

## УДК 614.8+519.6

*О. М. Данілін, к.т.н., начальник каф. (ORCID 0000-0003-4940-1430)*  
*В. М. Комяк, д.т.н., професор, професор каф. (ORCID 0000-0002-9840-2635)*  
*Т. О. Дворецька, викладач каф. (ORCID 0000-0002-9840-2635)*  
*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

## АЛГОРИТМ МОДЕЛЮВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНО-ПОТОКОВОГО РУХУ ЛЮДЕЙ ПРИ ЕВАКУАЦІЇ В УМОВАХ ПОЖЕЖІ ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

При моделюванні руху людей по мережі коридорів використовуються, в основному, моделі, що оцінюють потік по середньо – статистичним даним, не аналізуючи індивідуальні характеристики індивідів потоку, такі як швидкість руху, їх габарити тощо. У зв'язку з цим робота, яка присвячена моделюванню індивідуально-поточного руху людей, які апроксимуються еліпсами, з урахуванням вище перелічених особливостей, є актуальною. Задача оптимальної упаковки еліпсів відноситься до класу NP-складних. У даній статті сформульовано задачу упаковки набору еліпсів у даній області з урахуванням умов неперетинання та технологічних обмежень, що конкретизуються в умовах задачі, що розв'язується. Побудовано модель індивідуально-поточного руху людей з уточненням технологічних обмежень. Наводиться метод геометричного моделювання руху людей згідно критерію максимуму їх переміщення. Пропонується ефективний алгоритм пошуку локально оптимальних рішень з точки зору його складності. Отримана теоретична оцінка складності алгоритму моделювання індивідуально-поточного руху людей. Показано, що існує лінійний зв'язок між кількістю людей і часом моделювання їх руху. Отримана оцінка складності методу індивідуального руху людей може бути використана для оцінки часу вирішення актуальних проблем, що виникають на практиці. Експериментально досліджено ефект зміни значень середнього квадратичного відхилення швидкості фізичних осіб на процес евакуації. Показано, що зі збільшенням середнього квадратичного відхилення швидкості індивідів від його середнього значення, зазвичай, спостерігається розподіл потоку на групи, кожна з яких рухається з різною швидкістю, і збільшення часу евакуації, що обмежується отриманою верхньою оцінкою.

**Ключові слова:** індивідуально-поточний рух, складність алгоритму, середньо-квадратичного відхилення від швидкості руху

### 1. Вступ

В період експлуатації будівель переважаючим фактором залишається безпека людей. Для цього розробляються науково-обґрунтовані плани їх евакуації. Для оцінки ефективності планів евакуації повинні бути розроблені моделі, методи та пакети програм, головною складовою яких є засоби моделювання людських потоків, які адекватно відображають реальні процеси руху індивідів.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Математичні моделі руху людей будуються в основному, використовуючи наступні два підходи: неперервний і дискретний (у часі і просторі) [1]. Неперервний підхід заснований на тому, що рух людей описується за допомогою диференціальних рівнянь. Цей підхід більше підходить для систем, які складаються з відносно однорідних частинок з обмеженими і передбачуваними взаємодіями [2].

У дискретних підходах простір розбивається на комірки (клітини). Як правило, частка (людина) займає одну клітинку. Пересування можливо тільки по клітинам в кожен розрахунковий час (крок), напрямки переміщення обмежені [3].

Детерміновані і стохастичні моделі. У першому випадку в кожній конкретній ситуації при всіх інших рівних умовах модель наказує однакові "дії" людям. Введення в модель випадковості включає в себе математичний опис випадкових,

в тому числі непередбачуваних, дій людей. З іншого боку, введення елементів випадковості в модель згладжує недолік знань про процес прийняття рішень під час руху, особливо в екстрених випадках [4].

Таким чином, при моделюванні руху людей по мережі коридорів використовуються, в основному, моделі, що оцінюють потік по середньо – статистичним даним, не аналізуючи індивідуальні характеристики індивідів потоку, такі як швидкість руху, їх габарити тощо, що важливо при русі людей з обмеженими фізичними можливостями в потоці змішаного складу [5]. Результати аналізу [6] показують відсутність моделі індивідуально-поточного руху людей, що адекватна реальному потоку людей. У зв'язку з цим робота, яка присвячена моделюванню індивідуально-поточного руху людей з урахуванням вище перелічених особливостей, є актуальною.

### 3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є дослідження складності алгоритму, який реалізує метод послідовно-одинокого переміщення індивідів, що знаходяться в області евакуації, та дослідження процесу евакуації в залежності від значень середньо – квадратичного відхилення від математичного сподівання швидкості переміщення індивідів.

Основні задачі дослідження:

- отримати верхню оцінку складності алгоритму індивідуально-поточного руху;
- отримати верхню оцінку часу евакуації з будівель;
- дослідити вплив зміни середньо-квадратичного відхилення від математичного сподівання швидкості переміщення індивідів на процес евакуації.

### 4. Розробка моделей «покриття» місцевості на стадії проектування району забудови

В роботі [7] сформульована і побудована математична модель індивідуально-поточного руху людей, які апроксимуються набором еліпсів. Показано, що дана задача може бути зведена до задачі їх щільної упаковки з різною щільністю. Різна щільність виникає в зв'язку з урахуванням різних мінімально допустимих відстаней між еліпсами. Дотримання мінімально допустимих відстаней викликано урахуванням ряду обмежень, серед яких можна виділити рух людей з різною швидкістю, урахуванням їх маневреності, комфортності.

Шлях руху ділиться на області  $\Omega_m$ , пронумеровані, відповідно,  $1, 2, \dots, m$ . Кожна область характеризується однаковим законом формування основного напрямку руху. Розглянуто області з прямолінійним рухом. У цих областях переміщення з точки, яка аналізується, наводиться у вигляді вектора, що з'єднує дану точку з точкою на відповідному роздільнику областей (з урахуванням коефіцієнта гомотетії). 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  $\mathbf{u}_{E_{ki}} = (x_{E_{ki}}, y_{E_{ki}}, \theta_{E_{ki}})$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_k$ , 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 пів осей  $(a_i, b_i)$ , які є моделлю  $i$ -тої людини. Зазначимо, що велика піввісь еліпса перпендикулярна до напрямку руху, а кут повороту  $\theta_{E_{ki}}$  еліпса  $E_i$  визначається між перпендикуляром до великої пів осі й вектором основного напрямку руху. Об'єкту  $E_i$  приписані також характеристики швидкості  $v_{ki}$  (у метрах за секунду) і маневреності  $m_{ki}$ ,  $m_{ki} < 1$  (у метрах).

Постановку задачі на  $k$ -ій ітерації сформульовано у вигляді пошуку максимуму сукупного руху  $N_k$  людей, що знаходяться в області евакуації, з урахуванням обмежень на умови їх неперетинання й умови їх розміщення в області з дотриманням заданих мінімальних допустимих відстаней, що викликані комфортністю, і обмежень на відносний час  $\Delta t_i$  руху  $i$ -ої людини та на кут їх повороту, що викликані маневреністю руху [8].

Досліджено властивості моделі [8] та запропоновано метод моделювання переміщення людей з оптимізацією за групою змінних, до якої входять параметри розміщення людини (послідовно-одинокі переміщення [9]).

Суть методу послідовно-одинокі переміщення індивідів полягає в наступному. Вибирається індивід, який найближче знаходиться до виходу. Обирається основний напрямок його руху. В рамках маневреності напрямок руху може змінюватися. Вибирається такий напрямок відносно основного, по якому за вибраний інтервал часу індивід здійснить найбільше переміщення. Здійснюється переміщення індивіда в обраному напрямку з вибраною для нього локальною швидкістю. Положення індивіда фіксується. Далі вибирається наступний індивід, який найближче знаходиться до виходу і перелічені вище дії повторюються і так далі. Переміщення за обраний інтервал часу послідовно здійснюється для всіх індивідів.

Отримаємо верхню оцінку складності алгоритму моделювання послідовно-одинокі переміщення індивідів  $E_i, i = 1, 2, \dots, n$  в прямокутній області  $S_0$  в залежності від кількості індивідів.

Хай  $i = 1$ , позначимо через  $\beta$  – трудомісткість побудови умови неперетину еліпсу і півплощини. Умова визначення області допустимого переміщення еліпса  $E_1$  в області  $S_0$  потребує  $N_1 = N_i = 4\beta$  операцій [8–9].

Хай  $i = 2$ , позначимо через  $\beta_1$  – трудомісткість побудови області для неперетину двох еліпсів  $E_1$  та  $E_2$  [8], нехай  $\beta = \max\{\beta, \beta_1\}$ . Тоді трудомісткість визначення області для переміщення  $E_2$  складає  $N_2 = N_i = 4\beta + \beta = 4\beta + (i - 1) \cdot \beta$ .

Розглянемо випадок, коли  $i = 3$ . Трудомісткість визначення області для переміщення  $E_3$  буде складати  $N_3 = N_i = 4\beta + 2\beta = 4\beta + (i - 1) \cdot \beta$  і т.д.

В загальному випадку, коли  $i = n$  будимо мати

$$N_n = N_i = 4\beta + (n - 1)\beta = 4\beta + (i - 1) \cdot \beta.$$

Трудомісткість же алгоритму моделювання послідовно-одинокі переміщення еліпсів буде складати

$$N = O\left(\sum_{i=1}^n N_i\right);$$

$$N = O\left(\sum_{i=1}^n (4\beta + (i - 1) \cdot \beta)\right) = O(4\beta \cdot n + \sum_{i=1}^n (i - 1) \cdot \beta) = O(4\beta \cdot n + \frac{\beta \cdot n}{2}).$$

Таким чином, верхня оцінка складності алгоритму є

$$N = O\left(n \cdot \frac{9}{2} \beta\right),$$

тобто існує лінійна залежність між кількістю індивідів та часом моделювання їх евакуації.

Отримаємо верхню оцінку для часу руху.

Хай  $t_0$  – час виходу першої людини з зони евакуації (коридору). На час  $t_0$  утворився потік людей в коридорі шириною  $w$  та довжиною  $l$ . Площа потоку дорівнює

$$S_p = l \cdot w = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{D},$$

де  $D$ ,  $S_i$  – відповідно щільність потоку та площа проекції  $i$ -тої людини.

Довжина потоку дорівнює

$$l = \frac{S_p}{w},$$

а весь потік залишить коридор за час

$$t_{\text{пр.}} \leq \max_i \frac{l}{V_i},$$

де  $V_i$  – швидкість  $i$ -того індивіда.

Загальний час евакуації складає

$$T \leq t_0 + t_{\text{пр.}} \leq t_0 + \frac{n \cdot S_{\text{сеп.}}}{D \cdot w \cdot V_{\text{сеп.}}}.$$

Вважаємо, що  $t_0$  – величина, яка залежить від конфігурації будинку і місця знаходження людей в час початку евакуації і яку будемо рахувати сталою величиною  $C$ , тобто

$$T = C + t_{\text{пр.}} = C + \frac{n \cdot S_{\text{сеп.}}}{D \cdot w \cdot V_{\text{сеп.}}}.$$

Якщо потік однорідний, то  $S_i = S_{\text{сеп.}}$ ;  $V_i = V_{\text{сеп.}}$ . В цьому випадку, час евакуації прямо пропорційний кількості людей, що покидають приміщення, тобто

$$T = O\left(t_0 + \frac{n \cdot S_i}{D \cdot w \cdot V_i}\right).$$

Якщо потік неоднорідний, то прийнявши  $S = \max_i S_i$ ;  $V = \min_i V_i$ , отримаємо верхню оцінку часу виходу людей з будинку (коридора)

$$T = O\left(t_0 + \frac{n \cdot S}{D \cdot w \cdot V}\right).$$

Якщо врахувати маневреність, тобто зміну напрямків руху людини в рамках заданої маневреності, наприклад покласти дослідження з урахуванням  $m$  напрямків руху, то верхньою оцінкою складності алгоритму послідовно-одинокого переміщення буде величина

$$T = O\left(m \cdot \left(t_0 + \frac{n \cdot S}{D \cdot w \cdot V}\right)\right).$$

Здійснено комп'ютерне моделювання руху 48 індивідів, що апроксимовані еліпсами з тестового приклада [10], по мережі коридорів із з'єднанням їх в один. Потік людей в цьому прикладі спочатку рухається по трьом коридорам і вливається в один, який веде до виходу. Середня швидкість обирається 1,38 м/с. Значення середньоквадратичного відхилення від середнього значення і час виходу усіх людей наведені в табл. 1.

**Табл. 1. Моделювання руху по трьом коридорам із злиттям в один**

№ з/п	Середня швидкість $V$ , м/с	Середньоквадратичне відхилення $\sigma$ , м/с	Час повної евакуації, с
1	1,38	0,1	92
2	1,38	0,2	99
3	1,38	0,3	135
4	1,38	0,4	207

Обирається один коридор (самий віддалений від виходу), по якому рухається 48 індивідів і які переходять до основного коридору. Середня швидкість обирається 1,38 м/с. Значення середньоквадратичного відхилення і час виходу усіх людей наведені в табл. 2.

**Табл. 2. Моделювання руху по одному коридору**

№ п/п	Середня швидкість $V$ в м/с	Середньо-квадратичне відхилення $\sigma$ , м/с	Час повної евакуації, с
1	1,38	0,1	114
2	1,38	0,2	136
3	1,38	0,3	191
4	1,38	0,4	250

## 5. Матеріали і методи досліджень

Розв'язання поставленої у роботі задачі здійснювалося за допомогою методів математичного моделювання, геометричного проектування, оптимізації. Обчислювальні експерименти проводились на AMD Athlon 64x2 Dual 5200+.

## 6. Результати досліджень

Здійснено комп'ютерне моделювання руху потоку людей із 48 індивідів, які рухаються по трьом коридорам і вливаються в один та їх руху без злиття потоків. Середня швидкість обирається 1,38 м/с, а значення середньоквадратичного відхи-

лення від середнього значення швидкості вибираються від 0,1 до 0,4 м/с. При збільшенні значень середньоквадратичного відхилення від середнього значення швидкості спостерігається збільшення часу евакуації. Отримані оцінки складності алгоритму моделювання індивідуально-потокowego руху людей та часу евакуації можуть бути використані для оперативного прийняття рішень по вибору шляхів евакуації в умовах пожежі.

### 7. Обговорення результатів

Мала трудомісткість алгоритму послідовно-одинокого переміщення індивідів дозволила вирішити практичну задачу індивідуально-поточного руху людей, що апроксимуються еліпсами. Розв'язана задача актуальна при вирішенні питань евакуації з будівель. Запропонований підхід дає можливість моделювати рух людей з обмеженими мобільними можливостями в потоці змішаного складу в широкій номенклатурі громадських будівель різних класів функціональної пожежної небезпеки. Запропонований метод дозволяє моделювати потоки людей при їх виході з метро, кінотеатрів, місць з масовим перебуванням людей тощо.

### 8. Висновки

Отримана верхня оцінка складності алгоритму індивідуально-потокowego руху людей і показано, що існує лінійна залежність між кількістю індивідів та часом моделювання їх евакуації.

Отримана верхня оцінку часу евакуації з будівель, яка може бути використана для оперативного прийняття рішень по вибору шляхів евакуації в умовах пожежі.

Показано, що при збільшенні середньоквадратичного відхилення швидкості руху індивідів від середнього її значення спостерігаються, як правило, розбиття потоку на групи, кожна з яких рухається з різною швидкістю, так і збільшення часу евакуації, який обмежено його верхньою оцінкою (величиною  $T$ ).

### Література

1. Кирик Е. С., Юргельян Т. Б., Круглов Д. В., Малышев А. В. О непрерывно-дискретной стохастической модели движения людей // Моделирование неравновесных систем: Материалы XIII Всероссийского семинара «Моделирование неравновесных систем». Красноярск: ИВМ СО РАН, 2010. С. 81–85.

2. Schadschneider A., Klingsch W., Kluepfel H., Kretz T., Rogsch C., Seyfried A. Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and applications // Encyclopedia of Complexity and System Science. Springer, 2009.

3. Малинетский Г. Г., Степанцов М. Е. Применение клеточных автоматов для моделирования движения группы // Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 2004. 44 (11). С. 2094–2098.

4. Брайловский Н. О. Моделирование транспортных систем. М.: Транспорт, 1978. 125с.

5. Холщевников В. В., Самошин Д. А., Галушка Н. Н. Обзор компьютерных программ моделирования эвакуации зданий и сооружений // Пожаровзрывобезопасность, 2002. Т. 11. № 5. С. 40–69.

6. Холщевников В. В., Парфененко А. П. Сопоставление различных моделей движения людских потоков и результатов программно-вычислительных комплексов // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24. № 5. С. 68–74.

7. Кomyak Va., Кomyak Vl., Danilin A. A study of ellipse packing in the high-dimensionality problems // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017. 1/4 (85). С. 17–23.

8. Данилин А. Н., Комяк В. В., Комяк В. М., Соболев А. Н., Панкратов А. В. Математическая модель индивидуально-поточного движения людских и транспортных потоков // *Вестник Херсонского национального технического университета*. Херсон: ХНТУ, 2016. № 3 (58). С. 501–505.

9. Данилин А. Н., Комяк В. В., Панкратов А. В. Подход к моделированию индивидуально-поточного движения людей в потоке // *Проблеми пожежної безпеки*. Х.: НУГЗУ, 2016. Вып. 39. С. 84–93.

10. Холщевников В. В., Самошин Д. А. Эвакуация и поведение людей на пожарах: учебное пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. 210 с.

*A. Danilin, PhD, Head of Department*

*V. Komyak, DSc, Professor, Professor of the Department*

*T. Dvoretzkaya, lecturer of the Department*

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

#### **ALGORITHM OF MODELING OF INDIVIDUAL FLOW OF PEOPLE DURING EVACUATION UNDER FIRE SITUATIONS AND ITS SPECIFICATION**

To model the people flow through the network of corridors, mainly, the average-statistical models are used without any analysis of the individual characteristics of persons that are involved into some flow. Therefore, the work concerning a simulation of individual flows is relevant; our approach to simulation is based on approximating with the ellipses, so it allows the model to take into account the individual features. The issue of the optimal ellipses packing is NP-hard. The problem of ellipses packing in some specific area was formulated in the current article; also, this problem takes into account non-intersection and technical restraints. Considering this problem, the model of the individual flow with the approximation by ellipses and technical restraint refinement was built. The method of geometric modeling of human flows based on the criterion of the maximum motion is provided. The theoretical estimation of the algorithm complexity is obtained. It was shown that there is a linear relationship between the number of people and time to model their motion. The obtained rate of the method complexity of individual flow can be used to assess time that is required to solve actual practice problems. The effect on changing values of mean squared deviation of the speed of individuals during an evacuation process has been experimentally investigated. It is shown that an increase in the mean squared deviation of individual velocities from its average mean leads to division of the flow into groups and each of these groups moves at different speeds; as well as, that leads to the increase of evacuation time, which is limited by its upper rate.

**Keywords:** of individual flow, specification of the algorithm, mean squared deviation of the speed of motion

#### **References**

1. Kirik, E. S., Yurgelian T. B., Kruglov D. V., Malyshev A. V. (2010). On the continuous-discrete stochastic model of people's movement // *Modeling of nonequilibrium systems: Materials of the XIII All-Russian Seminar "Modeling of nonequilibrium systems"*, Krasnoyarsk: ICM SB RAS. 81–85.

2. Schadschneider, A., Klingsch, W., Kluepfel, H., Kretz, T., Rogsch, C., Seyfried A. (2009). *Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and applications* // *Encyclopedia of Complexity and System Science*, Springer.

3. Malinetskiy, G. G., Stepantsov, M. E. (2004). Application of cellular automata for modeling the motion of a group of people // *Zh. Vychisl. Math. and Math. Fiz.*, 44 (11), 2094–2098.

4. Brailovsky, N. O., Granovsky, B. I. (1978). Modeling of transport, M., Transport, 125.

5. Kholshchevnikov, V. V., Samoshin, D. A., Galushka, N. N. (2002). Review of computer simulation programs for the evacuation of buildings and structures // Fire and explosion safety, V. 11, № 5, 40–69.

6. Kholshchevnikov, V. V., Parfenenko, A. P. (2015). Comparison of various models of the movement of human flows and the results of software and computing systems // Fire and explosion safety, V. 24, № 5, 68–74.

7. Komyak, V., Komyak, V. I., Danilin, A. (2017). A study of ellipse packing in the high-dimensionality problems // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1/4 (85), 17–23.

8. Danilin, A. N., Komyak, V. V., Komyak, V. M., Pankratov, A. V., Sobol, A. N. (2016). Mathematical model of individual-flow foot traffic and traffic flows // Visnyk of Kherson National Technical University, Kherson: KNTU, № 3 (58), 501–505.

9. Danilin, A. N., Komyak, V. V., Pankratov, A. V. (2016). The approach to modeling the individual-and-flow movement of people in the flow // Problems of fire safety: Compilation of scientific works, Issue 39, Kharkiv: NUCZU, 84–93.

10. Kholshchevnikov, V. V., Samoshin, D. A. (2009). Evacuation and behavior of people in fires: a manual. M.: Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Measures of Russia, 210.

Надійшла до редколегії: 24.01.2019

Прийнята до друку: 13.02.2019