

УДК 515.2: 519.85

## **ВАРІАНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕВАКУАЦІЇ ЛЮДЕЙ З ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ У РАЗІ ВИНИКНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ**

Комяк В.М., д.т.н.

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

Кязімов К.Т., к.т.н.

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

*Пожежі, вибухи та інші надзвичайні ситуації (НС) являють собою особливу небезпеку для висотних будівель в силу особливостей їх конструктивно-планувальних рішень, призначення, зведення та подальшої евакуації. Характер пожежної вибухопожежної небезпеки висотних будівель визначається: наявністю умов, що сприяють виникненню пожежі; можливістю масового перебування людей в будівлі; висотою будівлі, що перевищує можливості використання для порятунку людей механічних сходів, наявних в гарнізонах пожежної охорони; інтенсивністю поширення під час пожежі у висотній будівлі полум'я, диму, токсичних речовин по приміщенням, коридорам, сходовим клітинам, шахтам ліфтів і технічним комунікаціям; блокуванням ліфтів і виходу з ладу управління ліфтами; можливістю прогресуючого руйнування будівлі при НС.*

*Таким чином, основна причина трагічних наслідків при НС в висотних будівлях – це блокування шляхів евакуації продуктами горіння та вогнем, тому виникає необхідність в моделюванні руху потоків людей по мережі коридорів, сходів, за допомогою ліфтів і з використанням засобів самопорятунку та з їх раціональним вибором в умовах розвитку НС.*

*В статті сформульована задача евакуації з висотних будівель, як задача мінімізації часу  $t = t^0 + q\Delta t \leq t_{необ.}$ ,  $q = 1, 2, \dots$  евакуації людей по мережі, що складається із коридорів, сходів, ліфтів, шляхів руху засобів аварійної евакуації у разі виникнення надзвичайної ситуації в момент часу  $t^0$  і при цьому максимізації ймовірності їх порятунку в кожний  $q$ -тий інтервал часу при виконанні умов їх неперетинання при русі, умов їх перебування на шляхах переміщення і ряду технологічних обмежень, серед яких можна виділити умови на не перевищення щільності потоку допустимої, маневреності та комфортності людей при їх русі, тощо.*

*Сформульована задача відноситься до NP-складних. Показано, що задача оптимізації вибору шляхів та засобів для евакуації з*

висотних будівель має дискретно-неперервну структуру великої вимірності, тому її розв'язок має два етапи: дискретний – оптимізацію на дискретній множині, яка представлена в роботі деревом розв'язків та неперервний – моделювання руху гетерогенних потоків людей по мережі, складовими якої є коридори, сходи, шляхи руху ліфтів та засобів аварійної евакуації.

*Ключові слова:* висотні будівлі, евакуація, моделювання, дерево розв'язків, варіантне моделювання

**Постановка проблеми.** Розвиток людства на сучасному етапі визначається рівнем розвитку науки і технологій, можливостями ефективно вирішувати нові складні задачі. Сучасні наукові підходи до вирішення проблем практично у всіх областях опираються на досягнення в області моделювання і комп'ютерних технологій.

Однією з проблем на сьогоднішній день є безпека життєдіяльності людей у висотних будівлях, в яких комплексно розміщуються бізнес-центри, супермаркети зі складами різноманітної продукції, стоянки автомобілів, офіси, житлові приміщення, тощо. Для забезпечення безпеки людей формуються науково-обґрунтовані плани евакуації людей по шляхам евакуації, що включають сходи, ліфти, коридори на поверхах, стаціонарні рятувальні засоби індивідуального або колективного використання. Тому актуальною є завдання розподілу потоків людей по мережі, що включає сходи, коридори, ліфти, засоби аварійної евакуації, а також перерозподілу їх в реальному часі при надзвичайній ситуації після відключення ліфтів, перекриття сходових клітин або коридорів (іншими словами отримання набору можливих сценаріїв руху для кожного відрізка часу).

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** В роботі [1] обґрунтовано обмеження мінімальних меж вогнестійкості основних конструкцій висотних будівель: для будівель заввишки до 100м – 150 хв., більше 100м. – 180 хв. Приведений час може бути використаний для обґрунтування необхідного часу евакуації.

В роботі [2] розв'язана задача визначення структури і розмірів шляхів евакуації при проектуванні висотних будівель (кількості сходів, коридорів на поверхах, їх розмірів і місць розташування), що дозволяють здійснити повну евакуацію за необхідний час.

В роботах [3–5] розглянуті шляхи евакуації людей при пожежі, а також сучасні зарубіжні конструкції висотної рятувальної техніки.

Згідно п.6.24 ДБН 21-01-97, у разі пожежі, для евакуації людей повинні бути використані сходи, а не ліфти. Існуючі ж норми приводять однакове число сходів, як для 2-х, так і для 102-поверхових будівель. В цьому випадку при евакуації з висотного будинку потік

людей досягає щільності 7-8 чол./м<sup>2</sup> і більше, що призводить як до травматизму, так і до летальних випадків. Тому, як видно із зарубіжних статей, що присвячені пожежам в багатоповерхових будинках, ліфти використовуються частиною людей для евакуації до тих пір, поки вони функціонують. Наприклад, використовуючи ліфти при евакуації з висотних будівель Всесвітнього торгового центру в Нью-Йорку 11 вересня 2001 р., зуміли врятуватися більш 3000 чоловік.

Тому виникла необхідність в розробці ефективних підходів до моделювання евакуації людей з висотних будівель у разі виникнення надзвичайної ситуації з використанням сходів, коридорів, ліфтів, засобі аварійної евакуації,

**Формулювання цілей статті.** Моделювання руху потоків людей по мережі, що включає сходи, коридори, ліфти, засоби аварійної евакуації, а також їх перерозподілу в реальному часі при надзвичайній ситуації.

**Основна частина.** Нехай визначені: тривимірний об'єкт  $S_0$  будь-якої просторової форми (в окремому випадку, паралелепіпед), що описує висотну будівлю, кількість поверхів  $N$  в ньому з кількістю людей на них  $N_j, j=1,2,\dots,N, (\sum_{j=1}^N N_j = M)$  відповідно. Нехай відомо їх

розташування  $u = u_g^0(x_g^0, y_g^0, z_g^0), g=1,2,\dots,M$  в момент виникнення НС  $t^0$ , а також задано структура коридорів  $K_{ij,j}(u_{ij,j}^H, u_{ij,j}^K), ij=1,2,\dots,p_j$  на кожному з поверхів  $j=1,2,\dots,N$  с координатами початку  $u_{ij,j}^H(x_{ij,j}^H, y_{ij,j}^H, z_{ij,j}^H)$ , кінця  $u_{ij,j}^K(x_{ij,j}^K, y_{ij,j}^K, z_{ij,j}^K)$  і з їх шириною  $w_{ij,j}$ ; кількість  $n$  сходів  $L_i(u_i), i=1,2,\dots,n$  з їх місцем розташування  $u_i(x_i^*, y_i^*, z_i), i=1,2,\dots,n, z_i \in [0, H]$ , ( $H$  - висота будівлі) і з шириною  $w_i$ ; кількість  $v$  ліфтів  $Li_{jj}(u_{jj}), jj=1,2,\dots,v$  місткістю  $v_{jj}, jj=1,2,\dots,v$  людин з їх місцем розташування  $u_{jj}(x_{jj}^*, y_{jj}^*, z_{jj}), jj=1,2,\dots,n, z_{jj} \in [0, H]$  і швидкістю  $V_{jj}, jj=1,2,\dots,v$ .

Ліфти можуть бути вимкнені в моменти часу  $t = t_0 + k\Delta t \leq t_{необ.}, k=1,2,\dots$  ( $t_{необ.}$  - необхідний час для евакуації, який визначається об'ємно-планувальними рішеннями будівлі), а сходи перекриті в моменти часу  $t = t_0 + l_i\Delta t \leq t_{необ.}, l_i=1,2,\dots, i=1,2,\dots,n$ . У разі неможливості евакуації по сходах і за допомогою ліфтів передбачена аварійна евакуація за допомогою засобів аварійної евакуації. Нехай кількість видів засобів евакуації, що використовуються, становить  $r$ , кількість протипожежних відсіків у будівлі дорівнює  $mn$ , тобто

$S_0 = \bigcup_{ii=1}^{nn} H_{ii}$ , де  $H_{ii} = \bigcup_{ji=1}^{m_{ii}} S_{ii,ji}$ ,  $S_{ii,1}, S_{ii,2}, \dots, S_{ii,m_{ii}}$ , відповідно, перший, другий, ...,  $m_{ii}$ -тий поверхи  $ii$ -го відсіку,  $\sum_{ii=1}^{nn} m_{ii} = N$ , а також визначені місця розміщення  $ll$ -тих ( $ll = 1, 2, \dots, l \in \{1, \dots, r\}$ ) засобів евакуації  $u_{ii,j_{ii},ll}(x_{ii,j_{ii},ll}, y_{ii,j_{ii},ll}, z_{ii,j_{ii},ll})$   $ii = 1, \dots, nn$ ;  $j_{ii} = 1, 2, \dots, m_{ii}$  ( $ll = 1, 2, \dots, l \in \{1, \dots, r\}$ ) ( $j_{ii}$ -тий  $j_{ii}$  поверх  $ii$ -го відсіку;  $m_{ii}$ -кількість поверхів  $ii$ -го відсіку) і нехай кількість кожного виду засобів дорівнює  $C_{ii,j_{ii},ll}$  (або  $C_{ll,j}$  ( $ll = 1, 2, \dots, l \in \{1, \dots, r\}$ ) на  $j$ -тому поверсі  $j = \sum_{k_z=1}^{i-1} m_{k_z} + j_{ii}$ ). Шляхи аварійної евакуації людей складаються з шляху від місця їх розташування  $u_{jl_j}(x_{jl_j}, y_{jl_j}, z_{jl_j})$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ ,  $l_j = 1, 2, \dots, N_j$  до місць розташування засобів евакуації  $u_{ii,j_{ii},ll}(x_{ii,j_{ii},ll}, y_{ii,j_{ii},ll}, z_{ii,j_{ii},ll})$   $ii = 1, \dots, nn$ ;  $j_{ii} = 1, 2, \dots, m_{ii}$ ,  $ll = 1, \dots, l$  по мережі коридорів; або прямо з приміщень, якщо коридори перекриті, а потім від них - на крайні поверхи відсіків  $u_{ii}^k(x_{ii}^*, y_{ii}^*, z_{ii}^*)$ ,  $ii = 1, 2, \dots, nn$  (де знаходяться приміщення для тимчасового укриття людей) за допомогою засобів аварійної евакуації, позначимо їх  $\{AV_{ll}(u_{ii,j_{ii},ll}, u_{ii}^k, t)\}$ .

Структура сходів, ліфтів, коридорів та засобів аварійної евакуації може змінюватися в часі, позначимо її

$$\mathfrak{R}(U, t) = \left\{ \left\{ L_i(u_i, t) \right\}, \left\{ L_{ij}(u_{ij}, t) \right\}, \left\{ K_{ij,j}(u_{ij,j}^H, u_{ij,j}^K, t) \right\}, \left\{ AV_{ll}(u_{ii,j_{ii},ll}, u_{ii}^k, t) \right\} \right\}$$

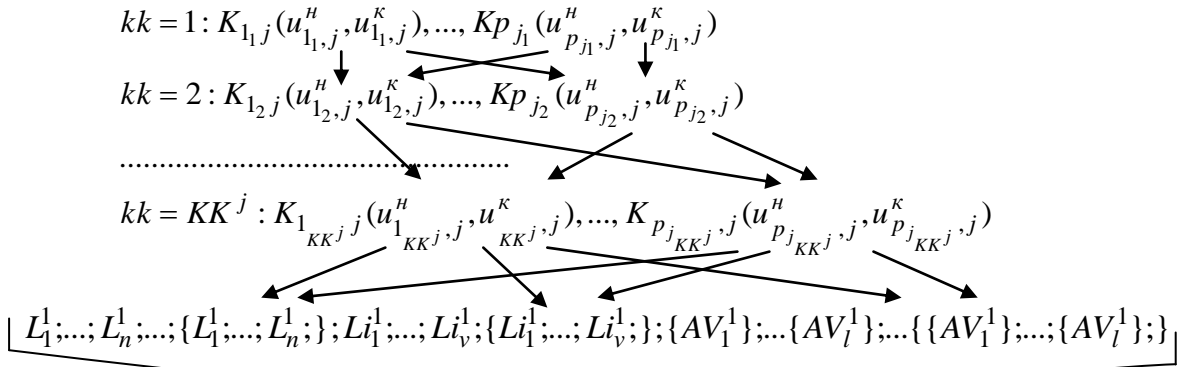
$$U \in \left\{ \left\{ u_i \right\}, \left\{ u_{jj} \right\}, \left\{ u_{ij,j} \right\}, \left\{ u_{ii,j_{ii},ll} \right\} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad jj = 1, 2, \dots, v, \quad j = 1, 2, \dots, N, \\ ij = 1, 2, \dots, p_j, \quad ii = 1, \dots, nn; \quad (ll = 1, 2, \dots, l \in \{1, \dots, r\})$$

Виникає наступна задача.

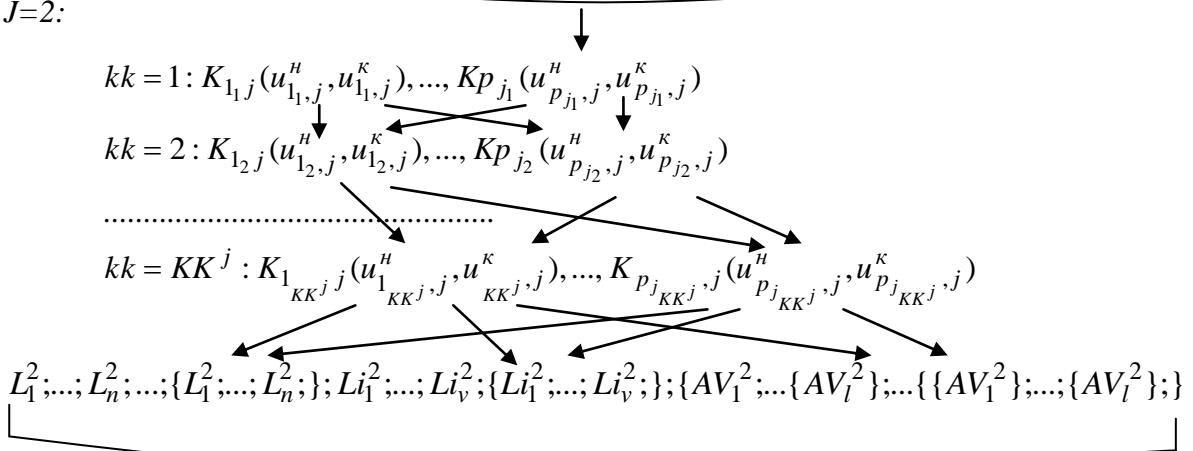
Необхідно мінімізувати час  $t = t^0 + q\Delta t \leq t_{необ.}$ ,  $q = 1, 2, \dots$  евакуації людей по мережі, що складається із коридорів, сходів, ліфтів, а також шляхів руху засобів аварійної евакуації  $\mathfrak{R}(U, t) = \left\{ \left\{ L_i(u_i, t) \right\}, \left\{ L_{ij}(u_{ij}, t) \right\}, \left\{ K_{ij,j}(u_{ij,j}^H, u_{ij,j}^K, t) \right\}, \left\{ AV_{ll}(u_{ii,j_{ii},ll}, u_{ii}^k, t) \right\} \right\}$  у разі виникнення надзвичайної ситуації в момент часу  $t^0$  і при цьому максимізації ймовірності їх порятунку в  $q$ -тий момент часу при виконанні умов неперетинання людей при русі, умови їх перебування на шляхах переміщення і ряду технологічних обмежень, серед яких можна виділити умови не перевищення щільності потоку допустимої, маневреності та комфортності людей при їх русі, тощо.

Слід зазначити, що задача оптимізації вибору шляхів та засобів

для евакуації має дискретно-неперервну структуру великої вимірності.  
 $j=1$ :



$J=2$ :



$J=N$ :

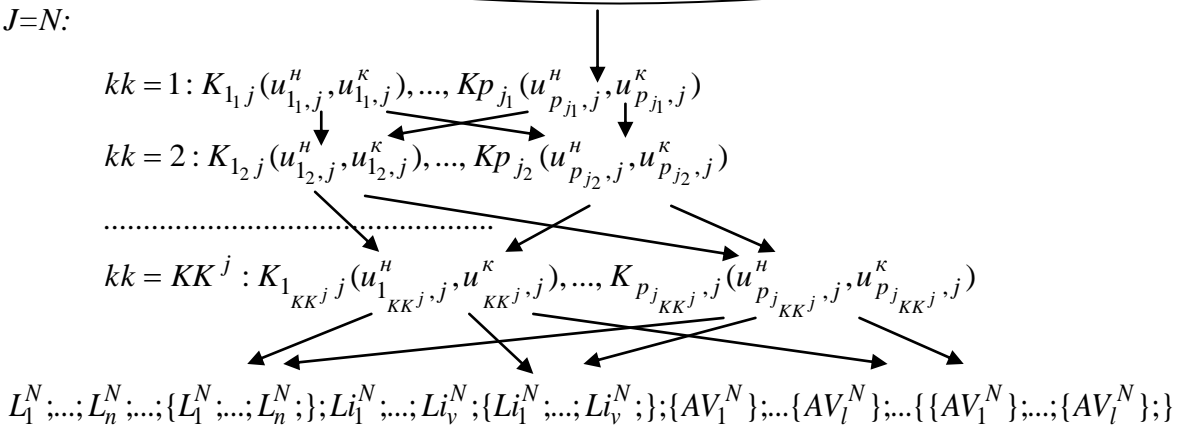


Рис.1. Дерево розв'язків 1

Дискретний етап – це оптимізація на дискретній множині, яка може бути представлена, наприклад, деревом розв'язків, що надано на рисунку 1, неперервний – це моделювання руху гетерогенних потоків людей по мережі, складовими якої є коридори, сходи, шляхи руху ліфтів та засобів аварійної евакуації. Задача, що розглядається в роботі, відноситься до *NP*-складних.

Перебір гілок дерева розв'язків 1 здійснюється за методом гілок

та меж. Як правила відтинання використовуються як властивості комбінаторних множин [6], так і метод Монте-Карло на рівнях дерева. В якості верхньої оцінки використовується оптимальне значення функції мети, яке отримується на попередніх етапах розв'язку і уточнюється в процесі розв'язання. Це дискретний етап у вирішенні задачі, що розглядається. Неперервний етап - це моделювання руху потоків людей по мережі коридорів, сходів, ліфтів та за допомогою засобів аварійної евакуації. Моделювання однорідних потоків по мережі коридорів і сходів розглянуто в роботі [2], а моделювання руху по мережі коридорів неоднорідних потоків людей, що апроксимуються еліпсами, наведено в [7].

**Висновки.** Показано, що задача оптимізації вибору шляхів та засобів для евакуації з висотних будівель має дискретно-неперервну структуру великої вимірності, тому її розв'язок має два етапи: дискретний – оптимізацію на дискретній множині, яка може бути представлена, наприклад, деревом розв'язків та неперервний – для кожної гілки дерева – це моделювання руху гетерогенних потоків людей по мережі, складовими якої є коридори, сходи, шляхи руху ліфтів та засобів аварійної евакуації. Подальші дослідження будуть направлені на розробку ефективних алгоритмів руху гетерогенних потоків людей з більш високою точністю їх представлення.

### *Литература*

1. Ройтман В.М. Нормирование защиты высотных зданий от прогрессирующего разрушения при комбинированных особых воздействиях. М.: Пожаровзрывобезопасность, 2007. Т.10, N2. С.6–11.
2. Комяк В. В. Моделі та методи розбиття і трасування для оцінки шляхів евакуації у висотних будівлях при проектуванні: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02 «Математичне моделювання та обчислювальні методи». Харків, 2014. 25 с.
3. Холщевников В.В., Самошин Д.А. К вопросу безопасности использования лифтов при эвакуации из высотных зданий. М.: Пожаровзрывобезопасность, 2006. Т.15, N5. С.45–47.
4. Яковенко Ю.Ф., Яковенко К.Ю. Зарубежные пожарно-спасательные автомобили: новые технические решения. М.: Пожаровзрывобезопасность, 2003. N5. С.58–64.
5. Кашевник Б.Л. Проблемы спасения людей при чрезвычайных ситуациях в многоэтажных зданиях. М.: Пожаровзрывобезопасность, 2003. N2. С.34–38.
6. Комяк В.М., Данилин А.Н., Комяк В.В., Кязимов К.Т. Математические модели оптимизации выбора технических средств и их местоположений для эвакуации из высотных зданий. *Вестник*

*Херсонского Национального Технического Университета, Херсон: ХНТУ, 2015. N.3(54). С.565–569.*

7. Komyak Va. Komyak 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.

## **ВАРИАНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ ИЗ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ В СЛУЧАЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ**

Комяк В.М., Кязимов К.Т.

*Пожары, взрывы и другие чрезвычайные ситуации (ЧС) представляют собой особую опасность для высотных зданий в силу особенностей их конструктивно-планировочных решений, назначения, возведения и дальнейшей эвакуации. Характер пожарной взрывопожарной опасности высотных зданий определяется: наличием условий, способствующих возникновению пожара; возможностью массового пребывания людей в здании; высотой здания, которая превышает возможности использования для спасения людей механических лестниц, имеющих в гарнизонах пожарной охраны; интенсивностью распространения во время пожара в высотном здании пламени, дыма, токсичных веществ по помещениям, коридорам, лестничным клеткам, шахтам лифтов и техническим коммуникациям; блокированием лифтов и выходом из строя управления лифтами; возможностью прогрессирующего разрушения здания при ЧС.*

*Таким образом, основная причина трагических последствий при ЧС в высотных зданиях - это блокирование путей эвакуации продуктами горения и огнем, поэтому возникает необходимость в моделировании движения потоков людей по сети коридоров, лестниц, с помощью лифтов и с использованием средств самоспасения и с их рациональным выбором в условиях развития ЧС.*

*В статье сформулирована задача эвакуации из высотных зданий, как задача минимизации времени  $t = t^0 + q\Delta t \leq t_{необ.}$ ,  $q = 1, 2, \dots$  эвакуации людей по сети, состоящей из коридоров, лестниц, лифтов, а также путей движения средств аварийной эвакуации в случае возникновения ЧС в момент времени  $t^0$  и при этом максимизации вероятности их спасения в каждый  $q$ -тый интервал времени при выполнении условий их непересечения при движении, условий их*

пребывания на путях перемещения и ряда технологических ограничений, среди которых можно выделить условия на непревышение плотности потока допустимой, маневренности и комфортности людей при их движении и т.д.

Сформулированная задача относится к NP-сложным. Показано, что задача оптимизации выбора путей и средств для эвакуации из высотных зданий имеет дискретно-непрерывную структуру большой размерности, поэтому ее решение имеет два этапа: дискретный - оптимизацию на дискретном множестве, которая представлена в работе деревом решений и непрерывный - моделирование движения гетерогенных потоков людей по сети, составляющими которой являются коридоры, лестницы, пути движения лифтов и средств аварийной эвакуации.

Ключевые слова: высотные здания, эвакуация, моделирование, дерево решений, вариантное моделирование

## **VARIANTAL MODELING OF EVACUATION OF PEOPLE FROM ALTITUDE BUILDINGS IN THE EVENT OF AN EMERGENCY SITUATION**

Комыак V., Kyazimov K.

*Fires, explosions and other emergency situations (ES) pose a special danger to high-rise buildings due to the peculiarities of their structural and planning decisions, purpose, construction and further evacuation. The nature of the fire and explosion hazard of high-rise buildings is determined by: the presence of conditions conducive to the occurrence of a fire; the possibility of a mass stay of people in the building; the height of the building, which exceeds the ability to use to save people mechanical stairs available in the garrisons of the fire department; the intensity of the spread of fire, smoke, toxic substances through the premises, corridors, stairwells, elevator shafts and technical communications during a fire in a high-rise building; blocking elevators and failure of elevator control; the possibility of progressive destruction of the building during an emergency.*

*Thus, the main reason for the tragic consequences of emergencies in high-rise buildings is the blocking of evacuation paths with combustion products and fire, so there is a need to simulate the movement of people through a network of corridors, stairs, using elevators and using self-rescue tools and with their rational choice in emergencies.*

*The article formulates the problem of evacuation from high-rise*



*buildings, as the task of minimizing the time  $t = t^0 + q\Delta t \leq t_{\text{необ}}$ ,  $q = 1, 2, \dots$  of evacuation of people through a network consisting of corridors, stairs, elevators, as well as the paths of emergency evacuation means in case of emergencies at a time  $t^0$  while maximizing the probability of their salvation at each  $q$  the second in the time interval under the conditions of their non-intersection during movement, the conditions of their stay on the paths of movement and a number of technological limitations, among which we can distinguish conditions for the flow density not to exceed permissible, maneuverability and comfort of people during their movement, etc.*

*The stated problem is NP-complex. It is shown that the task of optimizing the choice of ways and means for evacuation from tall buildings has a discrete-continuous structure of large dimension, therefore, its solution has two stages: discrete - optimization on a discrete set, which is presented in the decision tree and continuous - modeling the movement of heterogeneous flows of people on the network, the components of which are corridors, stairs, elevator and emergency evacuation routes.*

*Keywords: high-rise buildings, evacuation, modeling, decision tree, variational modeling*