

Фан Ань, Д.А. Самошин (Россия, Вьетнам)
(Академия ГПС МЧС России; e-mail: phananht34@gmail.com)

ПАРАМЕТРЫ ПОТОКОВ ЭВАКУИРОВАННЫХ ИЗ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ ЛЮДЕЙ ПРИ ПОЖАРАХ ВО ВЬЕТНАМЕ

Анализируются результаты натурных наблюдений и экспериментов по эвакуации людей из жилых зданий при пожарах во Вьетнаме. Определены параметры движения людского потока.

Ключевые слова: пожарная безопасность, эвакуация, людской поток, жилые здания.

Phan Anh, D.A. Samoshin (Russia, Vietnam)
**PARAMETERS OF PEOPLE EVACUATION FLOW
FROM RESIDENTIAL BUILDINGS
IN CASE OF FIRE IN VIETNAM**

Analyze of results of field observations and experiments on the evacuation of buildings in case of fire in Vietnam was carried out. The parameters of movement of a people flow are determined.

Key words: fire safety, fire evacuation, people flow, residential buildings.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 9 ноября 2016 г.

Введение

В последние годы в России были проведены работы по оценке параметров эвакуации при пожарах детей дошкольного возраста [1], беременных женщин [2], инвалидов различного возраста [3, 4] и пожилых людей [5] из учебных и медицинских учреждений, а также учреждений социальной защиты. Однако, все эти группы людей могут находиться совместно и одновременно в многоквартирных жилых зданиях. Несмотря на это, а также на постоянную гибель людей при пожарах в зданиях этого класса функциональной пожарной опасности, в России исследований процесса эвакуации людей из жилых зданий при пожарах проведено не было, хотя иным аспектам безопасности жилых зданий уделяется значительное внимание [6]. За рубежом ситуация в целом сходная – публикуются, например, данные о влиянии социально-экономических причин и вредных привычек на риск гибели людей при пожарах [7, 8] и о роли систем пожарной автоматики в повышении пожарной безопасности людей [9]. Однако, лишь в нескольких работах приводятся данные о скоростях движения людей при эвакуации и только для допороговых (без учёта влияния плотности) значениях скоростей.

Это позволяет говорить об отсутствии обоснованных данных для нормирования процесса эвакуации людей как во Вьетнаме, так и в других странах мира.

Методика исследований

В период с 2012 г. по 2015 г. были проведены натурные наблюдения и эксперименты по эвакуации людей из жилых зданий в различных городах Вьетнама. Целью их проведения было определение зависимостей между скоростью движения людских потоков и их плотностью на разных участках пути (горизонтальный путь, лестницы вверх и вниз, а также через проёмы).

Для получения эмпирических данных о параметрах движения использовался метод видеонаблюдения, впервые апробированный ещё в 1988 г. году при исследованиях людских потоков на станциях метрополитена. Одним из последних примеров успешного применения данного метода было использование его в экспериментах по эвакуации беременных женщин и детей с ограниченными возможностями здоровья [2, 3].

Перед началом эксперимента на исследуемых участках пути устанавливались видеокамеры так, чтобы их оптическая ось была направлена вертикально вниз. Для фиксирования параметров движения людского потока по исследуемым участкам пути, перед началом видеосъёмки устанавливалась объёмная масштабная сетка с размером ячеек 1×1 м. Снимался контрольный видеокادر, фиксирующий размеры участка и масштабную сетку, после чего масштабная сетка убиралась. После проведения всех подготовительных этапов, группу людей просили пройти с максимально возможной скоростью по исследуемым участкам пути.

По окончании эксперимента проводились анализ видеозаписей и формирование статистической совокупности полученных данных. Обработка данных проводилась на компьютере в следующем порядке:

1) включалась отснятая видеозапись;

2) после того как масштабная сетка, снятая заранее на уровне головы людей, попадала в обзор камеры, видео останавливали и наносили на монитор компьютера её контур. Имея на мониторе построенную масштабную сетку, продолжался просмотр отснятого видео. После того, как человек попадал на границу первого квадрата масштабной сетки, подсчитывалось количество людей в ячейке перед ним (рис. 1): так определялась плотность потока D , выраженная в $чел./м^2$, с которой наблюдаемый человек проходил расстояние $\Delta l = 1$ м за определённое количество кадров (так определялось Δt). Скорость движения человека V (м/мин.) за n кадров наблюдения за ним определялась по формуле:

$$V = \sum_1^n \Delta l \cdot 60 / \sum_1^n \Delta t. \quad (1)$$

Так продолжают до выхода наблюдаемого человека из зоны наблюдения. Таким же образом прослеживаются передвижения следующего наблюдаемого человека.

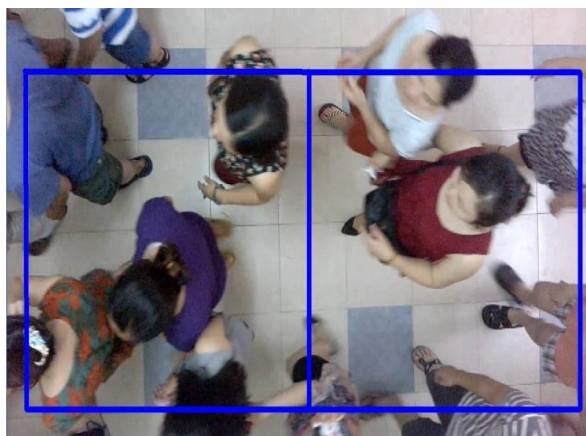


Рис. 1. Фрагмент анализа видеозаписи натурного эксперимента при передвижении людского потока

Скорость движения человека через проём замерить таким же образом невозможно, поскольку длина участка пути в проёме невелика. Поэтому при движении через проём подсчитывалось количество людей $N_{\Delta t}$, проходящих через него за определённый интервал времени Δt . Величина Δt определялась продолжительностью существования перед границей проёма конкретного значения плотности D_i (рис. 2).

Имея значение $N_{\Delta t}$, определялась интенсивность движения q_D (чел./м·мин.) через проём шириной δ (м) при наблюдаемой в течение интервала времени Δt плотности потока D_i перед ним:

$$q_D = N_{\Delta t} / (\delta \cdot \Delta t). \quad (2)$$

Затем определялась скорость V_D (м/мин.) перехода людей через границу проёма при плотности D_i :

$$V_D = q_D / D_i. \quad (3)$$



Рис. 2. Фрагмент анализа видеозаписи натурного эксперимента по передвижению людского потока через проём

Построение зависимостей между параметрами людского потока

В результате экспериментальной работы удалось получить 1550 значений скорости движения людей по различным видам пути. Для каждой выборки было определено среднее арифметическое значение скорости движения людей (\bar{X}) по формуле (4):

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (4)$$

где n – число замеров;

x_i – рассматриваемый параметр скорости в выборке.

Далее были установлены данные, характеризующие степень отклонения значений скорости от центра распределения (среднеквадратическое отклонение σ , дисперсия S^2):

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}, \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{S^2}. \quad (6)$$

Для определения необходимой численности замеров скорости движения людей (n), которая позволит получить достоверные данные с заданной доверительной вероятностью $P = 0,95$, была использована следующая формула:

$$n = \frac{(x \cdot v)^2}{\varepsilon^2}, \quad (7)$$

где x – коэффициент доверительной вероятности $P(x)$, для $P(0,95) = 1,96$;

v – значение меры изменчивости $v = (\sigma / \bar{X}) \cdot 100\%$, представляющее собой выраженное в % отношение среднеквадратического отклонения (σ) выборки к среднему арифметическому значению (\bar{X}); ε – показатель точности исследования, равный допустимой ошибке, не превышающей 3-5 %.

В результате установлено, что полученных замеров скорости в ходе экспериментальной работы достаточно для проведения дальнейшей статистической обработки (табл. 1).

Таблица 1

Количество замеров скорости движения людей по различным видам пути

Количество замеров	Вид пути				Общее
	Горизонтальный	Лестница вверх	Лестница вниз	Дверной проём	
Фактическое	515	405	280	350	1550
Требуемое	481	354	272	325	1432

В теории движения людских потоков изменения скорости людского потока V от плотности D определяется регрессионной зависимостью, построенной с использованием законов психофизики. С этой целью, по результатам экспериментальных данных по методике, разработанной проф. В.В. Холщевниковым [10], строилась эмпирическая функция $R_D = f(D)$, которая определялась из выражения

$$R_D = \frac{V_D - V_0}{V_0}, \quad (8)$$

где V_0 – скорость свободного движения людей, м/мин.;

V_D – скорость движения людского потока при влиянии плотности, м/мин.;

Полученная зависимость аппроксимировалась теоретической зависимостью логарифмического вида на основе психофизического закона Вебера-Фехнера:

$$R_D = a \ln \frac{D}{D_0}. \quad (9)$$

В результате для теоретического описания влияния плотности потока на скорость движения была использована закономерность, установленная в исследовании [10]:

$$V_{D,j}^{\text{Э}} = V_{0,j}^{\text{Э}} \left(1 - a_j \ln \frac{D_i}{D_{0j}} \right), \quad (10)$$

где V_{0j} – случайная величина скорости свободного движения (при отсутствии влияния окружающих людей: $D_j < D_{0j}$), зависящая от вида пути j и уровня эмоционального состояния (индекс "Э") людей;

D_{0j} – пороговое значение плотности, по достижении которого плотность становится фактором, оказывающим влияние на скорость движения людей в потоке;

a_j – коэффициент, отражающий влияние вида пути.

Конкретные значения входящих в (10) величин a_j и D_{0j} , определённых в результате аппроксимации эмпирических значений методом наименьших квадратов, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения a_j и D_{0j} при движении людей по различным видам пути

Параметры	Значения параметров по видам пути (j)			
	Горизонтальный	Лестница вниз	Лестница вверх	Дверной проём
a_j	0,382	0,358	0,325	0,301
$D_{0,j}$, чел./м ²	0,78	0,76	0,76	0,62

Значения теоретического корреляционного отношения η_T (табл. 3), вычисляемые для оценки тесноты установленной связи между скоростью и плотностью потока, характеризуют её как практически функциональную ($\eta_T = 1$).

Значения теоретического корреляционного отношения η_T при движении людей разных групп мобильности по различным видам пути

Теоретическое корреляционное отношение	Вид пути			
	Горизонтальный	Лестница вниз	Лестница вверх	Дверной проём
η_T	0,996	0,999	0,999	0,999

Высокие значения η_T свидетельствуют о наличии сильной корреляционной связи между скоростью движения и плотностью потока людей.

Вместе с тем по установленной методике [10] определены зависимости скорости движения людских потоков от степени психологической напряженности, выраженной показателем отрицательного эмоционального состояния (Ξ).

С этой целью были выбраны значения V_n , превышающие $\bar{V} + 2\sigma$, где \bar{V} – математическое ожидание скоростей в выборке, м/мин.; σ – стандартное квадратическое отклонение, м/мин.:

$$V_n > \bar{V} + 2\sigma. \quad (11)$$

Затем была определена эмпирическая вероятность крайних членов выборки $P(V_n)$:

$$P(V_n) = \frac{n}{\sum n+1}, \quad (12)$$

где n – порядковый номер скорости, табл. 4-6.

Таблица 4

Данные для определения максимальных скоростей движения людей по горизонтальному пути через проёмы

n	$V_n, \text{ м/мин.}$	$P(V_n)$	X_n
1	144,26	0,250	-0,32665
2	147,29	0,500	0,366495
3	151,14	0,750	1,245882

Таблица 5

Данные для определения максимальных скоростей движения людей по лестнице вверх

n	$V_n, \text{ м/мин.}$	$P(V_n)$	X_n
1	68,21	0,250	-0,32665
2	70,87	0,500	0,36650
3	75,87	0,750	1,24588

Таблица 6

Данные для определения максимальных скоростей движения людей по лестнице вниз

n	$V_n, \text{ м/мин.}$	$P(V_n)$	X_n
1	113,12	0,111	-0,78721
2	115,00	0,222	-0,40820
3	116,64	0,333	-0,09407
4	120,64	0,444	0,20956
5	121,66	0,556	0,53137
6	123,64	0,667	0,90270
7	125,00	0,778	1,38103
8	130,00	0,889	2,13889

Промежуточные уравнения, описывающие процесс изменений скорости свободного движения людей $V_0^{\mathcal{E}}$ в зависимости от вероятности их движения $P(V_n)$ с максимальной скоростью по горизонтальным участкам пути и через проёмы (15), а также по лестницам вверх (16) и лестницам вниз (17):

$$V_0^{\mathcal{E}} = 71,02 - 2,19 \ln(-\lg P(V_n)); \quad (15)$$

$$V_0^{\mathcal{E}} = 35,07 - 2,50 \ln(-\lg P(V_n)); \quad (16)$$

$$V_0^{\mathcal{E}} = 56,57 - 2,86 \ln(-\lg P(V_n)). \quad (17)$$

Закон о невозможности превышения максимальным членом выборки её удвоенного среднего значения позволяет перейти от максимальных значений к средним и связать $V_0^{\mathcal{E}}$ с теоретическим значением $P(V_n)$.

Принимая, что $P(V_n) = 0,999$ при $\mathcal{E} = 0,7$ и $P(V_n) = 0,1$ при $\mathcal{E} = 0$ позволяет установить закономерность, связывающую скорость свободного движения и эмоциональное состояние людей для горизонтального пути, дверного проёма и лестницы вниз и вверх (рис. 3).

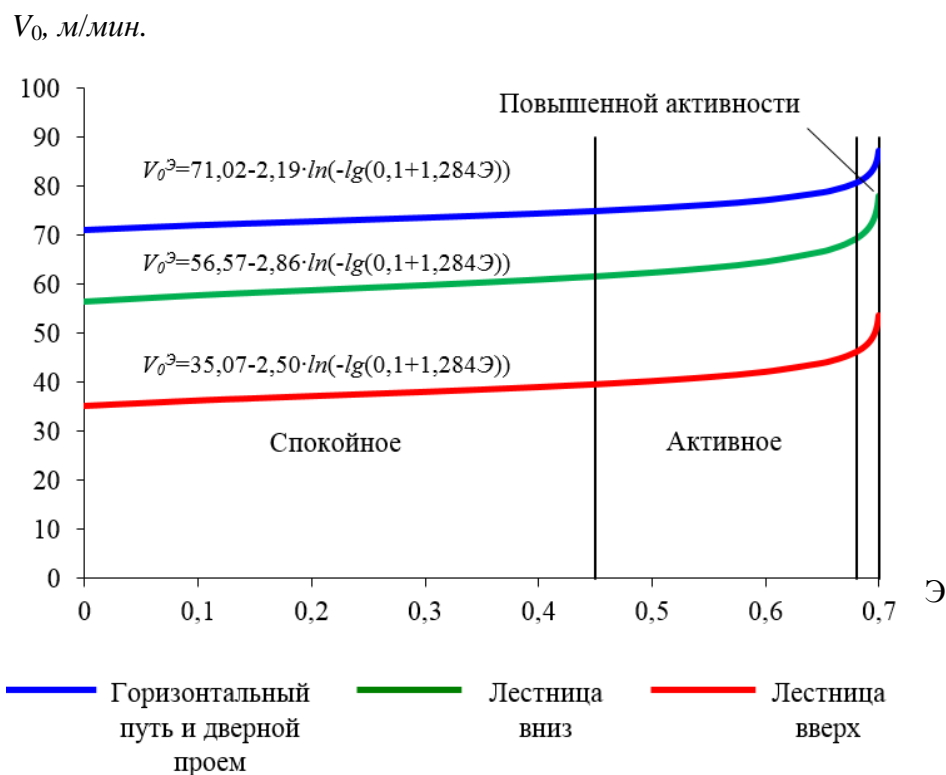


Рис. 3. Зависимость скорости свободного движения людей от степени психологической напряженности ситуации

В табл. 7 представлены скорости свободного движения для различных категорий движения людей по различным участкам пути в жилых зданиях.

**Скорости свободного движения людей по различным видам пути
в установленных категориях движения**

Категория движения	Скорость свободного движения людей V_0 , м/мин. на различных участках пути		
	Горизонтальные пути, проёмы	Лестницы вверх	Лестницы вниз
Комфортное	< 71,02	< 35,08	< 56,57
Спокойное	71,02-74,91	35,08-39,50	56,57-61,67
Активное	74,91-80,72	39,50-46,14	61,67-69,32
Повышенная активность	80,72-87,82	46,14-53,67	69,32-78,00

Для расчёта времени эвакуации людей из жилых зданий следует принимать средние значения из диапазона "Повышенная активность", то есть $V_0 = 84,27$ м/мин. – для горизонтальных путей и дверных проёмов; $V_0 = 49,91$ м/мин. – для лестниц вверх; $V_0 = 73,66$ м/мин. – для лестниц вниз.

Заключение

Настоящая работа является первым исследованием параметров движения людских потоков в зданиях класса Ф1.3 – многоквартирных жилых домах, проведённым на основании фактического материала, полученного во Вьетнаме. В ходе проведенных исследований определены все значения параметров, описывающих закономерности движения людских потоков по разным видам пути, при любой из возможных категорий их движения. Полученные результаты позволят повысить точность расчётных оценок безопасности людей при пожаре, а также обоснованно нормировать размеры эвакуационных путей и выходов в жилых зданиях.

Литература

1. *Парфененко А.П.* Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в зданиях детских дошкольных образовательных учреждений: дис. ... канд. техн. наук. М.: Академия ГПС МЧС России, 2012.
2. *Хасуева З.С., Самошин Д.А., Фан А.* Влияние эмоционального состояния беременных женщин на скорость их движения при эвакуации в случае пожара // Технологии техносферной безопасности. Вып. 4 (68). 2016. 10 с. <http://ipb.mos.ru/ttb/2016-4>.
3. *Слюсарев С.В., Самошин Д.А.* Параметры движения маломобильных детей для определения расчётного времени эвакуации из зданий с их массовым пребыванием // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25, № 4. С. 43-55.
4. *Самошин Д.А.* Состав людских потоков и параметры их движения при эвакуации: монография. М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. 210 с.
5. *Истратов Р.Н.* Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в стационарах социальных учреждений по обслуживанию граждан пожилого возраста: дис. ... канд. техн. наук. М.: Академия ГПС МЧС России, 2014.
6. *Соколов С.В., Костюченко Д.В.* Эффективность средств пожарной автоматики на пожарах в жилых домах // Пожаровзрывобезопасность. 2014. № 6. С.70-75.
7. *Hastie C., Searle R.* Socio-economic and demographic predictors of accidental dwelling fire rates // Fire Safety Journal. Vol. 84. August 2016. Pp. 50-56.
8. *Holborna P.G., Nolana P.F., Golib J.* An analysis of fatal unintentional dwelling fires investigated by London Fire Brigade between 1996 and 2000 // Fire Safety Journal. Vol. 38. Issue 1. February 2003. Pp. 1-42.
9. *He Y., Nelson D.* A Comparative Study of Effectiveness of Smoke Alarms in Two Types of Buildings // Journal of Fire Sciences. September 2008. Vol. 26, 5. Pp. 415-434.
10. *Холщевников В.В.* Людские потоки в зданиях, сооружениях и на территории их комплексов: дис. ... д-ра техн. наук. М.: МИСИ, 1983.