населеним пунктам та перехрестям автодоріг, а дуги  $(v_i, v_j) \in E, v_i, v_j \in V$  – ділянкам автодоріг. Позначимо  $E_i^+$  – множина індексів вершин, які є суміжними з  $v_i, i \in I$ .

Позначимо  $x_{ij}(t)$  – заплановане перевезення населення на момент  $t \in (0, t^*)$  (чисельність осіб, яких відправляють з вершини  $v_i$  у вершину  $v_j$ ),  $y_{ij}(t)$  – потужність (спроможність перевезення населення – кількість місць в автотранспорті) запланованої передислокації автотранспорту в момент  $t \in (0, t^*)$  з вершини  $v_i$  у вершину  $v_j$ .

Кожна вершина на момент часу  $t \in (0, t^*)$  характеризується набором показників, які залежать від  $x_{ij}(t)$  та  $y_{ij}(t), j \in E_i^+ : n_i(\bullet, t)$  – чисельність населення;  $a_i(\bullet, t)$  – потужність (кількість місць для пасажирів) автотранспортних ресурсів;  $e_i(\bullet, t)$  – обсяг наявних паливних ресурсів; та  $r_i$  – кількістю місць для тимчасового розміщення евакуйованих осіб.

В залежності від виду НС (техногенна аварія, природне лихо) стан оточуючого середовища  $s_i(t)$  в кожному пункті, яким відповідають

вершини  $v_i, i \in I$ , може належати до одного стану із деякої скінченної множини  $S = \{1, 2, \dots, m\}$  (кожному стану відповідає діапазон рівнів забруднення території). Нехай задані  $p_i^{(s)}(t)$  – ймовірності перебування вершини  $v_i, i \in I$  в стані  $s$  на момент часу  $t$  та  $h^{(s)} (s \in S)$  – ймовірності загибелі людини на території, що перебуває в умовах перебування в населеному пункті в стані  $s \in S$ . Наприклад, при розрахунку радіаційного зараження території внаслідок аварії можна використати моделі та програмні комплекси, розроблені авторами роботи [10].

Нехай для кожного ребра  $(v_i, v_j) \in E$  задані значення таких характеристик:  $c_{ij}(t)$  – пропускна спроможність автодороги;  $d_{ij}$  – відстань;  $v_{ij}^1$  – швидкість перевезення осіб автотранспортом при евакуації;  $v_{ij}^0$  – швидкість передислокації порожнього автотранспорту.

Тоді можна записати різниці рівняння для чисельності населення у пунктах (вершинах графу):

$$n_i(\bullet, t + \Delta t) = n_i(\bullet, t) + \sum_{j \in E_i^+} x_{ji}(t) \cdot \Delta t \cdot v_{ji}^1 / d_{ji} - \sum_{j \in E_i^+} x_{ij}(t) \cdot \Delta t \cdot v_{ij}^1 / d_{ij}.$$

Звідси запишемо диференціальне рівняння та початкові умови:

$$\frac{dn_i(\bullet, t)}{dt} = \sum_{j \in E_i^+} (v_{ji}^1 x_{ji}(t) - v_{ij}^0 x_{ij}(t)) / d_{ij}, \quad n_i(\bullet, 0) = n_i^0 - \sum_{j \in E_i^+} x_{ij}(0), \quad i \in I,$$

де  $n_i^0$  – задані значення,  $i \in I$ . Подібні диференціальні рівняння можна записати для наявних автотранспортних засобів та палива:

$$\frac{da_i(\bullet, t)}{dt} = \sum_{j \in E_i^+} (v_{ji}^1 (x_{ji}(t) - x_{ij}(t)) + v_{ji}^0 (y_{ji}(t) - y_{ij}(t))) / d_{ij},$$

$$\frac{de_i(\bullet, t)}{dt} = \sum_{j \in E_i^+} C_E (v_{ji}^1 (x_{ji}(t) - x_{ij}(t)) + v_{ji}^0 (y_{ji}(t) - y_{ij}(t))),$$

де  $C_E$  – коефіцієнт витрат палива, а початкові умови матимуть вигляд:

$$a_i(\bullet, 0) = a_i^0 - \sum_{j \in E_i^+} (x_{ij}(0) + y_{ij}(0)) \quad \text{та} \quad e_i(\bullet, 0) = e_i^0 - \sum_{j \in E_i^+} C_E d_{ij} x_{ij}(0), \quad i \in I,$$

$a_i^0, e_i^0$  – задані значення,  $i \in I$ .

Тоді задача полягає у виборі плану транспортування, який мінімізує людські втрати, можливі внаслідок зараження території, і має вигляд:

$$\text{мінімізувати} \quad \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} \int_0^{t^*} h^{(s)} \cdot p_i^{(s)}(t) n(\bullet, t) dt, \quad (1)$$

$$\text{при умовах:} \quad e_i(\bullet, t) \geq 0, a_i(\bullet, t) \geq 0, n_i(\bullet, t) \geq 0, \quad i \in I, t \in (0, t^*), \quad (2)$$

$$\sum_{j \in E_i^+} (x_{ij}(t) + y_{ij}(t)) \leq a_i(\bullet, t), \quad i \in I, t \in (0, t^*), \quad (3)$$

$$\sum_{j \in E_i^+} x_{ij}(t) \leq n_i(\bullet, t), \quad i \in I, t \in (0, t^*), \quad (4)$$

$$y_{ij}(t) + x_{ij}(t) \leq c_{ij}(t), \quad (v_i, v_j) \in E, t \in (0, t^*), \quad (5)$$

$$0 \leq y_{ij}(t), 0 \leq x_{ij}(t), \quad (v_i, v_j) \in E, t \in (0, t^*), \quad (6)$$

$$n_i(\bullet, t^*) \leq n_i(\bullet, 0) + r_i, \quad i \in I. \quad (7)$$

Умова (2) задає невід'ємність об'ємів паливних ресурсів, транспортних засобів та кількості населення в пунктах на весь період планування; (3) означає, що запланована кількість перевезень не перевищує наявної кількості транспортних засобів; (4) – кількість осіб, що планується вивезти з пункту не перевищує наявної кількості населення; (5) – автошлях дозволяє здійснювати перевезення заданої потужності; (6) – невід'ємність чисельності осіб, яких заплановано перевезти, та потужності (кількості місць в автотранспорті) запланованого перевезення; (7) – обмеження на кількість місць для тимчасового розміщення евакуйованого населення.

**Висновки.** Задача планування евакуації населення автомобільним транспортом у випадку надзвичайної ситуації, що загрожує здоров'ю людей на значній території, є складною як в плані моделювання, так і з точки зору розробки алгоритму розв'язування. В даній роботі запропонована модель, що дозволяє здійснювати оптимальне управління транспортними перевезеннями при евакуації.

Модель (1) – (7) є суттєвим спрощенням реальної ситуації. Шляхами її вдосконалення є модифікація критерію (1) задля врахування граничних (смертельних) і перехідних станів здоров'я евакуйованих осіб, чисельності осіб та часу їх перебування на території певного рівня зараження, врахування груп ризику (діти, особи літнього віку, жінки), а також врахування особливостей аварій (необхідність санітарної обробки транспорту, неможливість його повторного використання після дезактивації при радіаційній аварії, т.і.).

**Список літератури:** 1. Uniting and strengthening America by providing appropriate tools required to intercept and obstruct terrorism (USA PATRIOT ACT, 2001) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://frwebgate.access.gpo.gov> 2. European programme for critical infrastructure protection (COM/2006/786 final). – [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

http://eur-lex.europa.eu 3. Modeling emergency evacuation for major hazard industrial sites / *Georgiadou P.S. et al.* // *Reliab. Eng. & Sys. Safety.* – 2007. – 92 (10). – P. 1388 – 1402.

4. *Zaslavsky V.* Risk analyses and redundancy for protection of critical infrastructure / *V. Zaslavsky, Y. Ievgiienko* // *Monographs of System Dependability / Edt. J. Mazurkiewicz, J. Sugier, T. Walkowiak, W. Zamojski.* – Wrocław: Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2010 – P.161 – 173.

5. *Kimms A.* Cell-transmission-based evacuation planning with rescue teams / *A. Kimms, K.-C. Maassen* // *J. Heuristics.* – 2012. – 18 (3). – P. 435 – 471.

6. *Yan S.* Optimal scheduling of emergency roadway repair and subsequent relief distribution / *S. Yan, Y.-L. Shih* // *Computers & Oper. Res.* – 2009. – 36. – P. 2049 – 2065.

7. *Chen Y.* Emergency Evacuation Model and Algorithms / *Y. Chen, D. Xiao* // *J. Transport. Sys. En-g & IT.* – 8 (6). – 2008. – P. 96 – 100.

8. *Tuydes H.* Tabu-based heuristic approach for optimization of network evacuation contraflow / *H. Tuydes, A. Ziliaskopoulos* // *Transport. Res. Record.* – 2006. – № 1964. – P. 157–168.

9. *Liu Y.* Two-level integrated optimization system for planning of emergency evacuation / *Y. Liu, X.R. Lai, G.L. Chang* // *J. Transport. En-g.* – 2006. – 132 (10). – P. 800 – 807.

10. *Бончук Ю.В.* Программный комплекс анализа дозиметрической обстановки при аварийных выбросах АЭС Украины / *Ю.В.Бончук, Н.Н.Талерко, А.Г.Кузьменко* // *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля.* – 2009. – Вип. 12. – С.30–39.

*Статтю представив д.ф.-м.н., проф., зав. кафедри прикладної статистики КНУ ім. Тараса, м. Київ Є.О. Лебедев.*

УДК 519.87; 517.9

**Критическая инфраструктура в условиях чрезвычайных ситуаций: на примере сети автомобильных дорог / Бирюков Д.С., Заславский В.А., Сидляренко А.И.** // *Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование.* – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2012. – №. 62 (968). – С. 3 – 7.

В работе предложена постановка задачи оптимизации, которая заключается в определении плана перевозки людей при эвакуации населения во время чрезвычайной ситуации с территорий (населенных пунктов), находящихся в зоне поражения, автомобильными транспортными средствами. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** эвакуация населения, критическая инфраструктура, чрезвычайная ситуация, автомобильные транспортные средства.

UDC 519.87; 517.9

**Critical infrastructure under conditions of emergency situation: a case of road network / Biriukov D.S., Zaslavskii V.A., Sidlyarenko A.I.** // *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modeling.* – Kharkov: NTU "KhPI". – 2012. – №. 62 (968). – P. 3 – 7.

The paper presents the optimization problem formulation of determination the transportation plan for human evacuation from an emergency in areas (settlements) that are in the danger zone by automotive vehicles. Refs: 10 titles.

**Keywords:** evacuation planning, critical infrastructure, emergency, automotive vehicles.

*Надійшла до редакції 02.08.2012*