

С.В. Слюсарев

(Академия ГПС МЧС России; e-mail: slyusarev91@inbox.ru)

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКОВ МАЛОМОБИЛЬНЫХ ДЕТЕЙ (часть 2)

Анализируются особенности процесса обработки эмпирических данных, характеризующих параметры движения маломобильных детей, в интересах оценки пожарного риска и установки нормативных требований к эвакуационным путям и выходам из зданий с их массовым пребыванием.

Ключевые слова: эвакуация, маломобильные дети, математическая статистика.

S.V. Slyusarev

PROCESSING OF RESULTS OF MEASUREMENTS OF PARAMETERS THE MOVEMENTS OF FLOWS OF CHILDREN WITH LIMITED MOBILITY (part 2)

It analyzed feature of processing of empirical data characterizing movement parameters of children with limited mobility, in the interest of assessment of fire risk and installation of standard requirements to evacuation ways and exits in buildings with their mass stay.

Key words: evacuation, children with limited mobility, mathematical statistics.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 14 ноября 2015 г.

Определение зависимости скорости движения маломобильных детей от плотности людского потока

В теории движения людских потоков зависимость скорости движения V от плотности D описывается в общем случае формулой (1):

$$V_{Dj} = V_{0j} \cdot (1 - R_j), \quad (1)$$

где V_{0j} – случайная величина скорости свободного движения людского потока по j -му виду пути, когда значение плотности не оказывает на неё влияние, м/мин.

Функция R_j , входящая в данное уравнение, отображает степень (силу) влияния внешнего фактора на сенсорную систему человека, формирующую интенсивность его реакции (в данном случае – скорости движения).

Для определения вида этой зависимости при движении маломобильных детей необходимо было выявить тип зависимости $R_j = f(D)$. С этой целью по результатам экспериментальных данных строились эмпирические функции $\bar{R}_{Dj} = f(D)$ для каждого интервала плотности, вида пути и типа инвалидности детей по формуле (2):

$$\bar{R}_{Dj} = \frac{\Delta V_{Dj}}{V_{0j}} = \frac{m(V_{0j}) - m(V_{Dj})}{m(V_{0j})}, \quad (2)$$

где $m(V_{0j})$ – математическое ожидание скорости свободного движения в интервале плотности 0-1 чел./м²;

$m(V_{Dj})$ – математическое ожидание скорости в интервале плотности, где определяется степень влияния внешнего фактора на сенсорную систему человека.

После чего проводилась аппроксимация полученных эмпирических зависимостей, в качестве теоретической зависимости принималась функция $R_{Dj}^T = f(D)$, описываемая логарифмическим выражением ранее установленного вида [1] на основе психофизического закона Вебера-Фехнера (3):

$$R_{Dj}^T = a_j \ln(D_i / D_{0j}), \quad (3)$$

где D_i – значение плотности людского потока, при котором определяется значение R_{Dj}^T ;

D_{0j} – пороговое значение плотности, по достижении которого она начинает ощущаться как воздействующий фактор при движении по j -му виду пути;

a_j – эмпирический коэффициент, отображающий интенсивность воздействия плотности при движении по j -му виду пути.

Значения коэффициента a_j и величины D_{0j} определялись методом средних и методом наименьших квадратов с использованием программного обеспечения *Microsoft Excel*. О корректности проведённой аппроксимации свидетельствует нахождение теоретической кривой в 95 %-доверительном интервале, а также максимальное отклонение теоретических значений R_{Dj}^T от эмпирических \bar{R}_{Dj} , не превышающее 10 %.

Результаты выполненной аппроксимации $R_j = f(D)$ на примере умственно-отсталых детей при движении по горизонтальным участкам и через проём представлены в табл. 1, 2 и проиллюстрированы на рис. 1, 2. Значения коэффициентов a_j , D_{0j} приведены в табл. 3.

Таблица 1

Тип детей: умственно-отсталые дети		Значение функции R при средних интервалах плотности D в интервалах её измерения:					
		1-2 чел./м ²	2-3 чел./м ²	3-4 чел./м ²	4-5 чел./м ²	5-6 чел./м ²	6-7 чел./м ²
Среднее значение \bar{R}_D		0,227	0,359	0,473	0,564	0,614	0,686
Среднеквадратичное отклонение		0,270	0,229	0,188	0,181	0,040	0,036
Доверительный 95 %-й интервал для среднего	Нижняя граница	0,181	0,315	0,427	0,480	0,586	0,651
	Верхняя граница	0,274	0,404	0,520	0,651	0,642	0,722
Теоретические значения		0,215	0,375	0,480	0,559	0,622	0,674
Расхождение $\Delta_D = R_T - \bar{R}_D$		-0,012	0,016	0,007	-0,005	0,008	-0,012
$\Delta_D / \bar{R}_D \cdot 100\%$		-5,286	4,457	1,480	-0,887	1,303	-1,749
Теоретическое корреляционное отношение η_T		0,997					

Таблица 2

Интервал плотности D , чел./м ²	Эмпирические значения \bar{R}_D					Теоретические значения	$\Delta_D / \bar{R}_D \cdot 100\%$
	Средние эмпирические значения \bar{R}_D	\bar{R}_D - 5 %	\bar{R}_D + 5 %	\bar{R}_D - 10 %	\bar{R}_D + 10 %		
2-3	0,247	0,235	0,259	0,222	0,272	0,232	-6,073
3-4	0,420	0,399	0,441	0,378	0,462	0,379	-9,762
4-5	0,438	0,416	0,460	0,394	0,482	0,476	8,676
5-6	0,514	0,488	0,540	0,463	0,565	0,549	6,809
6-7	0,571	0,542	0,600	0,514	0,628	0,607	6,305
7-8	0,628	0,597	0,659	0,565	0,691	0,655	4,299
8-9	0,724	0,688	0,760	0,652	0,796	0,696	-3,867
9-10	0,785	0,746	0,824	0,707	0,864	0,732	-6,752
Теоретическое корреляционное отношение η_T		0,976					

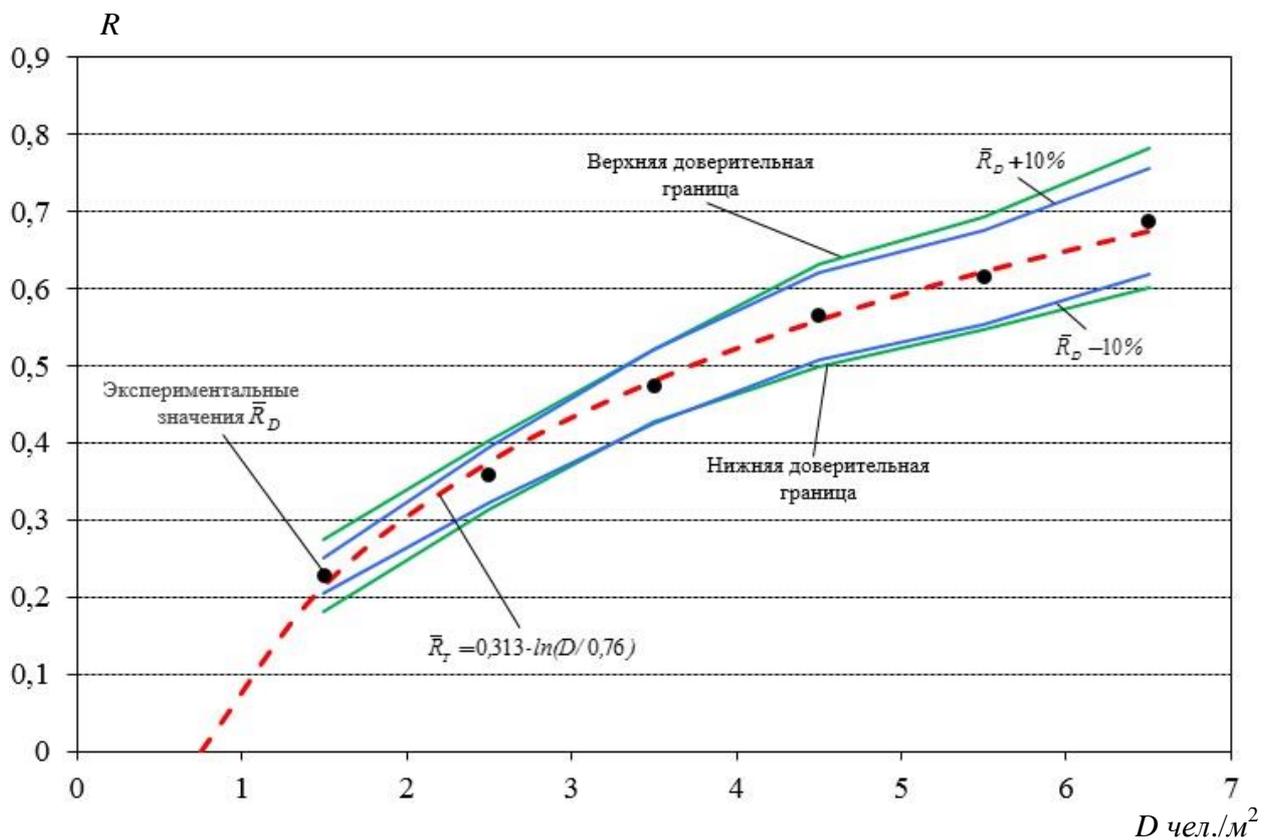


Рис. 1. Аппроксимация зависимости $R = f(D)$ для умственно-отсталых детей при движении по горизонтальным участкам пути

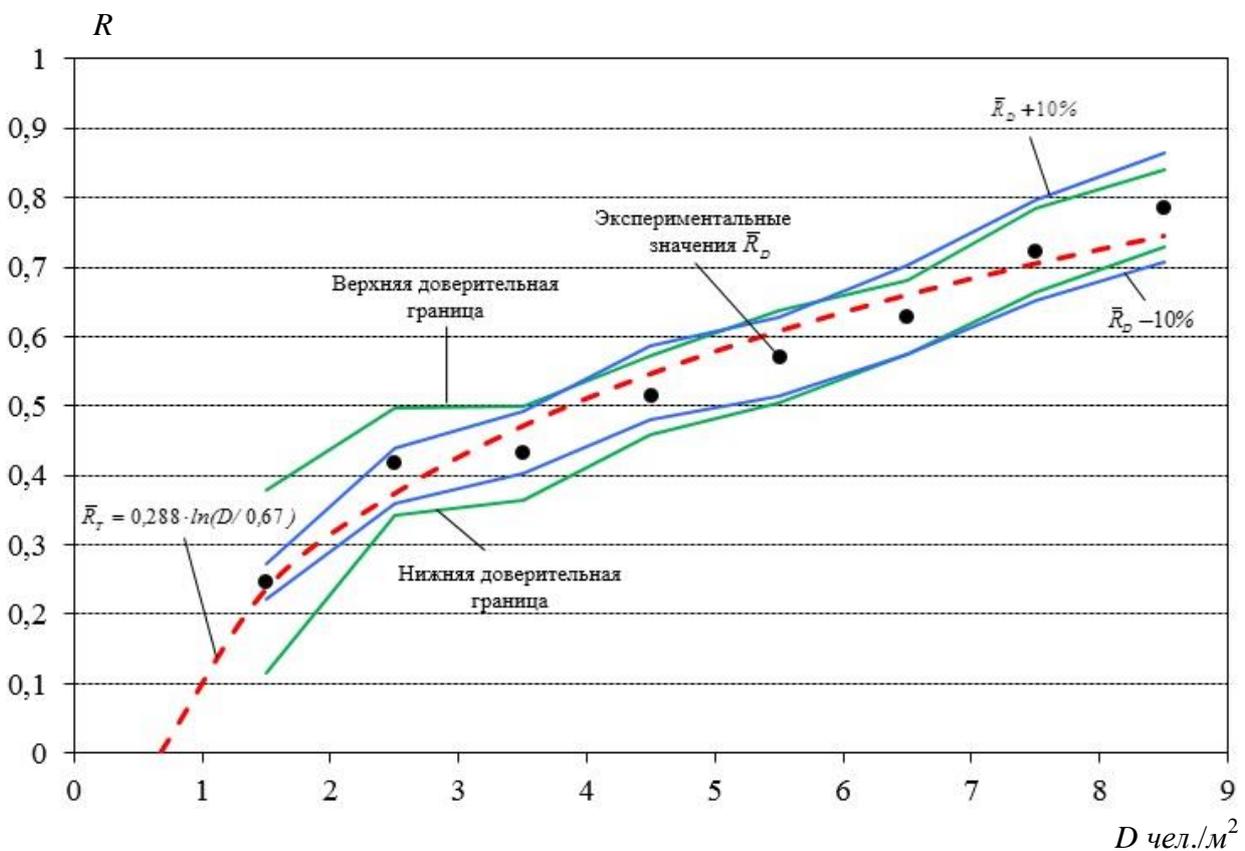


Рис. 2. Аппроксимация зависимости $R = f(D)$ для умственно-отсталых детей при движении через проёмы

Таблица 3

Вид пути	Группы маломобильных детей	a_j	D_{0j} , чел./м ²
Горизонтальный	Умственно-отсталые	0,313	0,76
	С поражением опорно-двигательного аппарата	0,329	0,79
	С нарушениями зрения	0,291	0,78
	С нарушениями слуха	0,271	0,67
Лестница вверх	Умственно-отсталые	0,343	0,75
	С поражением опорно-двигательного аппарата	0,343	0,69
	С нарушениями зрения	0,295	0,69
	С нарушениями слуха	0,345	0,74
Лестница вниз	Умственно-отсталые	0,295	0,69
	С поражением опорно-двигательного аппарата	0,247	0,75
	С нарушениями зрения	0,282	0,75
	С нарушениями слуха	0,246	0,69
Дверной проём	Умственно-отсталые	0,288	0,67
	С поражением опорно-двигательного аппарата	0,342	0,88
	С нарушениями зрения	0,430	0,96
	С нарушениями слуха	0,347	0,95

Для оценки степени влияния факторного признака (D) на вариацию результативного признака (R_j) (то есть измерение тесноты связи между ними) определялось корреляционное отношение по формуле (4):

$$\eta = \sqrt{\frac{\sigma^2_{R_{D_j}^T}}{\sigma^2_{\bar{R}_{D_j}}}}, \quad (4)$$

где $\sigma^2_{R_{D_j}^T}$ – дисперсия, установленная для теоретических значений $R_{D_j}^T$;

$\sigma^2_{\bar{R}_{D_j}}$ – дисперсия, установленная для эмпирических значений \bar{R}_{D_j} .

Высокие значения теоретического корреляционного отношения, представленные в таблицах для всех видов пути ($\eta_T \geq 0,95$), определяют установленную связь практически как функциональную ($\eta_T = 1$), что свидетельствует о наличии сильной корреляционной связи между скоростью движения маломобильных детей и их плотностью.

Определение зависимости скорости движения маломобильных детей от их эмоционального состояния

При определении зависимости скорости V_{0j} свободного движения маломобильных детей от степени психологической напряжённости, выраженной показателем отрицательного эмоционального состояния (\mathcal{E}), использовалась статистическая теория распределения крайних членов выборки [2], которая нашла своё применение в теории людских потоков [1, 3, 4].

Отбор максимальных значений V_n из выборочных совокупностей в интервале плотности $D = 0-1(\text{чел./м}^2)$ проводился из условия $V_n > \bar{V} + 1,5\sigma$, где \bar{V} – математическое ожидание скоростей в выборке, м/мин.; σ – стандартное отклонение.

Такой отбор показал, что у детей с поражением опорно-двигательного аппарата, с нарушениями зрения, а также умственно-отсталых таких значений скоростей нет. Исключением являются дети с нарушениями слуха, поэтому для них необходимо было построить эмпирические распределения максимальных скоростей движения и соответствующих им вероятностей.

С этой целью предварительно проводилась оценка однородности математических ожиданий скоростей свободного движения таких детей для различных видов пути, в зависимости от объёма выборки, по формуле (5), при числе вариантов более 30 и по формуле (6) – менее 30:

$$T_{\text{наб}} = \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}; \quad (5)$$

$$T_{\text{наб}} = \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{\sqrt{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}. \quad (6)$$

Для сравнения значений дисперсий анализируемых выборочных совокупностей использовался критерий Фишера (F -критерий) (табл. 4).

Таблица 4

Вид пути	ГП + ДП		ДП + ЛВВ		ЛВВ + ЛВН		ГП + ЛВВ		ЛВН + ГП		ДП + ЛВН	
Наименование критериев												
Сравнение мат. ожидания $m(V_0)$	$T_{\text{наб}}$	$T_{\text{кр}}$	$T_{\text{наб}}$	$T_{\text{кр}}$	$T_{\text{наб}}$	$T_{\text{кр}}$	$T_{\text{наб}}$	$T_{\text{кр}}$	$Z_{\text{наб}}$	$Z_{\text{кр}}$	$T_{\text{наб}}$	$T_{\text{кр}}$
	1,24	1,98	0,65	2,03	3,71	1,98	1,81	1,99	9,34	2,58	5,30	1,97
Наименование критериев												
Сравнение дисперсий $S^2(V_0)$	$F_{\text{набл}}$	$F_{\text{кр}}$										
	1,12	1,66	1,51	2,42	1,12	1,88	1,35	2,21	1,51	1,34	1,69	1,66

Данные табл. 4 позволяют определить, что при объединении выборок по горизонтальным путям, через дверные проёмы, а также по лестницам вверх наблюдаемые параметры критериев не превышают критических, подтверждая гипотезу об их однородности. Исключением являются лестницы вниз, в которых различия между выборочными совокупностями с другими видами пути оказались существенными.

В соответствии с разработанной проф. В. В. Холщевниковым методологией оценки влияния эмоционального состояния людей на скорость движения [1], вероятность крайних членов выборки описывается двойным показательным законом (7) [2]:

$$P(V_n) = e^{-e^{-x}}, \quad (7)$$

где $x = \alpha \cdot (V_n - g)$ – нормативное отклонение от моды кривой плотности вероятности распределения (1), $\alpha \geq 0$ и g – определяемые константы по уравнению на рис. 3.

Вариационные ряды максимальных членов выборок (V_n) и эмпирические вероятности $P(V_n)$, определяемые для каждого из них по формуле (8), представлены в табл. 5 на примере движения по горизонтальному пути и через проёмы детей с нарушениями слуха:

$$P(V_n) = n/N + 1, \quad (8)$$

где n – порядковый номер варианты;

N – количество вариантов в вариационном ряду.

Значения нормативного уклонения от моды кривой плотности вероятности распределения X_n определялись по табл. 9 приложения [2]. Данные на примере движения по горизонтальным путям, лестницам вверх и через проёмы детей с нарушениями слуха отражены в табл. 5, а на рис. 3 представлен график, описывающий соотношение между максимальными членами выборки V_n и их вероятностями $P(V_n)$.

Таблица 5

n	V_n	$P(V_n)$	X_n
1	73,33	0,063	-1,01980
2	75,00	0,125	-0,73212
3	75,00	0,188	-0,51522
4	76,59	0,250	-0,32665
5	78,26	0,313	-0,15115
6	78,26	0,375	0,01934
7	78,26	0,438	0,19032
8	78,26	0,500	0,36650
9	78,26	0,563	0,55273
10	79,95	0,625	0,75500
11	85,03	0,688	0,98163
12	85,71	0,750	1,24588
13	85,71	0,813	1,57193
14	100,00	0,875	2,01340
15	105,88	0,938	2,74048

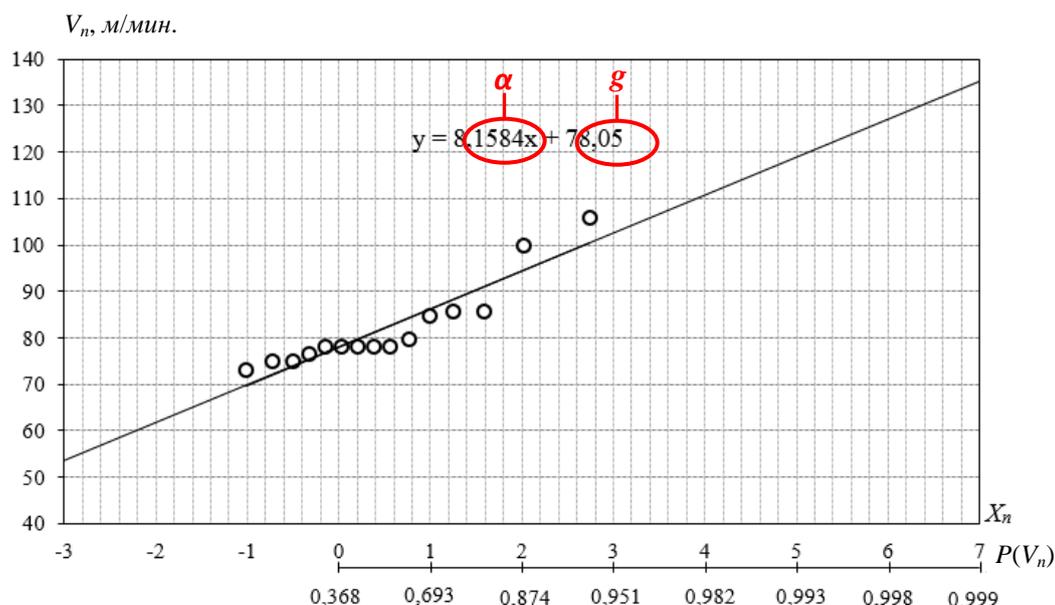


Рис. 3. Максимальная скорость движения детей с нарушениями слуха по горизонтальным путям и через дверные проёмы

Переходя от максимальных скоростей движения отдельных детей в потоке к их средним значениям, равным скорости свободного движения людского потока, применен закон о невозможности превышения максимальным членом выборки её удвоенного среднего значения (9) [4]:

$$V_0^{\vartheta} = 0,5 \cdot V_n. \quad (9)$$

Подставив к уравнению вида (10) выражение (11) [2], получим промежуточные уравнения, описывающие процесс изменений скорости свободного движения детей V_0^{ϑ} в зависимости от вероятности их движения $P(V_n)$ с максимальной скоростью, в частности для горизонтальных участков пути, по лестницам вверх, через проёмы (12), а также по лестницам вниз (13):

$$V_n = a \cdot X_n + q, \quad (10)$$

$$X_n = -\ln(-\lg P(V_n)) - 0,83405; \quad (11)$$

$$V_0^{\vartheta} = 35,62 - 4,08 \ln \cdot (-\lg P(V_n)); \quad (12)$$

$$V_0^{\vartheta} = 25,98 - 3,41 \ln \cdot (-\lg P(V_n)). \quad (13)$$

Благодаря полученным уравнениям (12), (13) строится график прогнозируемых средних скоростей движения по горизонтальным путям и через проёмы, а также по лестницам вверх и вниз в зависимости от вероятного наблюдаемого уровня эмоционального состояния (рис. 4).



Рис. 4. Зависимость скорости свободного движения детей с недостатками слуха от степени психологической напряженности ситуации

Таким образом, были получены скорости свободного движения для различных категорий движения детей с нарушениями слуха по различным участкам пути (табл. 6).

Таблица 6

Категория движения	Скорость свободного движения V_0 , м/мин. для детей с нарушениями слуха	
	Горизонтальные пути, проёмы, лестницы вверх	Лестницы вниз
Комфортное	< 35,62	< 25,98
Спокойное	35,62-42,88	25,98-32,05
Активное	42,88-53,72	32,05-41,13
Повышенная активность	53,57-66,04	41,13-51,44

Скорости свободного движения для остальных групп детей представлены в табл. 7.

Таблица 7

Группа маломобильных детей	Скорость свободного движения V_0 , м/мин.			
	ГП	ДП	ЛВВ	ЛВН
УОД	52,26	48,91	44,32	33,31
ПОДА	50,59	46,82	22,94	25,33
ДНЗ	41,26	41,61	36,83	28,70

Рассмотренным выше образом были получены корректные с точки зрения математической статистики данные, характеризующие движения детей с ограниченными возможностями по различным видам пути на основе теории движения людских потоков. Практическое применение результатов исследования заключается в появлении возможности проводить расчётные оценки и нормировать размеры эвакуации путей и выходов для рассматриваемой группы детей.

Заключение

Полученные в ходе исследований результаты были использованы при разработке новой редакции методики расчёта пожарных рисков [5], а также могут применяться как инструмент для установления научно-обоснованных требований к эвакуационным путям и выходам в зданиях с массовым пребыванием маломобильных детей с целью повышение уровня их безопасности при пожаре.

Литература

1. *Холщевников В.В.* Людские потоки в зданиях, сооружениях и на территории их комплексов: дис. ... д-ра техн. наук. М.: МИСИ, 1983.
2. *Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.* Курс теории вероятности и математической статистики для технических приложений. М., 1969. 512 с.
3. *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.
4. *Кудрин И.С.* Выявление параметров движения людских потоков при пожаре на объёмно-планировочные решения высотных зданий: дис. ... канд. техн. наук. М.: Академия ГПС МЧС России, 2013.
5. *Приказ МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382 (ред. от 02.12.2015) "Об утверждении методики определения расчётных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности"*.