

*В.В. Комяк, адъюнкт, НУГЗУ,  
А.Н. Данилин, преподаватель, НУГЗУ*

## **ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ В ЗДАНИЯХ И ИХ СРАВНЕНИЕ**

(представлено д-ром техн. наук Соболев А.Н.)

В работе рассмотрены подходы к моделированию движения людских потоков при эвакуации рассмотрением стационарного потока и сетей Петри. Проводится сравнение результатов моделирования.

**Ключевые слова:** моделирование движения людских потоков, стационарный поток, сети Петри.

**Постановка проблемы.** Проблема безопасности жизнедеятельности людей в высотных зданиях не достаточно решена. На сегодняшний день отсутствуют противопожарные нормы проектирования высотных зданий, проектирование осуществляется лишь по индивидуальным проектам.

Основной особенностью движения людских потоков в высотных зданиях является доминирование времени движения по лестничным клеткам при эвакуации, характерной чертой для которых является образование частей потоков с максимальной плотностью на выходах из этажей. Поэтому возникает актуальная задача об определении структуры и размеров путей эвакуационного движения потоков людей по лестничным клеткам, обеспечивающих беспрепятственное движение людей при нормированной плотности потока в рамках необходимого времени, рассчитываемого согласно ГОСТ-12-04-91 по пожарной нагрузке зданий.

**Анализ публикаций по теме исследования.** В работах [1, 2] на основе многочисленных экспериментальных данных получены оценки параметров движения людских потоков в различных зданиях, их коридорах, вестибюлях. Компьютерные имитационные модели эвакуации рассмотрены в [3].

Оценки эвакуационных планов связаны с использованием математического моделирования движения потоков людей внутри здания по сети коридоров и лестниц. В работе [4] предложен метод моделирования беспрепятственного движения потоков людей с нормированной плотностью потока [3], которая обеспечивается необходимым количеством и расчетными размерами путей движения, в рамках необходимого времени полной эвакуации из высотных зданий. Моделирование движения потоков людей в работе [4] осуществлено с помощью сетей Петри. Интерес представляет моделирование движения потоков людей другими методами с целью сравнения получаемых результатов.

**Постановка задачи.** В данной работе рассматривается следующая задача. Необходимо определить структуру путей эвакуационного движения потоков людей (минимальное количество лестниц и метрические характеристики путей движения), чтобы максимальное время полной эвакуации из любого этажа, неоднородно расположенных в здании людей, было минимальным и не превышало необходимого. Предлагается подход к ее решению, основанный на рассмотрении моделирования движения потока, как стационарного.

Пусть в здании  $N$  этажей с высотой уровня пола  $h_j, j=1, \dots, N$ . Пусть для каждой лестничной площадки известна таблица поступления людей (табл. 1).

**Табл. 1. Поступление первых людей на  $J$ -м этаже**

Время (с)	$t_{j1}$	$t_{j2}$	.....	$t_{j(n_j-1)}$	$t_{jn_j}$
Поступление людей (чел. /с)	$c_{j1}$	$c_{j2}$	.....	$c_{j(n_j-1)}$	0

В табл. 1  $t_{n_j}$  – время выхода всех людей  $J$ -го этажа,  $c_{j(n_j-1)}$  – пропускная способность  $(n_j - 1)$  выхода  $j$ -го этажа. В соответствии с таблицей, начиная с момента  $t_{jr}$  по  $t_{j(r+1)}$  на  $j$ -тую лестничную площадку поступит  $(t_{j(r+1)} - t_{jr})c_{jr}$  человек. Предполагается, что максимальная плотность потока эвакуируемых не должна превысить беспрепятственного для движения значения  $D_{\max}$ , которому соответствует скорость движения  $v$ .

Задача состоит в определении максимальной плотности потока на лестнице и поиске ширины  $w$  лестницы, обеспечивающей движение потока эвакуируемых со скоростью  $v$  и времени  $t^*$ , необходимого на выход всех людей.

Найдем  $\hat{t} = \max_{j=1,2,\dots,N} t_{jn_j}$ . Предположим, что высота  $h_1$  первого этажа

превышает величину  $\hat{t} \cdot v$  и что с начала эвакуации прошло  $\hat{t}$  единиц времени. Это означает, что все люди вышли на лестницу и сформировался стационарный поток, который будет перемещаться без изменений вниз по лестнице сколь угодно долго до достижения выхода.

Определим характеристики потока. При определении характеристик потока воспользуемся свойством его стационарности, а именно, независимостью его характеристик от высоты.

Предположим, что высота последнего этажа (до крыши) превышает  $\hat{t} \cdot v$ . Рассмотрим 1-ую лестничную площадку. С момента времени  $t_{11}$  по  $t_{12}$  на неё начнут поступать люди по  $c_{11}$  человек в секунду. Однако это эквивалентно тому, что с высоты  $h_1 + t_{11} \cdot v$  спускается поток длиной  $l_{11} = v \cdot (t_{12} - t_{11})$  с количеством людей  $C_{11} = c_{11} \cdot (t_{12} - t_{11})$  и плотностью

$D_{11} = \frac{C_{11}}{w \cdot l_{11}} = \frac{c_{11} \cdot (t_{12} - t_{11})}{w \cdot (t_{12} - t_{11}) \cdot v} = \frac{c_{11}}{w \cdot v}$ . С момента времени  $t_{12}$  по  $t_{13}$  на лестничную площадку начнут поступать люди по  $c_{12}$  человек в секунду, что эквивалентно тому, что с высоты  $h_1 + t_{12} \cdot v$  спускается поток длиной  $l_{12} = v \cdot (t_{13} - t_{12})$  с количеством людей  $C_{12} = c_{12} \cdot (t_{13} - t_{12})$  и плотностью  $D_{12} = \frac{c_{12}}{w \cdot v}$  и т.д. для всех групп людей и этажей. Таким образом, мы сформируем стационарный поток таким, каким он был бы в момент времени  $t = 0$  с момента начала эвакуации. Результаты могут быть представлены в виде табл. 2.

**Табл. 2. Вклад  $j$ -го этажа в плотность стационарного потока в нулевой момент времени**

Высота (м)	$H_{j1} = h_j + t_{j1} \cdot v$	$H_{j2} = h_j + t_{j2} \cdot v$	.....	$H_{j(n_j-1)} = h_j + t_{j(n_j-1)} \cdot v$	$H_{jn_j} = h_j + t_{jn_j} \cdot v$
Плотность (чел./м <sup>2</sup> )	$D_{j1} = \frac{c_{j1}}{w \cdot v}$	$D_{j2} = \frac{c_{j2}}{w \cdot v}$	.....	$D_{j(n_j-1)} = \frac{c_{j(n_j-1)}}{w \cdot v}$	0

Примем для упрощения расчетов ширину  $w$  равной 1. Время полной эвакуации можно сразу рассчитать как  $t^* = \max_{j=1,2,\dots,N} \left\{ \frac{h_j}{v} + t_{jn_j} \right\}$ , определим максимальную плотность потока (или ширину  $w^*$  лестницы, при которой максимальная плотность потока не превышает  $D_{\max}$ ). Для этого на основе табл. 2 сформируем табл. 3 изменения плотностей по формулам:  $\Delta_{j1} = D_{j1}$ ,  $\Delta_{jr} = D_{jr} - D_{j(r-1)}$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ ;  $r = 1, 2, \dots, n_j$ .

**Табл. 3. Распределение плотности потока, порождаемого  $j$ -м этажом, в стационарном потоке в нулевой момент времени**

Высота (м)	$H_{j1}$	$H_{j2}$	.....	$H_{j(n_j-1)}$	$H_{jn_j}$
Изменение плотности (чел./м <sup>2</sup> )	$\Delta_{j1} = D_{j1}$	$\Delta_{j2} = D_{j2} - D_{j1}$	.....	$\Delta_{j(n_j-1)} = D_{j(n_j-1)} - D_{j(n_j-2)}$	$\Delta_{jn_j} = D_{jn_j} - D_{j(n_j-1)}$

Объединим табл. 3 в одну табл. 4 и отсортируем столбцы по убыванию высот. Получится таблица с  $K = \sum_{j=1}^N n_j$  столбцами вида

**Табл. 4. Изменение плотности стационарного потока в нулевой момент времени**

Высота (м)	$H_1 = t^* \cdot v$	$H_2$	.....	$H_{K-1}$	$H_K$
Изменение плотности (чел./м <sup>2</sup> )	$\Delta_1$	$\Delta_2$	.....	$\Delta_{K-1}$	$\Delta_K$
Этаж	$j_1$	$j_2$		$j_{K-1}$	$j_K$

Плотность стационарного потока на высоте  $H_m$  составляет  $D_m = \sum_{i=1}^m \Delta_i$ , так что на основе табл. 4 построим табл. 5 плотностей стационарного потока в нулевой момент времени.

**Табл. 5. Распределение плотности стационарного потока в нулевой момент времени**

Высота (м.)	$H_1$	$H_2$	.....	$H_{K-1}$	$H_K$
Плотность (чел./м <sup>2</sup> )	$D_1 = \Delta_1$	$D_2 = \Delta_1 + \Delta_2$	.....	$D_{K-1} = \sum_{m=1}^{K-1} \Delta_m$	0
Этаж	$j_1$	$j_2$		$j_{K-1}$	$j_K$

При этом  $D_k = \sum_{m=1}^K \Delta_m = 0$ , что соответствует нулевой плотности потока перед первой группой людей на лестнице. Следует отметить, что высоты  $H_m$  не являются реальными высотами, так как относятся к гипотетическому положению стационарного потока в нулевой момент времени. Для определения реальной высоты, на которой достигается плотность  $D_m$ , следует взять высоту  $h_{j_m}$  соответствующего этажа. Таким образом, максимальная плотность стационарного потока при ширине лестницы 1 м равна  $D^* = \max_{m=1,2,\dots,K} \{D_m\}$ . Следовательно, можно

определить ширину лестницы, как  $w_{\max} = \frac{D^*}{D_{\max}}$  или  $D_{\max} = \frac{D^*}{w}$ .

По изложенному выше подходу осуществлено моделирование движения людей моделированием стационарного потока с помощью комплекса программ, написанного на языке C++ в среде Visual C. Моделирование осуществлялось для 16-ти этажного здания при скорости движения  $50 \frac{м}{мин}$  по данным табл. 6, в которой приведено расстояние между этажами, количество людей на каждом из этажей, время прибытия первых людей с этажей на лестничную площадку. Время полной эвакуации составило 148.95 с, а максимальная ширина лестницы составила 5.42 м.

В табл. 6 также сведены результаты моделирования по сетям Петри при ширине выходов из этажей  $b_{j,1} = 1м$  и скорости движения  $50 \frac{м}{мин}$ . В результате моделирования с помощью сетей Петри определено время выхода всех людей с этажей, а также время выхода людей из здания, которое составило 148. 205 с.

Табл. 6. Время выхода людей с этажей для лучшей последовательности этажей

№ этажа $j$	Расстояние до $j$ этажа по лестнице	Количество людей на этаже	Время $t_j$ прибытия первых людей к лестницам, с	Время выхода всех людей с $j$ -го этажа (с учетом $t_j$ ), с	Ширина лестницы, м
6	0	50	30	36,67	5,4
7	7	60	15	31,74	3,6
8	14	60	15	40,14	3,6
9	21	60	15	48,54	3,6
10	28	60	15	57,07	3,6
11	35	60	15	66,009	3,6
12	42	60	15	73,94	3,6
13	49	60	15	82,376	3,6
15	56	60	15	90,809	3,6
14	63	12	16	93,576	3,6
16	70	12	16	102,005	1,8
1	80	18	20	118,885	1,8
2	87	20	21	128,319	1,8
3	94	26	22	139,003	1,8
4	101	16	15	138,77	1,8
5	108	17	16	148,205	1,8

Таким образом, сравнивая два подхода моделирования движения людских потоков (в виде стационарного потока и по сетям Петри), определены: абсолютная ошибка – 0.745с. и относительная – 0.005 при определении времени эвакуации и абсолютная ошибка – 0.02м, относительная – 0.0037 при определении ширины трассы движения.

**Выводы.** Исходя из сделанных расчетов и существующих норм строительства [5], можно сделать следующие рекомендации: необходимо вводить 2 лестницы шириной 1.8м или одну – с рекомендованной шириной 3.6м, а на первом этаже расширять выход до 5.4 м.

## 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. – 211с.

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

4. Комяк В.В. Об одном подходе к моделированию движения людских потоков по лестничным клеткам в высотных зданиях / В.В.Комяк , А.Н.Соболь, А.Г.Коссе // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Харьков: АО “Фолио”, 2013. – Вип.33. – С.75-81.

5. Проектування висотних житлових і громадських будинків: ДБН В.2.2-24:2009. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 105с.

В.В. Комяк, О.М. Данілін

**Підходи до моделювання руху людських потоків в будівлях та їх порівняння**

В роботі розглядаються підходи до моделювання руху людських потоків розгляданням стаціонарного потоку та сітей Петрі. Проводиться порівняння результатів моделювання.

**Ключові слова:** моделювання людських потоків, стаціонарний потік, сіті Петрі.

V. Komyak, A. Danilin

**Approaches to the simulation of the motion of human flows in the building and their comparison**

Work examines approaches to the simulation of the motion of human flows during the evacuation by the examination of stationary flow and networks of Petry. The comparison of the results of the simulation is conducted.

**Keywords:** the simulation of human flows, stationary flow, the network of Petry.