

УДК 515.2:519.85

## **МОДЕЛЬ ТА СПОСІБ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ГРУП ЛЮДЕЙ З БУДІВЕЛЬ ПРИ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

Комяк В.М., д.т.н.

*Національний університет цивільного захисту України (м. Харків,  
Україна),*

Кязімов К.Т., к.т.н.\*

*Академія Міністерства по Надзвичайним ситуаціям Азербайджана  
(м. Баку, Азербайджан)*

*Конституція України проголошує найвищою соціальною цінністю безпеку людини, її життя і здоров'я. Кожний громадянин України має конституційне право на безпечні умови проживання, праці, відпочинку. Ці невід'ємні конституційні права і свободи людини і суспільства в цілому є об'єктами національної безпеки України.*

*В останнє десятиліття спостерігається тенденція до зростання кількості і масштабів наслідків надзвичайних ситуацій (НС). НС супроводжуються не тільки матеріальними, а й людськими втратами, тому в умовах НС дуже важливо швидко і правильно прийняти рішення як по ліквідації наслідків НС, так і по порятунку людей.*

*Серед можливих форм захисту населення є організація керованої евакуації людей з місць розвитку НС, зокрема з будівель за необхідний час, що розраховується виходячи з їх об'ємно-планувальних рішень. Для цього розробляються науково-обґрунтовані плани евакуації людей із будівель, головною складовою яких є програми моделювання людських потоків, які адекватно відображають реальні процеси руху людей. Тому актуальною проблемою є розробка моделей та способів моделювання людських потоків, складовою якої є моделювання руху людей за умови створення підгруп та груп людей, тобто розташування людей на відстані, що не перевищує максимально-допустиму для їх зберігання. Прикладом таких підгруп можуть виступати або сім'я, або працівники одного підрозділу, або рятувальники, що виконують одну рятувальну операцію, тощо.*

*Підгрупи можуть об'єднуватися в групи. Тому виникає проблема моделювання руху людей з урахуванням обмежень на максимально-допустимі відстані між людьми, яка є складовою моделювання раціональних планів евакуації з будівель.*

---

\* Науковий консультант – д.т.н., проф. Комяк В.М.

*В роботі побудовано змістовну постановку моделювання руху людей з урахуванням максимально-допустимих відстаней між ними. Формалізовані обмеження умов неперетинання еліпсів, які є моделями людей, з урахуванням максимально-допустимих відстаней між ними. Ці обмеження записані за допомогою нормалізованої квазі- $\rho$ -функції для пари еліпсів.*

*Ключові слова: гетерогенний людський потік, моделювання руху, умови неперетинання, максимально-допустимі відстані*

**Постановка проблеми.** Конституція України проголошує найвищою соціальною цінністю безпеку людини, її життя і здоров'я. Кожний громадянин України має конституційне право на безпечні умови проживання, праці, відпочинку. Ці невід'ємні конституційні права і свободи людини і суспільства в цілому є об'єктами національної безпеки України.

В останнє десятиліття спостерігається тенденція до зростання кількості і масштабів наслідків надзвичайних ситуацій (НС). НС супроводжуються не тільки матеріальними, а й людськими втратами, тому в умовах НС дуже важливо швидко і правильно прийняти рішення як по ліквідації наслідків НС, так і по порятунку людей.

Серед можливих форм захисту населення є організація керованої евакуації людей з місць розвитку НС, зокрема з будівель за необхідний час, що розраховується виходячи з їх об'ємно-планувальних рішень. Для цього розробляються науково-обґрунтовані плани евакуації людей, головною складовою яких є програми моделювання людських потоків, які адекватно відображають реальні процеси руху людей. Тому актуальною проблемою є розробка моделей та способів моделювання людських потоків, складовою якої є моделювання руху людей за умови зберігання груп людей, тобто розташування людей кожної з груп на відстані, що не перевищує максимально-допустиму.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існує досить широкий клас будівель як різної пожежної небезпеки, так різного контингенту, який мешкає в них, наприклад люди з обмеженими мобільними можливостями змішаного складу. Результати аналізу [1] показують відсутність моделі індивідуально-поточного руху людей, що адекватна реальному потоку, з обмеженими мобільними можливостями в ньому змішаного складу в досить широкій номенклатурі громадських будівель різних класів функціональної пожежної небезпеки.

В роботі [2] поставлена та вирішена задача моделювання руху гетерогенних потоків людей (люди представляються еліпсами), яка зводиться до задачі щільного розміщення (переміщення) людей з

різною щільністю, тобто розташуванням їх в кожний момент часу з урахуванням різних мінімально допустимих відстаней між ними згідно з рядом додаткових технологічних обмежень, серед яких можна виділити рух з різною швидкістю, урахування їх маневреності, комфортності, тощо.

В роботі [3] проаналізовано вплив на параметри потоку людей значень середньо-квадратичного відхилення від математичного сподівання їх швидкості і показано, що при великих відхиленнях людський потік розбивається на групи, кожна з яких в середньому рухається з однаковою швидкістю.

Але виникають задачі, в яких групи людей не доцільно розбивати, виходячи з їх, наприклад, соціальної належності. Прикладом таких груп можуть виступати або сім'я, або працівники одного підрозділу, або рятувальники, що групою виконують одну рятувальну операцію, тощо. Тому виникає задача моделювання руху людей з урахуванням обмежень на максимально-допустимі відстані між людьми в кожній із груп, яка є складовою моделювання раціональних планів евакуації з будівель.

**Формулювання цілей статті.** Метою дослідження є розробка змістовної моделі та способу моделювання руху груп людей з будівель при надзвичайних ситуаціях.

**Основна частина.** При моделюванні індивідуально-потокowego руху розглядається переміщення трьох основних видів об'єктів: людей  $H_i, i = 1, 2, \dots, n_H$ , підгруп людей  $S_j, j = 1, 2, \dots, n_S, n_S < n_H$  (прикладом підгрупи може служити сім'я або працівники одного підрозділу) і груп  $G_k, k = 1, 2, \dots, n_G, n_G < n_S$ , що складаються з підгруп (наприклад, кілька знайомих сімейних пар або декілька груп рятувальників, кожна з яких виконує окрему операцію по ліквідації НС). Ступінь зв'язності людей в підгрупах і груп між собою визначається попарно заданими коефіцієнтами. При цьому рівність відповідного коефіцієнта 1 означає практично неразрушиму зв'язок (наприклад, мати і дитина), рівність 0 означає відсутність зв'язку. Від величини коефіцієнта залежить максимальна відстань, на яку можуть віддалятися члени підгруп (груп) один від одного і ймовірність розпаду групи (підгрупи) при граничному віддаленні їх членів один від одного.

Таким чином виникає наступна задача.

Припустимо, що на  $k$ -ій ітерації (із заданим часовим інтервалом  $\Delta t$ , наприклад, 1 с) в області евакуації  $\Omega_m$  знаходиться  $N_k$  людей із параметрами розміщення  $u_{E_{ki}} = (x_{E_{ki}}, y_{E_{ki}}, \theta_{E_{ki}}), i = 1, 2, \dots, N_k$ , де  $(x_{E_{ki}}, y_{E_{ki}})$  – координати розміщення початку локальної системи координат (поточна точка), а  $\theta_{E_{ki}}$  – кут повороту  $i$ -го еліпса  $E_i$  з

розмірами півосей  $(a_i, b_i)$ , які є моделлю  $i$ -тої людини. Зазначимо, що велика піввісь еліпса перпендикулярна до напрямку руху, а кут повороту  $\theta_{E_i}$  еліпса  $E_i$  визначається між перпендикуляром до великої півосі й вектором основного напрямку руху. Об'єкту  $E_i$  приписані також характеристики швидкості  $v_{ki}$  і маневреності  $m_{ki}$ ,  $m_{ki} < 1$ .

Тоді модель підзадачі на  $k$ -ій ітерації у вигляді пошуку максимуму сукупного руху  $N_k$  людей, що знаходяться в області евакуації з урахуванням обмежень на умови неперетинання й умови розміщення з дотриманням заданих максимально-допустимих відстаней, на які можуть віддалятися члени підгруп (груп) один від одного, а також на відносний час  $\Delta t_i$  руху  $i$ -ої людини та на кут їх повороту, який викликаний маневреністю руху:

Формалізуємо обмеження на умови неперетинання еліпсів з дотриманням заданих максимально-допустимих відстаней між ними за допомогою квазі- $\phi$ -функція об'єктів.

Згідно [4], [5]), квазі- $\phi$ -функцією  $\Phi'^{E_i E_j}(u_{E_i}, u_{E_j}, T_{ij})$  для об'єктів  $E_i(u_{E_i})$  і  $E_j(u_{E_j})$  називається всюди визначена неперервна по всім змінним функція, для якої функція  $\max_{T_{ij} \in U \subset R^m} \Phi'^{E_i E_j}(u_{E_i}, u_{E_j}, T_{ij})$  є  $\phi$ -функцією об'єктів  $E_i(u_{E_i})$  і  $E_j(u_{E_j})$ . Тут  $T_{ij}$  – вектор допоміжних змінних, що належать деякій підмножині простору  $R^m$  (показано [2], що в даному випадку  $m=1$ , а  $U$  збігається з  $R^1$ ).

Основна властивість квазі- $\phi$ -функції: якщо для деякого  $T_{ij}$  виконується  $\Phi'^{E_i E_j}(u_{E_i}, u_{E_j}, T_{ij}) \geq 0$ , то  $\text{int } E_i(u_{E_i}) \cap \text{int } E_j(u_{E_j}) = \emptyset$

Умови взаємного неперетинання еліпсів описуються нерівністю  $\Phi'^{E_i E_j}(u_{E_i}, u_{E_j}, T_{ij}) \geq 0$ , де квазі- $\phi$ -функція  $\Phi'^{E_i E_j}$  може бути записана у вигляді [2]:

$$\Phi'^{E_i E_j}(u_{E_i}, u_{E_j}, T_{ij}) = (x_{E_i} - x_{E_j}) \cos T_{ij} + (y_{E_j} - y_{E_i}) \sin T_{ij} - \quad (1)$$

$$- \sqrt{b_i^2 + (a_i^2 - b_i^2) \cos^2(\theta_{E_i} - T_{ij})} - \sqrt{b_j^2 + (a_j^2 - b_j^2) \cos^2(\theta_{E_j} - T_{ij})}.$$

Слід зазначити, що квазі- $\phi$ -функція (1) нормалізована, тобто  $\max_{T_{ij} \in U \subset R^m} \Phi'^{E_i E_j}(u_{E_i}, u_{E_j}, T_{ij})$ , є нормалізованою  $\phi$ -функцією об'єктів  $E_i(u_{E_i})$  і  $E_j(u_{E_j})$  і за значенням збігається з відстанню між об'єктами  $E_i(u_{E_i})$  і  $E_j(u_{E_j})$  (рис. 1).

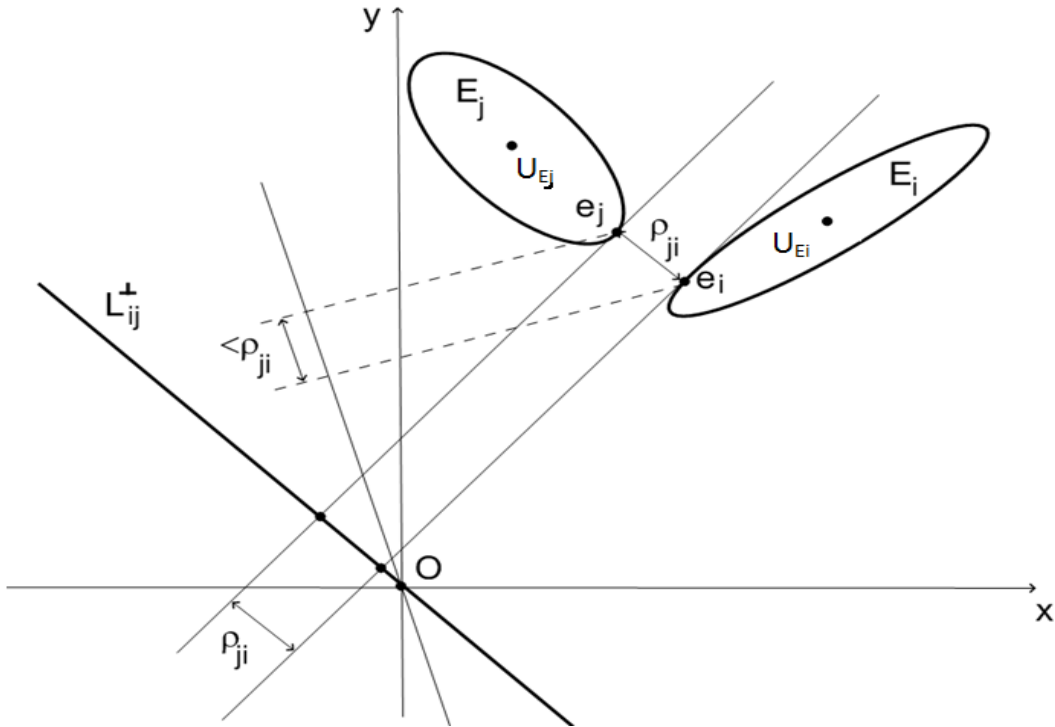


Рис. 1. Ілюстрація до нормалізованості квазі- $\phi$ -функції

Нормалізованість квазі- $\phi$ -функції (1) означає, що виконання умов допустимих відстаней між еліпсами  $E_i(u_{E_i})$  і  $E_j(u_{E_j})$  забезпечується виконанням нерівності:

$$\Phi'^{E_i E_j}(u_{E_i}, u_{E_j}, T_{ij}) = \rho_{ji}. \quad (2)$$

Тоді умови неперетинання еліпсів  $E_i(u_{E_i})$  і  $E_j(u_{E_j})$  з урахуванням максимально-допустимих відстаней  $\rho_{ij}$  за допомогою нормалізованої квазі- $\phi$ -функції (1) можна записати у вигляді:

$$0 \leq \Phi'^{E_i E_j}(u_{E_i}, u_{E_j}, T_{ij}) \leq \rho_{ij}. \quad (3)$$

**Висновки.** В роботі побудовано змістовну постановку моделювання руху людей з урахуванням максимально-допустимих відстаней між ними. За допомогою нормалізованої квазі- $\phi$ -функції для пари еліпсів формалізовані обмеження умов неперетинання еліпсів, які є моделями людей, з урахуванням максимально-допустимих відстаней між ними.

Модель моделювання руху людей з урахуванням обмежень на максимально-допустимі відстані між людьми в кожній із груп є складовою моделювання раціональних планів евакуації з будівель і може бути використана для побудови множини допустимих сценарієв евакуації людей.

### *Литература*

1. Холщевников В.В. Сопоставление различных моделей движения людских потоков и результатов программно-вычислительных комплексов. *Пожаровзрывобезопасность*. М., 2015. Т.24. №5. С.68–74.
2. Komyak Va. A study of ellipse packing in the high-dimensionality problems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 1/4(85). С. 17–23.
3. Комяк В.М., Данілін О.М., Дворецька Т.О. Алгоритм моделювання індивідуально-потокowego руху людей при евакуації в умовах пожежі та його характеристики. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків: НУЦЗУ, 2019. Вып 29. С.29–36.
4. Stoyan, Yu., Pankratov A., Romanova T. Quasi-phi-functions and optimal packing of ellipses. *Journal of Global Optimization*. 2016. Vol. 65(2). P. 283–307.
5. Стоян Ю.Г., Панкратов А.В., Романова Т.Е., Чернов Н.И. Квази-phi-функции для математического моделирования отношений геометрических объектов. *Доповіди НАН України*. 2014. Т. 9. С. 49–54.

## **МОДЕЛЬ И СПОСОБ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГРУПП ЛЮДЕЙ ИЗ ЗДАНИЙ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

Комяк В.М., Кязимов К.Т.

*Конституция Украины провозглашает наивысшей социальной ценностью безопасность человека, его жизнь и здоровье. Каждый гражданин Украины имеет конституционное право на безопасные условия проживания, труда, отдыха. Эти неотъемлемые конституционные права человека и общества в целом являются объектами национальной безопасности Украины.*

*В последнее десятилетие наблюдается тенденция к росту количества и масштабов последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС). ЧС сопровождаются не только материальными, но и человеческими потерями, поэтому в условиях ЧС очень важно быстро и правильно принять решение как по ликвидации последствий ЧС, так и по спасению людей.*

*Среди возможных форм защиты населения выступает организация управляемой эвакуации людей из мест развития ЧС, в том числе из зданий за необходимое время, рассчитываемое исходя из их объемно-планировочных решений. Для этого разрабатываются научно-обоснованные планы эвакуации людей, главной составляющей которых являются программы моделирования движения потоков*

людей, которые адекватно отражают реальные процессы их движения. Поэтому актуальной проблемой является разработка моделей и способов моделирования движения потоков людей, составной частью которой является моделирование движения людей при условии создания подгрупп и групп людей, то есть расположения людей на расстоянии, не превышающем максимально-допустимого для их сохранения. Примером таких подгрупп могут выступать или семья, или работники одного подразделения, или спасатели, выполняющие одну спасательную операцию, и т.д.

Подгруппы могут объединяться в группы. Поэтому возникает проблема моделирования движения людей с учетом ограничений на максимально допустимые расстояния между людьми, которая является составной моделирования рациональных планов эвакуации из зданий.

В работе построена содержательная постановка моделирования движения людей с учетом максимально допустимых расстояний между ними. Формализованы ограничения условий непересечения эллипсов, которые являются моделями людей, с учетом максимально допустимых расстояний между ними. Эти ограничения описаны с помощью нормализованной квази- $\phi$ -функции для пары эллипсов.

Ключевые слова: гетерогенный поток людей, моделирование движения, условия непересечения, максимально допустимые расстояния.

## **MODEL AND METHOD OF MODELING MOVEMENT OF GROUPS OF PEOPLE FROM BUILDINGS IN EMERGENCY SITUATIONS**

Komyak V.M., Kyazimov K.T.

*The Constitution of Ukraine proclaims the highest social value of human security, life and health. Every citizen of Ukraine has a constitutional right to safe living, working and leisure conditions. These inalienable constitutional rights of man and society as a whole are objects of national security of Ukraine.*

*In the last decade, there has been a tendency to increase the number and scale of the consequences of emergencies (EM). Emergencies are accompanied not only by material but also human losses, so in an emergency it is very important to make quick and correct decisions to eliminate the consequences of emergencies and to save people.*

*Among the possible forms of protection of the population there is the organization of controlled evacuation of people from the places of development of emergency, in particular from buildings for the necessary time, which is calculated based on their spatial design planning of buildings. To this end, scientifically sound plans for the evacuation of people are being developed, the main component of which are programs for modeling human flows, which adequately reflect the real processes of human movement. Therefore, the urgent problem is the development of models and methods for modeling human flows, which includes modeling the movement of people in the creation of subgroups and groups of people, ie the location of people at a distance not exceeding of the maximum of allowable. Examples of such subgroups are families, employees of the same unit, rescuers performing one rescue operation, and so on.*

*Subgroups can be grouped together. Therefore, there is a problem of modeling the movement of people taking into account the restrictions on the maximum allowable distances between people, which is part of the modeling of rational evacuation plans from buildings.*

*The paper constructs a meaningful statement of modeling the movement of people taking into account the maximum allowable distances between them. Formalized restrictions on the conditions of non-intersection of ellipses, which are models of people, taking into account the maximum allowable distances between them. These constraints are written using a normalized quasi-phi of function for a pair of ellipses.*

*Keywords: heterogeneous human flow, motion modeling, non-intersection conditions, maximum allowable distances.*