

*А.Н. Данилин, адъюнкт, НУГЗУ,  
В.М. Комяк, д.т.н., профессор, НУГЗУ*

## **МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ВЫБОРА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И ИХ МЕСТОПОЛОЖЕНИЙ В ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЯХ ДЛЯ АВАРИЙНОЙ ЭВАКУАЦИИ**

В работе рассмотрены технические средства аварийной эвакуации, предлагается оптимизационный метод выбора средств и их местоположений в высотных зданиях для создания рациональных планов эвакуации при пожарах.

**Ключевые слова:** технические средства эвакуации, оптимизация, рациональные планы эвакуации.

**Постановка проблемы.** Одной из проблем на сегодняшний день является безопасность жизнедеятельности людей в высотных зданиях. При пожарах люди остаются отрезанными от путей эвакуации, источников электроэнергии, лифтов, более того пожарная техника оборудована неэффективно с точки зрения проведения спасательных работ на этажах, выше 14-16-ого.

При проектировании зданий должны предусматриваться специальные противопожарные решения, которые должны создать необходимые условия успешной реализации процесса эвакуации при их эксплуатации. Среди этих решений значение имеет как структура путей эвакуации, так и виды используемых спасательных средств по повышению эффективности тактического обеспечения ликвидации чрезвычайных ситуаций, в том числе и тушения пожаров.

Поэтому одной из важных проблем на этапе проектирования высотных зданий является решение комплекса задач:

- определения рационального количества трасс и их размеров, позволяющих осуществлять полную беспрепятственную эвакуацию людей за допустимое время, пока пути к лестничным клеткам не перекрыты;
- рационального выбора видов, количества стационарных спасательных средств и их местоположений, позволяющих за необходимое время покинуть здание при аварийной эвакуации.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [1] решена задача определения структуры и размеров путей эвакуации при проектировании высотных зданий (количество лестниц, коридоров на этажах, их размеры и местоположение), позволяющих осуществить полную эвакуацию за необходимое время. В работе [2] построены математические модели оптимизации выбора технических средств и их местоположений в каждом из противопожарных отсеков для эвакуации людей из высотных

зданий, но не проведены исследования по разработке методов их решения.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является исследование свойств моделей, разработанных в [2], и на их основе – разработка метода оптимизации выбора технических средств и их местоположений в высотных зданиях.

Для защиты высотных зданий используются следующие средства: индивидуальные средства одноразового использования (веревочные, тросовые устройства, парашюты); индивидуальные средства многократного использования (веревочные, тросовые устройства); коллективные средства непрерывного действия многократного использования (эластичные рукава и т.д.); коллективные средства дискретного действия многократного использования (навесные лифты и другие специальные конструкции). Пусть количество средств защиты насчитывает  $l$  типов.

Рассмотрим высотное здание. Его можно представить в виде геометрического объекта  $S_0$  любой пространственной формы. Рассматриваемое здание заполнено людьми, количество которых различно на этажах, в зависимости от его функционального назначения. Другими словами, область  $S_0$  является неоднородной с точки зрения рассматриваемой характеристики. Неоднородная область  $S_0$  по высоте на этапе проектирования разбивается резами на  $n$  подобластей (противопожарных отсеков с разной пожарной опасностью), т.е.

$$S_j, j=1,2,\dots,n, S_i \cap S_j = \emptyset, i > j=1,2,\dots,n; \quad (R^3 \setminus S_0) \cap S_i = \emptyset, i=1,2,\dots,n;$$

$$S_0 = \bigcup_{j=1}^n S_j, \quad S_j = \bigcup_{k=1}^{m_j} S_j^k, \quad \text{где } S_j^1, S_j^2, \dots, S_j^{m_j} \text{ соответственно первый, вто-}$$

рой, ...,  $m_j$ -тые этажи  $j$ -того отсека. Под пожарной опасностью понимается как разная пожарная опасность отсеков, так и разная возможность для эвакуации: например, с первых или последних этажей, которые могут быть отрезаны от выходов.

К местоположению вышеперечисленных средств защиты выдвигается ряд ограничений, которые определяют дискретную область допустимых размещений  $D\{(x_c^i, y_c^i, z_c^i)\}, c=1,2,\dots,C_i, i=1,2,\dots,l$ , где  $C_i$  – количество возможных мест размещения для  $i$ -того средства. Каждое  $i$ -тое средство защиты может быть использовано  $n_i$  раз. ( $n_i=1$  – в случае

одноразового использования;  $n_i = \left\lceil \frac{N_i}{k_i} \right\rceil$  – для случая многократного использования,  $k_i$  – вместимость  $i$ -того средства,  $N_i$  – количество людей, использующих  $i$ -тое средство.

Возникает следующая задача.

Необходимо определить соответствующий разбиению здания на противопожарные отсеки набор средств защиты  $T_m, m=1,2,\dots,mm$ ,

$mm = \sum_{i=1}^l M_i$ , ( $M_i$  – количество  $i$ -того средства защиты) и места их размещений

$$\sum_i U_m^i(x_m^i, y_m^i, z_m^i), m = 1, 2, \dots, M_i \in \{U_c^i(\tilde{\delta}_c^i, y_c^i, z_c^i)\}, c = 1, 2, \dots, C_i,$$

позволяющие повысить вероятность спасения людей при ограничениях на максимальное время аварийной эвакуации людей из каждого этажа на крайние этажи соответствующих отсеков, не превышающее допустимого времени, и на время полной эвакуации людей из здания, не большее необходимого.

Пусть определены: допустимое время  $t_{j, \text{äiä}}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$  аварийной эвакуации из отсеков, согласно их пожарной опасности, необходимое время  $t_{\text{необ}}$  полной эвакуации, которое рассчитывается для каждого здания, исходя из его объемно-планировочных решений, т.е. должны выполняться ограничения:

$$\begin{cases} \max t_j \leq t_{\text{äiä}}, j = 1, 2, \dots, n; \\ t_{\text{äiä}} \leq t_{\text{äiä}}. \end{cases} \quad (1)$$

(2)

Рассмотрим особенности рассматриваемой задачи.

Рассмотрим случай, когда здание защищается одним видом средств. В рассматриваемом случае необходимо рассмотреть  $\tilde{N}_l^1 = l$  вариантов выбора средства, количество элементов выбранного  $i \in \{1, \dots, l\}$ -того вида определяется по формуле  $n_i^k = \left\lfloor \frac{N_k}{k_i} \right\rfloor$ ,  $K_i = \sum_k n_i^k$ , где  $N_k, k_i$  –

соответственно количество людей на  $k$ -том этаже и вместимость  $i$ -того средства. Таким образом, выбор необходимого количества средств можно осуществить  $L_1 = \tilde{N}_l^1 \cdot \max_{i \in \{1, \dots, l\}} \left\{ \sum_k n_i^k \right\}$  способами.

В случае двух средств защиты необходимо рассмотреть  $\tilde{N}_l^2$  вариантов выбора пары  $(i, jj \in \{1, 2, \dots, l\})$ . Количество единиц каждого вида средств (кортеж определяемой длины  $n_i^k, n_{jj}^k$  вычисляется из множеств

$$n_i^k \in \left\{ 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{N_k}{k_i} \right\rfloor \right\}, n_{jj}^k \in \left\{ 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{N_k}{k_{jj}} \right\rfloor \right\}, \text{ где } n_i^k k_i + n_{jj}^k k_{jj} = N_k. \text{ Таким образом,}$$

выбор необходимого количества пары средств можно осуществить

$$L_2 = C_L^2 \left( \max_{i, jj \in \{1, \dots, l\}} \left\{ \prod_k \left\lfloor \frac{N_k}{k_i} \right\rfloor \cdot \left\lfloor \frac{N_k}{k_{jj}} \right\rfloor \right\} \right) \text{ способами (верхняя оценка). Аналогично,}$$

выбор трех видов средств  $(i, jj, r \in \{1, 2, \dots, l\})$ ; можно осуществить

$L_3 = C_1^3 \left( \max_{i,jj,r \in \{1, \dots, l\}} \left\{ \prod_k \left[ \frac{N_k}{k_i} \right] \cdot \left[ \frac{N_k}{k_{jj}} \right] \cdot \left[ \frac{N_k}{k_r} \right] \right\} \right)$  способами, с учетом ограничения  $n_i^k k_i + n_{jj}^k k_{jj} + n_r^k k_r = N_k$ .

Таким образом, необходимое количество средств защиты  $K = \sum_{i=1}^l (\sum_k n_i^k) = \sum_{i=1}^l K_i$  может быть определено, исходя из их свойств, следующим количеством способов (верхняя оценка)

$$NN = \sum_{i=2}^l C_1^i \left( \max_{ii, \dots, jj \in \{1, \dots, l\}} \left\{ \prod_k \left[ \frac{N_k}{k_{ii}} \right] \cdots \left[ \frac{N_k}{k_{jj}} \right] \right\} \right) + L_1 = \sum_{i=1}^l L_i \quad (3)$$

способами, с учетом того, что

$$n_1^k k_1 + \dots + n_l^k k_l = N_k, \quad (4)$$

т.е. на комбинаторном множестве сочетания кортежей мощностью (3). Для каждого из  $NN$  вариантов необходимо  $K$  средств разместить на  $M = \sum_{i=1}^l C_i$  фиксированных мест.

Как сказано выше, места размещения для  $i$ -того средства эвакуации образуют дискретную, неоднородную, с точки зрения мест размещения, область допустимых размещений  $D_i \{(\delta_c^i, y_c^i, z_c^i)\}, c = 1, 2, \dots, C_i$ . Обозначим через  $\bar{N} = n_i^k, C_{i,k}$  – соответственно количество необходимых и возможных мест размещения для эвакуации всех людей из  $k$ -ого этажа  $i$ -тым средством.

*Свойство 1.* Если  $\bar{N} = C_{i,k}$ , то каждый элемент (средство эвакуации) назначается на  $\{(\delta_c^i, y_c^i, z_c^i)\}, c = 1, 2, \dots, C_{i,k}$  места размещения.

Введем перестановку

$$\pi = (i_1, i_2, \dots, i_N); i_q \neq i_p; \forall q \neq p, q, p, i_q, i_p \in I_{C_{i,k}}; I_{C_{i,k}} = \{1, 2, \dots, C_{i,k}\}. \text{ Периодическая перестановка } \pi \text{ определяет варианты назначения средств эвакуации на места размещения из области допустимых решений. При этом критерий эффективности (время эвакуации) рассматривается, как функционал, заданный на комбинаторном множестве } \bar{I} \text{ перестановок, } \pi \in \bar{I}.$$

Мощность множества  $\bar{I}$  равна  $\bar{N}_{i,k} = C_{i,k}!$ , т.е.  $N(\pi) = C_{i,k}!$ . Если все средства эвакуации  $i$ -того вида однотипны с точки зрения мест их размещения, то оценка примет вид  $\bar{N}_{i,k}(\pi) = 1!$ .

*Свойство 2.* Если  $\bar{N} > C_{i,k}$ , т.е. число необходимых средств эвакуации больше, чем мест размещения, то комбинаторное множество в этом случае состоит из элементов

$\pi = (i_1, i_2, \dots, i_{C_{i,k}}); i_q \neq i_p; \forall q \neq p, q, p, i_q, i_p \in I_{\bar{N}}; i_p \in I_{\bar{N}}$  размещений  $A_{\bar{N}}^{C_{i,k}}$ ,

т.е.  $\bar{N}_{i,k} = N(\pi) = A_{\bar{N}}^{C_{i,k}}$ . Если все средства эвакуации  $i$ -того вида однотипны с точки зрения мест их размещения, то оценка примет вид  $\bar{N}_{i,k} = C_{\bar{N}}^{C_{i,k}}$ .

*Свойство 3.* Если  $\bar{N} < C_{i,k}$ , т.е. число необходимых средств эвакуации меньше, чем мест размещения, то комбинаторное множество - это размещения с повторениями  $\bar{A}$ . Мощность комбинаторного множества в этом случае  $\bar{N}_{i,k} = N(\pi) = A_{\bar{N}}^{C_{i,k}} = \bar{N}^{\bar{C}_{i,k}}$ . Если все средства эвакуации  $i$ -того вида однотипны с точки зрения мест их размещения, то оценка примет вид  $\bar{N}_{i,k} = f_{\bar{N}}^{C_{i,k}} = C_{\bar{N}+C_{i,k}-1}^{\bar{N}-1} = \frac{(\bar{N}+C_{i,k}-1)!}{C_{i,k}!(\bar{N}-1)!}$ .

Количество вариантов, которое необходимо рассмотреть при выборе средств эвакуации и назначения на их на фиксированные места составит  $O(NN \cdot \bar{N})$ , где  $\bar{N}$  определяется как  $\bar{N} = \sum_{i=1}^l \left( \prod_k \bar{N}_{i,k} \right)$ , когда места размещения неоднородны с точки зрения средств эвакуации.

Таким образом, рассматриваемые критерии эффективности определяется на комбинаторном множестве, которое представляет собой 2-х уровневый композиционный образ [3], на первом уровне которого рассматривается перестановка кортежей, а на втором – перестановки (свойство 1), размещения (сочетания) (свойство 2), размещения с повторениями (сочетания с повторениями) (свойство 3).

Для анализа всех вариантов выбора и назначения средств эвакуации на стационарные места их размещения построено дерево решений (рис. 1).

Для перебора вариантов размещений по дереву решений используется метод ветвей и границ [4]. В качестве отсечений на первом уровне дерева используется ограничение (4), а на втором – свойства (1 – 3), ограничения (1 – 2). В качестве верхней оценки – значение функции цели, которое уточняется в процессе решения задачи.

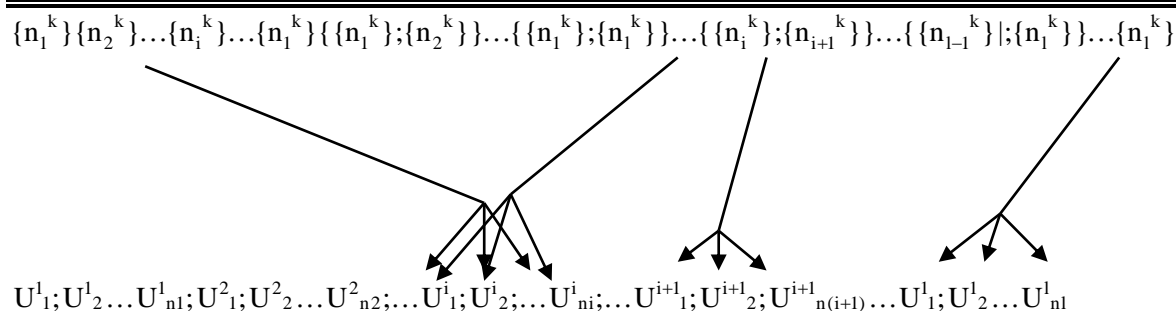


Рис. 1. Дерево решений

**Выводы.** На основании анализа свойств рассматриваемой задачи предложен метод оптимизации выбора технических средств эвакуации и стационарных мест их размещения в высотных зданиях, позволяющий повысить вероятность спасения людей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Комяк В.В. Моделі та методи розбиття і трасування для оцінки шляхів евакуації у висотних будівлях при проектуванні / В.В. Комяк: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.05.02 «Математичне моделювання та обчислювальні методи». – Харків, 2014. – 25 с.
2. Данилин А.Н. Математические модели оптимизации выбора технических средств и их местоположений для эвакуации людей из высотных зданий / А.Н. Данилин, В.В. Комяк, К.Т. Кязимов // Вестник Херсонского Национального Технического Университета. – Херсон: ХНТУ. – 2015. – №3(54). – С. 565-569.
3. Гребеннік І.В. Математичні моделі та методи комбінаторної оптимізації в геометричному проектуванні / І.В. Гребеннік: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.05.02. – Х., 2006. – 36 с.
4. Корбут А.А. Дискретное программирование / А.А. Корбут, Ю.Ю. Финкельштейн. – М.: Наука, 1969. – 368 с.

О.М. Данілін, В.М. Комяк

### Метод оптимізації вибору технічних засобів та їх місцезнаходжень у висотних будівлях для аварійної евакуації

В роботі розглянуто технічні засоби аварійної евакуації, запропоновано оптимізаційний метод вибору засобів та їх місцезнаходжень у висотних будівлях для створення раціональних шляхів евакуації при пожежах.

**Ключові слова:** технічні засоби евакуації, оптимізація, раціональні плани евакуації.

A.N. Danilin, V.M. Komyak

### Method of optimization of the choice of the technical facilities and their locations for evacuation from high-rise buildings

We consider hardware emergency evacuation proposed optimization method for selecting assets and their locations in high-rise buildings to create efficient ways of evacuation during fires.

**Keywords:** technical means of evacuation, optimization, rational evacuation plans.