

УДК 515.2:519.85

КАТЕГОРІЇ КОМФОРТНОСТІ РУХУ ЛЮДЕЙ В ПОТОЦІ І СПОСОБИ ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ

Кязімов К.Т., к.т.н.,

kazim.kazimov@fhn.gov.az, ORCID: 0000-0003-0790-9770

Академія Міністерства по Надзвичайним подіям Азербайджанської Республіки (м. Баку, Азербайджан)

Пожежі, вибухи та інші надзвичайні ситуації становлять особливий ризик для будівель через особливості їх індивідуального проектування, будівництва, зведення та подальшої евакуації. У разі виникнення та розвитку надзвичайної ситуації в будівлях з метою їх ліквідації завданням є оптимізація виконання рятувальних робіт, переважною та найважливішою частиною яких є забезпечення безпеки людей.

Можливі форми захисту населення включають організацію керованої евакуації людей від надзвичайних ситуацій, зокрема з будівель за необхідний час, розрахований на основі їх проектно-планувальних рішень

При русі людей у потоці виділяють такі категорії: комфортні, спокійні, активні, з високою активністю. В даній роботі пропонуються способи моделювання руху потоку людей ув'язати з рівнями комфортності руху людей в потоці та зі щільністю потоку.

При вільному русі, вільному без контактних перешкод, вільному з контактними перешкодами (рівні комфортності А-Е) моделювання здійснюється врахуванням відповідно різних мінімально-допустимих відстаней між людьми (представлених еліпсами, складними об'єктами).

При рівні комфортності F моделювання злитого руху з силовими діями без деформацій тіл здійснюється моделюванням руху потоку людей без врахування мінімально-допустимих відстаней між ними; моделювання суцільного руху з силовими діями, що приводять до природної деформації тіл, виконується шляхом представлення людей трикомпонентною моделлю, кожна компонента якої може здійснювати обертання в допустимих межах, які визначаються, виходячи з антропологічних даних людини; а при силових діях, що призводять до здавлювання тіла людини, моделювання здійснюється шляхом зменшення горизонтальної проекції людини в межах від 0 до 15%, а при настанні асфіксії – до моделювання руху з областями заборони.

Таким чином, зміна категорії руху потоку людей може бути врахована в способі індивідуально поточного їх руху як шляхом зміни просторової форми об'єкту, що апроксимує геометричну проекцію тіла людини, так і обмежень задачі.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, безпека, евакуація, неоднорідні

потоки людей, способи моделювання, категорії комфортності руху, щільність потоку.

Постановка проблеми. ГОСТ 12.1.004–91 вимагає, щоб «допустимий рівень пожежної небезпеки для людей був не більше 10^{-6} впливу небезпечних факторів пожежі, що перевищує гранично допустимі значення, в рік в розрахунку на кожен людину». Отже, статистичні дані показують [1], що в Азербайджані фактичний рівень пожежної небезпеки для людей значно перевищує нормативний рівень (більш ніж в 1000 разів!) І це в той час як будівельними нормами і правилами з пожежної безпеки будівель і споруд [2] декларується «пріоритетність вимог, спрямованих на забезпечення безпеки людей під час пожежі, в порівнянні з іншими протипожежними вимогами». Тому сьогодні, як і тисячі років раніше, для людей евакуація залишається основним способом рятування в сучасних надзвичайних ситуаціях. З цією метою розробляються науково обгрунтовані плани евакуації людей, головними компонентами яких є програми моделювання руху людського потоку. Тому актуальною проблемою є розробка моделей та методів для моделювання руху людських потоків, які б адекватно відображали реальні процеси їх руху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема створення обгрунтованих планів евакуації людей з будівель поставила завдання розробки пакетів програм моделювання руху людських потоків. На цей час найпоширенішим програмним продуктом є CITIS: «Flowtek ID» для спрощеної аналітичної і імітаційно-стохастичної моделі [3] та «Evatek» для індивідуально-проточної моделі руху потоку людини [4]. Результати розрахунків, отриманих за моделлю «Flowtek ID», дають занижене значення часу проходження останньою людиною різних ділянок по довжині евакуаційного маршруту. Процеси переформатування і розсіювання людських потоків, опис яких не входить в цю модель, мають також значний вплив на час.

В індивідуально-поточній моделі «Еватек» швидкість руху людини залежить від щільності потоку, яка розраховується для кожної людини індивідуально. Для цього навколо людини будується область у вигляді прямокутника, велика сторона якого орієнтується в напрямку руху людини. Побудована область розбивається на окремі підобласті (неможливо перейти з одної підобласті в іншу, не виходячи з області). Такий підхід моделювання руху пояснюється неможливістю аналітичного опису процесу переміщення людей, частиною якого є опис умов їх неперетину. Значення, отримані за програмою «Еватек» часів проходження останньою людиною різних ділянок шляхів евакуації, лежать біля нижньої межі допустимих значень при врахуванні стохастики процесу евакуації.

Серед зарубіжних моделей та програмних продуктів, що мають численні експлуатаційні можливості та методи відеопрезентації, слід відзначити роботи [5–10]. Але результати аналізу цих робіт, що проведені

в [11], показують, що не існує моделі індивідуально поточного руху людей, адекватної реальному потоку. А для людей змішаного складу в досить широкій номенклатурі громадських будівель різних класів функціональної небезпеки відсутні моделі моделювання руху .

У роботі [12] проблема моделювання руху неоднорідних потоків людей (люди представлені еліпсами) зводиться до проблеми щільного розміщення (переміщення) людей з різною щільністю, тобто до їх розміщення в кожен дискретний момент часу з врахуванням різних мінімально допустимих відстаней між ними відповідно до ряду додаткових технологічних обмежень, серед яких можна виділити рух з різною швидкістю, з врахуванням їх маневреності, комфортності, тощо.

Відповідно до [4], при русі розглядаються такі категорії переміщення людей в потоці: вільний, комфортний, активний, з високою активністю. Модель [12] може бути використана для комфортного та вільного переміщення людей.

Коли категорія руху змінюється і стає активною категорією з можливими силовими діями, щільність потоку збільшується [4]. Зміни щільності впливають на характер руху людей у потоці, змінюючи його від вільного, при якому людина може вибрати швидкість і напрямок свого руху, до стисненого руху в результаті подальшого збільшення щільності потоку, в якому він відчуває зростаючу силову дію оточуючих людей.

В роботі [13] запропонована трикомпонентна модель горизонтальної проекції людини, яка враховує природні деформації її тіла, а в роботі запропоновано [14] алгоритм моделювання активного руху людей, які представлені трикомпонентною моделлю. В роботі [15] отримана щільність заповнення областей для ряду просторових форм об'єктів, яка може служити оцінкою щільності потоку для таких об'єктів, між якою та категорією руху експериментально встановлений зв'язок [4]. Таким чином, щільність потоку, в частковому випадку – локальна, впливає на категорію руху людей в потоці (або його ділянці).

Тому важливою і невирішеною частиною проблеми є розробка моделей та методів моделювання руху людей в залежності від його категорії та їх класифікація.

Формулювання цілей статті. Метою статті є доповнення класифікації категорій руху людей з точки зору способів їх геометричного моделювання.

Основна частина. Вільний простір в потоці залежить не тільки від кількості осіб, але і від площі, що займає кожна з них, тому певну роль відіграють габарити людей. Для обліку цього чинника було запропоновано вводити в розрахунок щільності потоку площу, яку займає людина (його горизонтальну проекцію f , м²) [16]:

$$D_i = \frac{N_i f_i}{b_i l_i}, \text{ м}^2 / \text{м}^2 . \quad (1)$$

Іншими словами, якщо площа горизонтальної проекції людини становить $0,1 \text{ м}^2$ (доросла людина без обмежень мобільності в літньому одязі), то значенням щільності потоку, що дорівнює $5 \text{ чел} / \text{м}^2$, відповідає значення $0,5 \text{ м}^2 / \text{м}^2$.

Зміни щільності чинять значний вплив на характер руху людей в потоці, змінюючи його від вільного до стислого (табл. 1).

Таблиця 1
Вид руху людей в інтервалах щільності потоків [16]

Значення щільності, $\text{м}^2 / \text{м}^2$	0-0,05	0,05-0,15	0,15-0,4	0,4-0,7	0,7-0,9	0,9-1,0	1,0-1,15
Вид руху людей	Індивідуальний	Поточний					
	вільний	вільний	без контактних перешкод	з контактними перешкодами	з силовими впливами		
					злите	деформація тіл	здавлення тіл

Обмеження можливостей руху людини в потоці при збільшенні його щільності веде до зниження як локальної швидкості руху, так і всього людського потоку.

Для моделювання неоднорідного потоку людей розроблено модель та метод індивідуально поточного руху людей [12]. Як показують експерименти [4], щільність потоку змінюється при переході людей від однієї ділянки до іншої. Тому в залежності від локальної щільності потоку, яка обчислюється на кожній з ділянок, змінюється категорія комфортності руху і, відповідно [4], корегується як швидкість руху індивідів, так і способи їх моделювання.

В даній роботі пропонуються способи моделювання неоднорідного потоку людей ув'язати з рівнями комфортності руху людей в потоці, класифікація яких наведена в [4]:

– при рівні комфортності **A-E** (вільний рух, вільний без контактних перешкод, вільний з контактними перешкодами) моделювання здійснюється врахуванням відповідно різних мінімально-допустимих відстаней між людьми (представлених еліпсами, складними об'єктами);

– при рівні комфортності **F**:

а) моделювання злитого руху з силовими діями без деформацій тіл здійснюється моделюванням руху потоку людей без врахування мінімально-допустимих відстаней між ними;

в) моделювання суцільного руху з силовими діями, що приводять до природної деформації тіл, виконується шляхом представлення людей

багатокомпонентними моделями, кожна з яких може здійснювати обертання в допустимих межах, які визначаються, виходячи з антропологічних даних людини [17];

с) і, нарешті, при силових діях, що призводять до здавлювання тіла людини, що перевищує 120 кг, моделювання здійснюється шляхом зменшення горизонтальної площі людини в межах від 0 до 15% з врахуванням ймовірності (можливості) настання компресійної і механічної асфіксії у людини, яка призводить до неможливості подальшого руху, і яка моделюється шляхом представлення людей у вигляді нерухомих об'єктів, тобто об'єктами заборони.

В роботі [12] вирішена задача моделювання руху неоднорідних потоків людей, що представляються еліпсами, яка зводиться до оптимізації локально для різних евакуаційних ділянок, тобто до їх розміщення в кожен дискретний момент часу з врахуванням різних мінімально допустимих відстаней (МДВ) між ними відповідно до ряду додаткових технологічних обмежень, серед яких можна виділити рух з врахуванням їх маневреності, комфортності, тощо. Запропонований вище спосіб може бути використаний для рівнем комфортності *A-E*. Якщо в способі [12] задати мінімально допустимі відстані між людьми рівними нулю при щільності $0,4-0,7 \text{ м}^2 / \text{м}^2$, то моделювання руху буде відповідати рівню *F.a*).

В роботі [13] люди представляються трикомпонентною моделлю, яка представляється об'єднанням трьох еліпсів; основного та двох допоміжних. Основний еліпс моделює рух тулуба людини в рамках маневреності, а допоміжні моделюють рух плеча людини в горизонтальній площині в рамках, які визначають антропологічні характеристики людини. Спосіб моделювання руху людей, що представляються трикомпонентною моделлю, демонструю можливість врахування природних деформацій тіла людини при щільності потоку вище $0,7 \text{ м}^2 / \text{м}^2$ і відповідає рівню комфортності *F.b*).

Коли розглядається категорія комфортності *F.c*), то зменшення горизонтальної проекції людини в першому наближенні може бути здійснено проведенням внутрішньої еквідистантної лінії в геометричній моделі людського тіла.

Слід зазначити, що спосіб [14] дозволяє внести зміни як в кількість компонентів об'єктів, так і в їх просторові форми, що приведе тільки до підвищення трудомісткості алгоритмів розв'язання задачі.

В таблиці 2. представлені різні категорії руху і відповідні їм способи моделювання руху потоку людей.

Таким чином, встановлено зв'язок між щільністю потоку, комфортністю руху людей та способами моделювання їх руху.

Таблиця 2

Категорія руху людей в інтервалах щільності потоків [4] та способи їх геометричного моделювання

Значення щільності, m^2 / m^2	0-0,05	0,05-0,15	0,15-0,4	0,4-0,7	0,7-0,9	0,9-1,0	1,0-1,15
Вид руху людей	Індивідуальний, індивідуально-поточний						
	вільний	вільний	без контактних перешкод	з контактними перешкодами	з силовими впливами		
					злите	деформація тіл	Здавлювання тіл
МДВ, м	>1,2	1,1-1,2	0,9-1,1	0,6-0,9	-	-	-
Способи моделювання руху неоднорідного потоку людей	Індивідуальний	Індивідуально-поточний рух людей з обмеженнями на мінімально-допустимі відстані між ними, що задають комфортність			Моделювання ІПР людей без врахування мінімально-допустимих відстаней (МДВ) між ними	Моделювання ІПР людей, представлених трикомпонентною моделлю	Моделювання ІПР людей з обмеженнями в об'єктах потоці

Висновки. В даній роботі отримано зв'язок між способами моделювання руху потоку людей, рівнем комфортності їх руху та зі щільністю потоку. Здійснена їх класифікація. Показано, що зміна категорії комфортності руху потоку людей може бути здійснена в способі індивідуально поточного їх руху як шляхом зміни просторової форми об'єктів, що апроксимують геометричну проекцію тіла людини, так і заміною обмежень задачі.

Література

1. Статистическая информация о событиях природного и техногенного происхождения. URL: <https://www.fhn.gov.az/index.php?aze/pages/150>.
2. СНиП 21–01–97*. Пожарная безопасность зданий и сооружений.
3. Karkin I.N., Parfenenko A.P. Floiwtech VD – computer-simulation method from evacuation calculation. *International Scientific and Technical Conference Emergency Evacuation of People from Buildings*. Warsaw, 2011. P.111–118.
4. Холщевников В.В., Самошин Д.А. Эвакуация и поведение людей на пожарах: учебное пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. 210 с.
5. Pathfinder: Technical reference. Thunderhead Engineering Consultants Inc. (2009). URL: <http://www.thunderheadeng.com/pathfinder> (date of the application 10.03.2015).
6. Donald Mott Mac. Evacuation modeling, URL: <http://www.mottmac.com> (date of the application 10.03.2015).
7. Schadschneider W., Klingsch H., Kretz T., Rogsch C., Seyfried A. Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and applications Encyclopedia of Complexity and System Science. Springer. 2009.
8. Helbing D. Traffic related self-driven many-particle system / D. Helbing. *Rev. Mod. Phys.* 73(4). 2001. 1067–1141.
9. Zhao D.L., Yang L.Z., li J. Exit dynamics of occupant evacuation in an emergency. *Physica A.* 363. 2006. 501–512.
10. A.Varas A., Cornejo M.D., Mainemer D., Toledo B., Rogan J., Munoz V. Cellular automata model for evacuation process with obstacles. *Physica A.* 382. 2007. 631–642.
11. Холщевников В.В., Парфененко А.П. Сопоставление различных моделей движения людских потоков и результатов программно-вычислительных комплексов. *Пожаровзрывобезопасность*. Т.24, №5. 2015. С.68–74.
12. Komyak V.M., Komyak V.V., Danilin A.N. A study of ellipse packing in the high-dimensionality problems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*.1/4(85). 2017. P.17–23.
13. Кязімов К.Т. Трьохкомпонентна модель проєкції людського тіла. *Матеріали XX Міжнарод. науково-практич. конф. по проблемам геометричного моделювання*. Мелітополь, 2020 . С. 102-110.
14. Komyak V., Kyazimov K., Danilin O. Simulation of active movement of people during evacuation from buildings. *Problems of Emergency Situations*. 32. Kharkiv: NUCZU. 2020.
15. Komyak Va, Kyazimov K., Komyak Vl., Naydysh A., Cosse A., Danilin A.,

- Virchenko G., Martynov V. Development of models for the rational choice and accommodation of people in mobile technical vehicles when evacuating from buildings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkiv, 4/4 (106), 29–36 (2020).
16. Предтеченский В.М., Милинский А.И. Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков. М.: Изд. лит. по строительству, 1969; Berlin. 1971; Koln. 1971; Praha. 1972; U.S., New Delhi. 1978. Изд. 2. М.: Стройиздат. 1979.
17. Сегеда С. Антропология. Київ: Либідь. 2009. 424 с.

КАТЕГОРИИ КОМФОРТНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ В ПОТОКЕ И СПОСОБЫ ИХ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кязимов К.Т.

Пожары, взрывы и другие чрезвычайные ситуации представляют особый риск для зданий из-за особенностей их индивидуального проектирования, строительства, возведение и дальнейшей эвакуации. В случае возникновения и развития чрезвычайной ситуации в зданиях с целью их ликвидации ставится задача оптимизации выполнения спасательных работ, важнейшей частью которых является обеспечение безопасности людей.

Возможные формы защиты населения включают организацию управляемой эвакуации людей от чрезвычайных ситуаций, в том числе из зданий на необходимое время, рассчитанное на основе их проектно-планировочных решений

При движении людей в потоке выделяют следующие категории: комфортные, спокойные, активные, с высокой активностью. В данной работе предлагается способы моделирования движения потока людей увязать с уровнями комфортности движения людей в потоке и с плотностью потока.

При свободном движении, свободном без контактных препятствий, свободном с контактными препятствиями (уровни комфортности А-Е) моделирование осуществляется с учетом соответственно разных минимально допустимых расстояний между людьми (представленных эллипсами, сложными объектами).

При уровне комфортности F моделирование слитного движения с силовыми действиями без деформаций тел осуществляется моделированием движения потока людей без учета минимально допустимых расстояний между ними; моделирование сплошного

движения с силовыми действиями, приводящими к природной деформации тел, выполняется путем представления людей трехкомпонентной модели, каждая компонента которого может осуществлять вращение в допустимых пределах, которые определяются, исходя из антропологических данных человека; а при силовых действиях, приводящих к сдавливанию тела человека, моделирование осуществляется путем уменьшения горизонтальной проекции человека в пределах от 0 до 15%, а при наступлении асфиксии - к моделированию движения с областями запрета.

Таким образом, изменение категории движения потока людей может быть учтено в способе индивидуально поточного их движения как путем изменения пространственной формы объектов, аппроксимирующих геометрическую проекцию тела человека, так и ограничений задачи.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, безопасность, эвакуация, неоднородные потоки людей, способы моделирования, категории комфортности движения, плотность потока.

COMFORT CATEGORIES OF MOVEMENT OF PEOPLE IN A FLOW AND METHODS OF THEIR MODELING

Kyazim Kazimov

Fires, explosions and other emergencies pose a particular risk to buildings due to the features of their individual design, construction, erection and subsequent evacuation. In the event of emergence and development of an emergency situation in buildings with the purpose of their localization and elimination, the task is to optimize the performance of rescue operations, the predominant and most important part of which is to ensure the safety of people.

Possible forms of population protection include the organization of guided evacuation of people from emergencies, in particular from buildings for the required time, calculated on the basis of their design-planning decisions.

At movement of people in a stream allocate the following categories: comfortable, quiet, active, with high activity. In this paper, we propose methods of modeling the movement of the flow of people to link with the levels of comfort of the movement of people in the flow and the density of the flow.

With free movement, free without contact obstacles, free with contact obstacles (comfort levels A-E), the simulation is carried out taking into account the different minimum allowable distances between people (represented by ellipses, complex objects).

At the level of comfort F , modeling of a continuous movement with forceful actions without deformations of bodies is carried out by modeling the movement of a stream of people without taking into account the minimum permissible distances between them; modeling of continuous motion with forceful actions leading to natural deformation of bodies is performed by representing people with a three-component model, each component of which can rotate within acceptable limits, which are determined based on the anthropological data of a person; and in case of forceful actions leading to the squeezing of the human body, modeling is carried out by reducing the horizontal projection of a person in the range from 0 to 15%, and with the onset of asphyxia - to modeling movement with areas of inhibition.

Thus, the change in the category of movement of the flow of people can be carried out in the way of their individual flow of movement, both by changing the spatial shape of objects that approximate the geometric projection of the human body, and by the constraints of the task.

Key words: emergency, safety, evacuation, non-uniform flows of people, modeling methods, categories of traffic comfort, flow density.

Referenses

1. Statistics information about sobies of natural and anthropogenic proshozhdenia. Retrieved from : <https://www.fhn.gov.az/index.php?aze/pages/150>. [in Russian]
2. SNiP 21–01–97*. Fire safety of buildings and structures.
3. Karkin, I.N., Parfenenko, A.P. Floiwtch (2011) VD – computer-simulation method from evacuation calculation. International Scientific and Technical Conference Emergency Evacuation of People from Buildings. Warsaw, 111–118. [in English]
4. Kholshchevnikov, V.V., Samoshin, D.A. (2009) Evacuation and the deeds of people in the heat. M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, [in English]
5. Pathfinder: Technical reference. (2009). Thunderhead Engineering Consultants Inc. Retrieved from: <http://www.thunderheadeng.com/pathfinder> (date of the application 10.03.2015).
6. Donald, Mott Mac. Evacuation modeling. Retrieved from: <http://www.mottmac.com> (date of the application 10.03.2015). [in English]
7. Schadschneider, W., Klingsch, H., Kretz, T., Rogsch, C., Seyfried, A. (2009) Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and applications. Encyclopedia of Complexity and System Science. Springer, [in English]
8. Helbing, D. (2001) Traffic related self-driven many-particle system. Rev. Mod. Phys. 73(4), 1067–1141. [in English]
9. Zhao, D.L., Yang, L.Z., Li J. (2006) Exit dynamics of occupant evacuation

- in an emergency. *Physica A*. 363, 501–512. [in English]
10. Varas, A., Cornejo, M.D., Mainemer, D., Toledo ,B., Rogan, J., Munoz, V. (2007) Cellular automata model for evacuation process with. *Physica A*. 382, 631–642. [in English]
 11. Kholshchevnikov, V.V. (2015) Comparison of different models of human flow and the results of software and computing complexes. *Pozharovzryvobezopasnost*. 24(5), 68–74. [in Russian]
 12. Komyak, V.M., Komyak, V.V., Danilin, A.N. (2017) A study of ellipse packing in the high-dimensionality problems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*.1/4(85), 17–23 [in English]
 13. Kyazimov, K.T. (2020) Three-component model of projection of the human body. *Proceedings of the 20th International Scientific and Practical Conference*. Melitopol: MTPU, 102-110 [in Ukrainian]
 14. Komyak, V., Kyazimov, K., Danilin, O. (2020) Simulation of active movement of people during evacuation from buildings. *Problems of Emergency Situations*. 32. Kharkiv: NUCZU, [in English]
 15. Komyak, Va, Kyazimov, K., Komyak, Vl., Naydysh A., Cosse A., Danilin A., Virchenko G. Martynov V. (2020) Development of models for the rational choice and accommodation of people in mobile technical vehicles when evacuating from buildings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkiv, 4/4 (106), 29–36. [in English]
 16. Predtechenskiy, V. M., Milinskiy, A. I. (1969) *Designing buildings based on the organization of human flows*. M.: Izd. lit. po stroitel'stvu, Berlin, 1971; Koln, 1971; Praha, 1972; U.S., New Delhi, 1978. Izd. 2. M.: Stroyizdat, 1979.
 17. Segeda, S. (2009) *Anthropology*. Kiiv: Libid, [in Ukrainian].