

*В.В. Комяк, адъюнкт, НУГЗУ,
А.Н. Соболев, д.т.н., с.н.с., нач. кафедры, НУГЗУ,
А.Г. Коссе, к.т.н., доцент, НУГЗУ*

ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ ПО ЛЕСТНИЧНЫМ КЛЕТКАМ В ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЯХ

В работе разработан подход к моделированию движения людских потоков по лестничным клеткам с определением структуры и размеров трасс, обеспечивающих их беспрепятственное перемещение.

Ключевые слова: моделирование людских потоков, структура и размеры путей эвакуации

Постановка проблемы. Современный этап развития общества характеризуется прогрессирующей урбанизацией, что приводит к концентрации бизнес-центров, супермаркетов, престижных отелей, жилищных зданий и культурных центров на ограниченной городской территории. Стоимость единицы площади постоянно возрастает, что приводит к необходимости строительства высотных зданий, в которых комплексно размещаются и бизнес-центры, и супермаркеты со складами разнообразной продукции, и стоянки автомобилей.

Здания повышенной этажности, в отличие от обычных, имеют большую пожарную опасность, которая объясняется высотой, планированием этажей, наличием вертикальных коммуникаций и энергетического оборудования, наличием большого количества горючих материалов в виде конструкций, оборудования, мебели и др.

Проблема безопасности жизнедеятельности людей в высотных зданиях на сегодняшний день не решена. При чрезвычайных ситуациях (пожарах) люди, находясь под воздействием опасных факторов, остаются отрезанными от путей эвакуации, источников электроэнергии. Более того, пожарная техника оборудована неэффективно с точки зрения проведения спасательных работ на этажах, выше 14-16-го.

Согласно п.6.24 СНиП 21-01-97, в случае пожара, для эвакуации людей должны быть использованы лестничные клетки, а не лифты. Существующие же нормы предписывают одинаковое количество лестничных клеток, как для 2-х, так и для 102-этажных зданий. В этом случае, при эвакуации из высотного здания поток людей достигает плотности 7-8 чел./м² и более, что приводит к травматизму, панике при эвакуации.

Анализ последних исследований и публикаций. Оценки эвакуационных планов связаны с использованием математического моделирования движения потоков людей внутри здания по сети коридоров и лестниц.

В работах [1-3] исследованы особенности оценки параметров движения людских потоков в различных зданиях, их коридорах, вестибюлях. Современный этап исследований характеризуется широким использованием ЭВМ. Так, компьютерные имитационные модели эвакуации рассмотрены, например, в [3].

Анализ работ [1-3] показывает, что не исследованы особенности движения людских потоков в высотных зданиях, когда определяющим при эвакуации становится время движения по лестничным клеткам, характерной чертой для которых является образование частей потоков с максимальной плотностью в местах слияния потоков на уровне выходов из этажей. Поэтому интерес представляет обоснование метрических характеристик лестничных клеток и их количества, позволяющих осуществлять беспрепятственное движение потоков людей с целью осуществления полной эвакуации по ним за допустимое время.

Постановка задачи и ее решение. Для определения метрических характеристик трасс (путей движения) воспользуемся методикой [3], а для определения времени движения людских потоков по этим трассам в работе предложено использовать разработанный в [4] метод моделирования движения потока людей при помощи аппарата сетей Петри.

Формально сеть Петри (СП) изображается ориентированным двудольным графом специального вида, множество вершин которого делятся на два класса: позиции, которым в рассматриваемой модели соответствуют помещения здания и участки эвакуационных путей, и переходы, которым соответствуют поперечные сечения между соседними участками эвакуационных путей. Функционирование сети Петри представляет собой процесс перемещения маркеров (людей), переходящих из одной позиции в другую при срабатывании переходов. Размещение маркеров по позициям сети Петри перед началом функционирования называется начальной разметкой (или маркировкой) сети Петри и соответствует размещению людей по помещениям здания перед эвакуацией. Срабатывание переходов приводит к новой разметке, т.е. новому размещению людей внутри здания.

В предлагаемом методе структура всего здания разбивается на отдельные участки, которые можно условно разделить на две группы: пути следования людей (коридоры, лестничные марши и т.д.) и помещения здания. Для путей следования ширина каждого участка в его пределах должна оставаться неизменной $b_k = const$.

Участки, соответствующие путям следования людей, представляются в виде последовательности более мелких элементов, каждому из которых соответствует некоторая позиция, т.е. вершина графа. Каждому помещению здания соответствует в сети определенная позиция. Пример представления структуры здания в виде СП приведен на рис. 1.

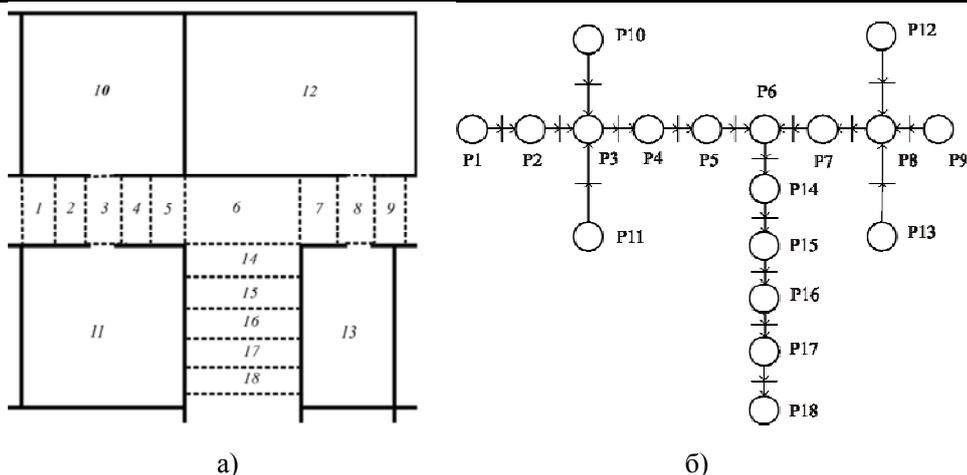


Рис. 1 – Пример представления коридора (а) в виде сети Петри (б). Соответствующие элементы здания и позиции обозначены одинаковыми номерами

Разметка сети изменяется только в некоторые моменты времени t . Временное упорядочение функционирования сети осуществляется изменением разметки сети через равные промежутки времени Δt , а длина элементарного участка пути устанавливается, как $\Delta l_k = V_{0k}^l \cdot \Delta t$, где V_{0k}^l – средняя скорость свободного движения людей по l -му виду пути (горизонтальный, по лестнице вверх, по лестнице вниз), которая зависит от плотности потока D_k . Для каждого интервала плотности потока были определены средние значения скорости движения людских потоков [3]. Количество маркеров, переходящих из одной позиции в другую, определяется количеством маркеров во входной позиции и «пропускной способностью» перехода.

При эвакуации люди, двигаясь в одном направлении, образуют так называемый людской поток. Плотность потока на участке пути, которому будет соответствовать k -я позиция, представляет собой количество людей N_k на рассматриваемом участке пути, отнесенных к площади участка

$$D_k = \frac{N_k}{l_k \cdot b_k}, \tag{1}$$

где l_k – длина k -го участка пути; b_k – поперечное сечение k -го участка пути.

Пропускная способность поперечного сечения пути (т.е. количество людей, которые смогут перейти через поперечное сечение пути в единицу времени), соединяющего смежные участки пути, которому соответствует j -й переход, рассчитывается по формуле

$$Q_j = q_k \cdot b_j, \tag{2}$$

где q_k – интенсивность потока на k -м участке пути, соответствующего входной позиции j -го перехода; b_j – ширина поперечного сече-

ния прохода, которому соответствует j – й переход.

Теоретическое значение удельной пропускной способности может быть вычислено по формуле

$$q_k = D_k \cdot V_{0k}, \quad (3)$$

где V_{0k} – средняя скорость движения.

Количество людей, которые смогут пройти через поперечное сечение участка пути (данному поперечному сечению в сети будет соответствовать j – й переход) за время Δt , определяется следующим образом

$$n_j = Q_j \cdot \Delta t. \quad (4)$$

Время, за которое i – й человек преодолеет участок пути, соответствующий k – й позиции (что в рассматриваемой сети Петри соответствует задержке i – го маркера в k – й позиции), определяем по формуле

$$t_i = \frac{l_k}{V_i}, \quad (5)$$

где l_k – длина участка пути, соответствующего k – й позиции; V_i – скорость человека, соответствующего i – му маркеру.

Рассмотрим моделирование движения потока по лестничным клеткам здания с обоснованием их метрических характеристик, обеспечивающих беспрепятственное движение с плотностью 4 чел./м².

Люди, выходящие на лестничную клетку, образуют также потоки, вначале не сливающиеся, а потом пересекающиеся между собой и, как следствие, сливающиеся между собой. При каждом пересечении ширина лестничной клетки, начиная с этажа, на котором произошло пересечение интервалов, как правило, увеличивается и определяется по формуле

$$b_j = \frac{n_j^1 + n_{jn}^1}{4 \cdot \Delta l_k}, \quad (6)$$

где n_j^1 – количество людей, которое выйдет с j -того этажа, n_{jn}^1 – количество людей, которое находится на интервале длины Δl_k , поступивших по лестнице с $(j+1)$ -го этажа. Если ширина лестничной клетки, определенная по формуле (6), не удовлетворяет нормам проектирования, начиная с j -того этажа вводится в рассмотрение дополнительно еще одна лестничная клетка.

Для определения метрических характеристик лестничных клеток в здании из N этажей предлагается следующий алгоритм.

Для каждого этажа можно определить длину потока, который заполняется людьми с рассматриваемого этажа по формулам:

$$l_{nom}^j = \frac{n_j}{n_j'} \cdot V_{01} \cdot \Delta t, \quad t_{вых}^j = \frac{n_j}{n_j'} \cdot \Delta t,$$

где n_j - количество людей на j -том этаже, n_j' - пропускная способность j -того выхода, V_{01} - скорость движения через j -тый выход.

В любой n -тый момент времени $T = n \cdot \Delta t$ определяется начальное l_{min} и конечное l_{max} нахождение потока j -того этажа, т.е. интервал $[l_{min}, l_{max}]$, согласно следующей последовательности формул:

$$t^j = t_{min} + T_j - t_{min}^j, \quad t_{min} = \min \{t_{min}^1, t_{min}^2, \dots, t_{min}^j, \dots, t_{min}^N\},$$

$$l_{min} = V_{oj} \cdot t^j, \quad l_{max} = l_{min} + l_{nom}^j.$$

Если $l_{max} > l_{этажа}^j$, то $l_{max} := l_{этажа}^j$,

где t_{min} - время прибытия первых людей на лестничную клетку с этажей $j = 1, 2, \dots, N$, t_{min}^j - время прибытия первых людей с j -того этажа, V_{oj} - скорость движения на уровне j -того этажа, $l_{этажа}^j$ - высота j -того этажа.

Сравниваются интервалы $\Delta l_j = [l_{min}^j, l_{max}^j]$, $j = 1, 2, \dots, N$. Если интервалы Δl_j и Δl_i пересекаются ($\Delta l_j \cap \Delta l_i \neq \emptyset$), то выбирается $j = \max\{j, i\}$ и с j -того этажа пересчитывается ширина лестничной клетки по формуле (6). Затем пересекающиеся интервалы объединяются в один интервал $\Delta l_i = \Delta l_j \cup \Delta l_i$, и определяется количество людей, приходящихся на интервал длины Δl_k .

Проверка на пересечение интервалов (потоков людей) может осуществляться не в каждый момент времени Δt , а:

1) во время выхода первых людей с этажа, определяемое согласно следующей последовательности формул:

$$n = \frac{t_{min}^j - t_{max}^j}{\Delta t}, \quad T = n \cdot \Delta t,$$

2) когда поток достигает этажа, из которого не все люди вышли:

$$z_{этаж} \in [l_{min}^j, l_{max}^j], \quad j = 1, 2, \dots, N.$$

Моделирование движения людского потока осуществлено на следующем примере при помощи аппарата сетей Петри.

Рассмотрим 16-этажное здание. Расстояние между этажами, количество людей на каждом из этажей и время прибытия первой груп-

пы людей к лестничным клеткам приведены в таблице 1. Изменение разметки сети осуществлялось через промежутки времени $\Delta t = 0,5c$, а

$\Delta l_k = \left[V = 50 \frac{м}{мин} = 0,83 \frac{м}{с} \right] = 0,83 \frac{м}{с} \cdot 0,5c = 0,417м$. Ширина выходов из этажей $b_{j,1} = 1м$.

Определено время полного освобождения людьми лестничной клетки, количество лестничных клеток, а также их ширина.

Время полной эвакуации людей из каждого этажа рассчитано по предложенной методике и приведено в таблице 1.

Так, время выхода с шестнадцатого этажа составляет $\frac{104,983}{0,83} + 30 = 156,5c$, а с шестого этажа составит – 114,6с.

Время выхода с лестничной клетки $\max\{156,5; 114,6\} = 156,5c$.

Определена ширина лестничной клетки: между 16-ым и 15-ым этажами $b_{15} = b_{16} = \frac{3}{4 \cdot 0,417} = 1,8м$, а, начиная с 14-ого этажа, ширина лестничной клетки – 3.6 м. Полученная ширина лестничной клетки не соответствует существующим нормам. Следовательно, необходимо вводить, начиная с 14-ого этажа, еще одну дополнительную лестничную клетку шириной 1.8 м.

Результаты моделирования представлены в последнем столбце табл. 1.

Табл. 1 – Время выхода людей с этажей, рассчитанное по вышеизложенному алгоритму и данным таблицы

№ этажа j	Расстояние между j и $(j+1)$ этажами, м	Количество людей на этаже	Время t_j прибытия первой группы людей к лестницам, с	Время выхода всех людей с j -того этажа (с учетом t_j), с
1	7	18	20	31,4
2	7	20	21	41,3
3	7	26	22	51,8
4	7	16	15	51,7
5	7	17	16	61,2
6	7	50	30	114,6
7	7	60	15	83,0
8	7	60	15	90,94
9	7	60	15	99,37
10	7	60	15	107,81
11	7	60	15	116,24
12	7	60	15	124,67
13	7	60	15	133,12
14	7	12	16	135,99
15	7	60	15	151,47
16	10	12	16	156,5

Выводы. В данной работе представлен подход к моделированию движения людских потоков по лестничным клеткам с определением геометрических размеров трасс, исходя из особенностей движения потоков и норм проектирования. В дальнейшем предполагается проведение компьютерного моделирования движения людских потоков при полной эвакуации с обоснованием структуры путей, позволяющей осуществлять эвакуацию из высотных зданий за допустимое время.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев С.В. Эвакуация людей массового назначения / С.В. Беляев. – М., 1938.

2. Предтеченский В.М. О расчете движения людских потоков в зданиях массового назначения / В.М. Предтеченский // Архитектурно-строительное образование и научные основы проектирования. - М.: Стройиздат, 1983.

3. Холщевников В.В. Исследование людских потоков и методология нормирования эвакуации людей из зданий при пожаре / В.В. Холщевников. – М.: Мин-во образования РФ, МВД РФ, МГСУ, МИПБ, 1999. – 92 с.

4. Егоров А.А. Математические модели и алгоритмы эвакуации людей в аварийных ситуациях в учебных заведениях / А.А. Егоров: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Саратовский ГТУ – Саратов: 2008. – 19 с.

nuczu.edu.ua

В.В. Комяк, О.М. Соболев, А.Г. Коссе, Р.Г. Мелешенко

Підхід до моделювання руху людських потоків по сходових клітках у висотних будівлях

В роботі розроблено підхід до моделювання руху людських потоків по сходових клітках з визначенням структури та розмірів трас, що забезпечують їх безперешкодне переміщення.

Ключові слова: моделювання людських потоків, структура та розміри шляхів евакуації.

V.V. Komyak, A.N. Sobol, A.G. Kosse, R.G. Meleschenko

Approach to modeling the motion of human flows on the staircases in high-rise buildings

Approach to modeling the motion of human flows on the staircases with determination the structure and sizes of routes, which ensure their free motion, is developed.

Keywords: modeling of human flows, structure and sizes of evacuation routes.