

В. В. Холщевников, Д. А. Самошин,
Р. Н. Истратов, М. М. Шаранова

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВРЕМЕНИ ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ В СЛУЧАЕ ПОЖАРА

Учебно-методическое пособие
Часть 1



Москва 2019

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

Академия Государственной противопожарной службы

В. В. Холщевников, Д. А. Самошин,
Р. Н. Истратов, М. М. Шаранова

**ТЕСТОВЫЕ ЗАДАЧИ
ДЛЯ ПРОВЕРКИ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ВРЕМЕНИ ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ
В СЛУЧАЕ ПОЖАРА**

Учебно-методическое пособие

Часть 1

Утверждено Редакционно-издательским советом
Академии ГПС МЧС России

Москва 2019

УДК 614.842.65
ББК 38.960.1:38
Т36

Авторы:

В. В. Холщевников, Д. А. Самошин, Р. Н. Истратов, М. М. Шаранова

Рецензенты:

С. В. Пузач, заслуженный деятель науки Российской Федерации,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой инженерной теплофизики и гидравлики
Академии ГПС МЧС России

С. А. Швырков, доктор технических наук, доцент,
начальник кафедры пожарной безопасности
технологических процессов Академии ГПС МЧС России

Т36 Тестовые задачи для проверки точности моделирования времени эвакуации людей в случае пожара: учеб.-метод. пособие. Часть 1 / В. В. Холщевников, Д. А. Самошин Р. Н. Истратов, М. М. Шаранова. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – 26 с.

ISBN 978-5-6043591-0-5

В настоящее время создаются различные коммерческие программные продукты для моделирования времени эвакуации людей. Однако эталонные данные, по которым можно проверять точность вычислений с помощью тех или иных программ, отсутствуют. В пособии приведены параметры людского потока, которые должны быть учтены при разработке алгоритмов моделирования, и рассмотрены 42 задачи, по которым можно проверить точность моделей.

Пособие предназначено для пользователей и разработчиков программного обеспечения, а также для представителей надзорных органов.

УДК 614.842.65
ББК 38.960.1:38

ISBN 978-5-6043591-0-5



© Академия Государственной противопожарной
службы МЧС России, 2019
© Холщевников В. В., Самошин Д. А.,
Истратов Р. Н., Шаранова М. М., 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ПАРАМЕТРЫ ЛЮДСКОГО ПОТОКА И ИХ ЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ	6
1.1. Плотность и скорость людского потока	6
1.2. Интенсивность движения по различным видам пути	8
1.3. Максимальные и минимальные значения пропускной способности участков эвакуационного пути	12
ГЛАВА 2. РАСЧЕТНЫЕ СЛУЧАИ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ.....	14
2.1. Движение по горизонтальному участку без проема	14
2.2. Движение по горизонтальному участку с дверным проемом шириной 1,2 м	15
2.3. Движение по горизонтальному участку с дверным проемом шириной 0,8 м	18
2.4. Слияние людских потоков на горизонтальном участке	19
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	22
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	23

ВВЕДЕНИЕ

При возникновении пожара эвакуация – это вынужденный процесс движения потока людей с участков их нахождения (источников), где возможно воздействие на них опасных факторов пожара, по последовательно расположенным участкам эвакуационных путей и выходов в безопасную зону. Своевременная эвакуация людей ($t_{эв} \leq t_{бл}$) является одним из важнейших критериев обеспечения безопасности людей при пожаре.

Людской поток представляет собой сложное социально-психологическое явление, определяемое общими закономерностями поведения людей в нем, их индивидуальными физическими возможностями и психофизическим состоянием. Поэтому попытка его математического воспроизведения представляет совсем не тривиальную задачу – моделирование людского потока требует одновременно и высокой квалификации и высокой ответственности тех, кто берется за разработку этого важнейшего для решения практических задач пожарной безопасности инструмента.

Основы теоретического познания людских потоков были сформированы к началу 80-х годов прошлого века [1–3]. С середины 50-х годов прошлого века они систематически излагаются в учебной [4–9] и научной литературе [10–13]; с 1980 года вошли в систему нормативных документов по противопожарному нормированию [14–16].

Одновременно с развитием теории людских потоков расширились и возможности автоматизации многочисленных расчетных операций, необходимых для реализации совершенствующихся моделей людского потока («элементарные потоки» [17] идущих в затылок друг другу людей; масса людей, выраженная площадью их горизонтальной проекции [5], стохастический процесс живой системы [18]) – от графических способов до использования ЭВМ.

Графические способы [5] позволяют фиксировать выполнение расчетных операций последовательно для каждого участка эвакуационного пути. Они наглядно демонстрируют корректность зависимостей, использованных в расчетах, но требуют проведения многочисленных достаточно точных графических построений. Поэтому при появлении первых поколений ЭВМ («Урал-2») стали разрабатываться программы, автоматизирующие графоаналитические методы расчета [19]. Наиболее известными из них стали «Поток-1» и «Поток-2», опубликованные в 1979 году в учебном пособии [6].

Модели реализаций вероятностного процесса движения людских потоков (ADLPV и SDLP) получили конкретную программную реализацию в учебном пособии 1986 года [20].

С тех пор с ростом возможностей ЭВМ программные продукты для расчета времени эвакуации людей постоянно совершенствовались; в настоящее время на российском рынке только для расчета времени эвакуации доступно около 10 программ, активно продаваемых фирмами-разработчиками. Следует отметить, что в нашей стране в последние годы наблюдалось некоторое отставание в этой области по сравнению с зарубежными странами, поэтому, без всякой иронии, появление рынка российского программного обеспечения следует считать несомненным достижением и движением вперед. Однако анализ того, что именно представляют собой продаваемые на рынке программные продукты, позволил сделать следующие выводы.

Вывод № 1. Разработчики не приводят используемых ими исходных значений параметров людских потоков и закономерностей связи между ними; они не отвечают и на запросы по этому поводу, зачастую ссылаясь на коммерческую тайну; есть вероятность, что они используют данные, не относящиеся к людским потокам [21].

Вывод № 2. Многие программы коммерческих расчетно-вычислительных комплексов, увы, занижают время эвакуации.

Вывод № 3. Разработчики не всегда понимают, что именно они моделируют – не у всех из них есть необходимая квалификация и даже пожарно-техническое образование, тогда как представителями экспертных организаций отмечается: «Выполнение многих требований Технического регламента сводится к определению времени эвакуации людей из зданий, сооружений... <...> людей, способных качественно, с пониманием дела, выполнить данные расчеты, можно сосчитать по пальцам...» [22, С. 56].

Как следствие этих выводов становится очевидной необходимость тестовых задач, которые просчитываются ручным способом по элементарным формулам, приведенным в нормативных документах [15]. Они позволяют разработчикам проверить качество своих программ, а всем их приобретателям убедиться в том, что программный продукт соответствует требованиям МЧС России [15] и не вводит их в заблуждение [23] относительно обеспечения безопасности людей при пожаре.

Для указанной цели в настоящем учебном пособии (его первой части) рассчитаны простейшие случаи движения однородного людского потока. Всего в пособии рассмотрено 42 задачи.

ГЛАВА 1. ПАРАМЕТРЫ ЛЮДСКОГО ПОТОКА И ИХ ЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

1.1. Плотность и скорость людского потока

Последовательно расположенные участки эвакуационных путей и выходов, предназначенные при организованной эвакуации для движения групп людей (численностью N человек) от мест начала их эвакуации (источников потока) до конкретного эвакуационного выхода, образуют расчетный эвакуационный путь.

В источниках на участках формирования каждого людского потока, имеющих ширину b и длину l , образуется плотность людского потока D , значение которой определяется по формуле:

$$D = \frac{N}{b \cdot l}, \text{ чел/м}^2. \quad (1.1)$$

Скорость людского потока при движении по любому (j -му) виду пути (горизонтальный, лестница вниз, лестница вверх) является функцией его плотности – $V = f(D)$. Закономерность этой связи [3] описывается элементарной случайной функцией общего вида:

$$V_{Dj} = V_{0j} \left(1 - a_j \ln \frac{D_j}{D_{0j}} \right), \quad (1.2)$$

где V_{0j} – случайная величина скорости свободного движения (при отсутствии влияния окружающих людей), зависящая от вида пути, эмоционального и физического состояния людей, составляющих поток, м/мин;

a_j – коэффициент, определяющий степень влияния плотности потока при движении по j -му виду пути;

D_j – значение плотности потока на j -м виде пути, при котором определяется скорость его движения, чел/м²;

D_{0j} – пороговое значение плотности потока, по достижении которого плотность становится фактором, влияющим на скорость движения, чел/м²; при $D_j < D_{0j}$ значение $V_D = V_{0j}$.

Зависимости $V = f(D)$ в отдельных реализациях случайной функции могут приниматься детерминированными. Детерминированная зависимость, принятая в противопожарном нормировании [14–16], описывается математическим ожиданием случайной функции, значения которой установлены по 25 000 результатов, полученных в 70 сериях натуральных наблюдений и экспериментов. Математическое ожидание

скорости свободного движения определяется при соответствующей категории движения (комфортное, спокойное, активное, повышенной активности; при эвакуации – повышенной активности).

Значения V_{0j} , a_j и D_{0j} , принятые в нормативном документе [15] для однородного расчетного состава людского потока, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Значения V_{0j} , a_j и D_{0j} в зависимости от вида пути

Вид пути	V_{0j} , м/мин	a_j	D_{0j} , чел/м ²
Горизонтальный	100	0,295	0,51
Проем	100	0,295	0,65
Лестница вниз	100	0,400	0,89
Лестница вверх	60	0,305	0,67

Так как размеры людей различаются в зависимости от возраста, мобильности, имеющегося у них груза и вида одежды (например, зимняя одежда увеличивает размеры человека на 25 %) и т. п., то в нормах значение плотности выражается через площадь горизонтальной проекции тела человека (рис. 1.1).

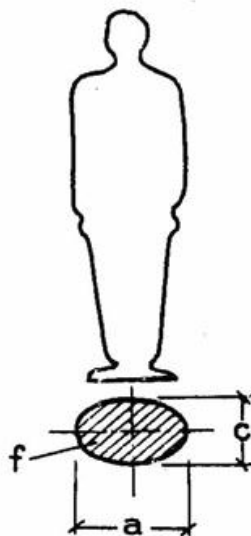


Рис. 1.1. Площадь горизонтальной проекции тела человека, $f = 0,25ac$ [5]

В таком случае плотность потока будет иметь размерность не чел/м², а м²/м². Иными словами, если площадь горизонтальной проекции человека составляет 0,1 м² (взрослый человек без ограничений мобильности в летней одежде), то значению плотности потока, равной 3 чел/м², соответствует значение 0,3 м²/м². Параметры потока, связанные между собой через рассмотренный параметр, приведены на рис. 1.2.

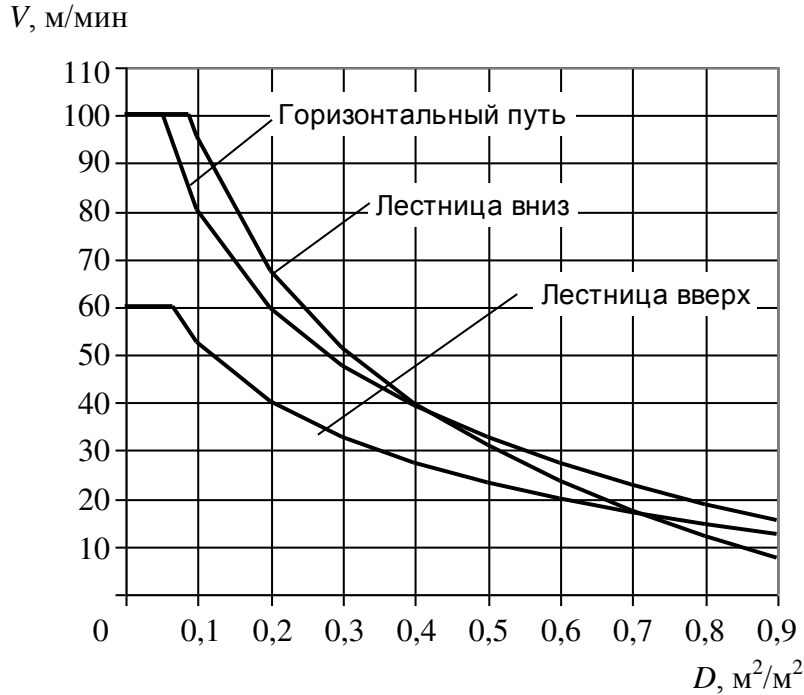


Рис. 1.2. Графики зависимости скорости от плотности людского потока, принятые в [15]

Важно подчеркнуть, что на приведенные в этом разделе зависимости совершенно не влияет то, в какой модели людского потока они используются.

1.2. Интенсивность движения по различным видам пути

При беспрепятственном движении людской поток численностью N человек проходит участок пути длиной l за время t . Отношение N/t показывает, какое количество людей проходит 1 м длины пути за единицу времени, двигаясь с той или иной скоростью V . Оно характеризует величину потока P , чел/мин.

Поскольку при ширине участка b и плотности потока на нем D количество людей на участке составляет $N = Db l$, а $t = l/V$, то

$$P = N/t = DVb. \quad (1.3)$$

Ширина участка эвакуационного пути (b) не может быть меньше ширины поперечного сечения проекции тела человека (a), поэтому b всегда должно быть кратным или более a , т. е. ширине одиночного потока, принимаемой минимально равной 0,5 м. Поэтому сократив (1.3) на b имеем:

$$q = DV. \quad (1.4)$$

Эта величина названа [1] «интенсивность движения» людского потока; она, как видно, не зависит от ширины участка эвакуационного пути и показывает количество людей, которое может пройти 1 м за единицу времени (мин.).

В табличном виде связь между параметрами людского потока представлена в табл. 1.2, где следует обратить внимание на примечание, которое имеет большое практическое значение.

Таблица 1.2

Зависимость между параметрами людского потока в табличном виде

Плотность потока $D, \text{ м}^2/\text{м}^2$	Горизонтальный путь		Дверной проем $q, \text{ м}/\text{мин}$	Лестница вниз		Лестница вверх	
	$V, \text{ м}/\text{мин}$	$q, \text{ м}/\text{мин}$		$V, \text{ м}/\text{мин}$	$q, \text{ м}/\text{мин}$	$V, \text{ м}/\text{мин}$	$q, \text{ м}/\text{мин}$
0,01	100	1,0	1,0	100	1,0	60	0,6
0,05	100	5,0	5,0	100	5,0	60	3,0
0,10	80	8,0	8,7	95	9,5	53	5,3
0,20	60	12,0	13,4	68	13,6	40	8,0
0,30	47	14,1	16,5	52	15,6	32	9,6
0,40	40	16,0	18,4	40	16,0	26	10,4
0,50	33	16,5	19,6	31	15,6	22	11,0
0,60	28	16,3	19,05	24,5	14,1	18,5	10,75
0,70	23	16,1	18,5	18	12,6	15	10,5
0,80	19	15,2	17,3	13	10,4	13	10,4
0,90 и более	15	13,5	8,5	8	7,2	11	9,9

Примечание. Интенсивность движения в дверном проеме при плотности потока 0,9 и более, равная 8,5 м/мин, установлена для дверного проема шириной 1,6 м и более, а при дверном проеме меньшей ширины интенсивность движения следует определять по формуле $q = 2,5 + 3,75b$, где b – ширина проема.

Величина каждого потока формируется в его источнике (i) и при беспрепятственном движении по последующим ($i+1$) участкам пути остается неизменной, при переходе через границы смежных участков пути изменяется интенсивность движения потока, а не его величина:

$$q_{i+1} = \frac{q_i \cdot b_i}{b_{i+1}}. \quad (1.5)$$

На участке ($i+1$) образуется плотность потока D_{i+1} , соответствующая этому значению q_{i+1} . Значение D_{i+1} определяет значение V_{i+1} .

Если перед границей участка $i+1$ происходит слияние нескольких потоков, подходящих к ней одновременно с нескольких участков (i_1, i_2, i_3), то

$$q_{i+1} = \frac{\sum q_i \cdot b_i}{b_{i+1}}. \quad (1.6)$$

Интенсивность движения имеет максимум, поскольку расстояние между взрослыми людьми при их беспрепятственном движении вдоль общего пути не может быть менее 0,25–0,20 м [17]. Графики зависимостей интенсивности движения людского потока от его плотности для различных видов пути, принятые в [15], приведены на рис. 1.3.

Расчетное значение q_{i+1} , определенное по формулам (1.5, 1.6), большее q_{\max} для вида пути, к которому относится участок $i+1$, сигнализирует о начале образования скопления людей перед границей участка ($i+1$) из-за недостаточной его пропускной способности:

$$Q_{i+1} < P_{i+1}. \quad (1.7)$$

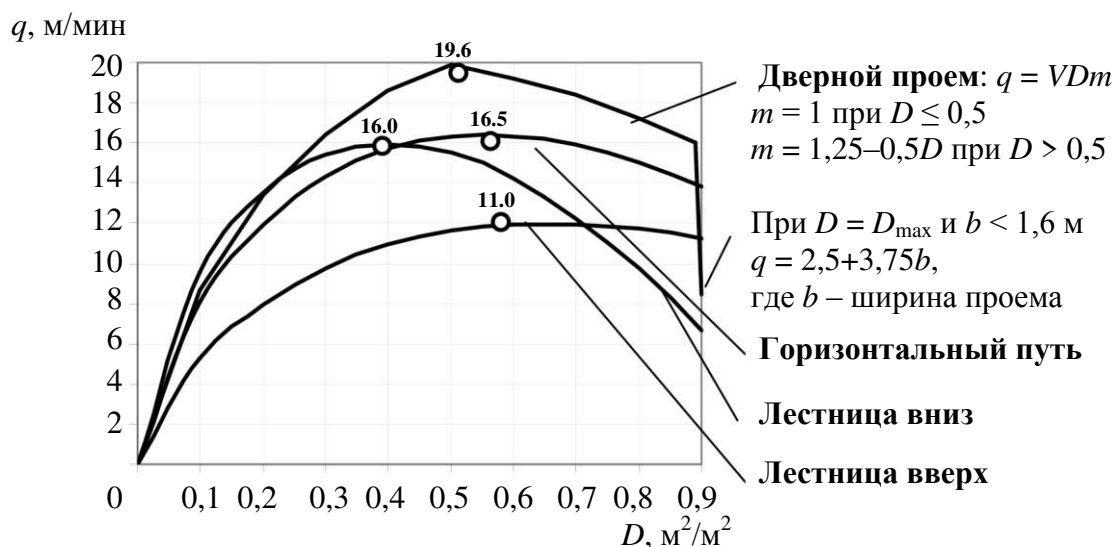


Рис. 1.3. Нормированные значения интенсивности движения людского потока в зависимости от его плотности

Максимальная интенсивность движения (q_{\max}) достигается при значениях плотности потока 4–5 чел/м². Образование максимальных плотностей (D_{\max}) – 9 и более чел/м² (табл. 1.3) является самым неблагоприятным случаем движения людских потоков – образуется скопление людей и задержка движения потока.

Таблица 1.3

Значения максимальной и минимальной интенсивности движения людского потока для различных видов пути

Вид пути	Максимальное значение интенсивности q_{\max} , чел/(м·мин) при $f = 0,1$ м ² /чел	Значение интенсивности, чел/(м мин), при D_{\max} при $f = 0,1$ м ² /чел
Горизонтальный путь	165	135
Дверной проем	196	85 и менее
Лестница вниз	160	72
Лестница вверх	110	99

Силу давления тел людей друг на друга при большом их скоплении хорошо иллюстрирует цитата: «(многие из них) оставались совершенно без платья, которое разрывалось по всем направлениям» [24, С. 95]. При длительном воздействии такого давления в теле человека развивается компрессионная и механическая асфиксия, вызывающая его смерть.

Наиболее сложно происходит движение людей при скоплении через дверной проем, ширина которого уменьшается из-за эффекта так называемого «ложного проема» (при приближении к проему люди вклиниваются в него с боковых направлений, отталкиваются от его косяков). Этот эффект ярко демонстрирует зависимость пропускной способности проема (Q) от его ширины [24]:

$$Q = bq = b(2,5 + 3,75b), \text{ м/мин.} \quad (1.8)$$

Таким образом, дверной проем шириной 1 м при образовании перед ним скопления может пропустить не более: $1 \cdot (2,5 + 3,75 \cdot 1) = 62$ человека в минуту.

Экспериментальные исследования [26] показывают, что при небольшой ширине двери ($b = 0,8 - 1$ м), при ее недостаточной пропускной способности образуется арка, радиус которой настолько значителен, что давление идущего сзади потока недостаточно для того, чтобы ее продавить. При большей ширине проемов движение носит пульсирующий характер: задержки движения чередуются продавливанием арки. При ширине дверей 1,6 м и более движение становится относительно равномерным.

Важно отметить, что формула интенсивности движения через проем (см. примечание в табл. 1.2) содержится не только в [15], но и в действующем на сегодня ГОСТ 12.1.004–91 [16] и подлежит обязательному выполнению.

Если формулу (1.8) не использовать при моделировании эвакуации (а такое, увы, отмечается), то проемы получаются зауженными, меньшей ширины, чем необходимо. За такое неправомерное решение разработчики и пользователи программ несут полную ответственность.

Образование скоплений людей прерывает беспрепятственность движения людских потоков. Скопление становится как бы новым источником потока и формирует новые значения параметров его движения на последующем участке пути, еще не занятом потоком. Поэтому значение интенсивности движения по нему q_{i+1} будет равно интенсивности движения при скоплении, но люди на нем разместятся с меньшей плотностью (на графиках рисунка 1.3 она соответствует этим значениям интенсивности, находящимся слева от q_{\max}). Этим значениям плотности потока будет соответствовать скорость его движения, указанная на графиках рисунка 1.2 и определяемая по формуле (1.2).

1.3. Максимальные и минимальные значения пропускной способности участков эвакуационного пути

Значения максимальной и минимальной пропускной способности весьма удобны для оценки результатов моделирования. Так, если результаты моделирования показали, что участок пути пропускает людей больше, чем указано в табл. 1.4 и 1.5, то в модели кроется грубая ошибка.

Как показало тестирование программ и последовавшая за этим дискуссия, наибольшие сложности вызывает понимание закономерностей движения людей через проем, поэтому в табл. 1.5 приведены максимальные значения пропускной способности проема. Иными словами, дверной проем не может пропустить людей больше того количества, что указано в данной таблице.

Таблица 1.4

Максимальная пропускная способность различных участков пути эвакуации

Ширина участка пути, м	Горизонтальный участок		Лестница вниз		Лестница вверх	
	При плотности 5 чел/м ²	При плотности 9 чел/м ² и более	При плотности 4 чел/м ²	При плотности 9 чел/м ² и более	При плотности 5 чел/м ²	При плотности 9 чел/м ² и более
0,8	132	108	128	57	88	79
0,9	148	121	144	64	99	89
1	165	135	160	72	110	99
1,05	173	141	168	75	115	103
1,1	181	148	176	79	121	108
1,2	198	162	192	86	132	118
1,3	214	175	208	93	143	128
1,35	222	182	216	97	148	133
1,4	231	189	224	100	154	138
1,5	247	202	240	108	165	148
1,6	264	216	256	115	176	158
1,7	280	229	272	122	187	168
1,8	297	243	288	129	198	178
1,9	313	256	304	136	209	188
2	330	270	320	144	220	198

**Максимальная пропускная способность дверного проема
при беспрепятственном движении и при образовании
максимальной плотности перед ним**

Ширина проема, м	Максимальная пропускная способность, чел/мин	
	При плотности 5 чел/м ²	При плотности 9 чел/м ² и более
0,8	156	44
0,9	176	52
1,0	196	62
1,05	205	67
1,1	215	72
1,2	235	84
1,3	254	95
1,35	264	102
1,4	274	108
1,5	294	121
1,6	313	136
1,7	333	144
1,8	352	153

В этом разделе была представлена минимальная базовая информация, необходимая для понимания взаимосвязей между параметрами людского потока. Приведены численные значения параметров, которые должны быть реализованы в любой модели, будь то упрощенная аналитическая, имитационно-стохастическая или модель индивидуально-поточного движения, так как свойства потока людей не зависят от того, каким образом их выражают.

Важно еще раз отметить, что сечение горизонтального пути, проема или лестничного марша для рассматриваемого вида потока не может пропустить людей больше, чем указано в табл. 1.4 и 1.5. Если результаты моделирования показывают, что количество людей превышает указанные значения, то это является прямым нарушением Приказа МЧС России от 30.06.2009 № 382 и ГОСТ 12.1.004–91 «Пожарная безопасность. Общие требования», так как ведет к назначению меньшей ширины эвакуационного выхода.

ГЛАВА 2. РАСЧЕТНЫЕ СЛУЧАИ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ

Оценка значений параметров людского потока, вызванных, например, изменением количества людей, вида пути и ширины представляет собой сложную и одну из самых важных задач для прогнозирования времени эвакуации людей из зданий и сооружений в случае пожара.

Количество факторов, которые влияют на параметры людского потока очень велико, однако для начального анализа точности результатов моделирования следует выбрать следующие расчетные случаи: движение по горизонтальному участку пути (самый простейший случай), движение людского потока через проем и слияние людских потоков с образованием и последующим рассасыванием скопления людей. Для каждого из трех описанных выше расчетных случаев рассчитано 9, 18 и 15 задач соответственно.

2.1. Движение по горизонтальному участку без проема

Для анализа движения по горизонтали рассмотрим следующую задачу. Пешеходы размещены на участке (рис. 2.1) равномерно в соответствии с заданной плотностью (табл. 2.1). Скорости их движения соответствуют [15]. Площадь горизонтальной проекции пешеходов принималась равной $0,1 \text{ м}^2$.

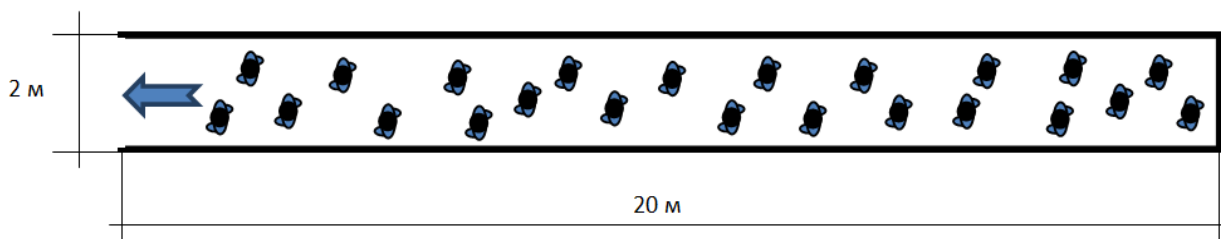


Рис. 2.1. Размеры горизонтального участка без дверного проема

Таблица 2.1

**Исходные данные для расчета движения
по горизонтальному участку пути без проема**

Номер теста	Описание теста
1-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,1 \text{ м}^2/\text{м}^2$
2-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,2 \text{ м}^2/\text{м}^2$
3-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,3 \text{ м}^2/\text{м}^2$
4-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,4 \text{ м}^2/\text{м}^2$
5-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,5 \text{ м}^2/\text{м}^2$
6-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,6 \text{ м}^2/\text{м}^2$
7-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,7 \text{ м}^2/\text{м}^2$
8-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,8 \text{ м}^2/\text{м}^2$
9-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,9 \text{ м}^2/\text{м}^2$

Время движения по горизонтальному участку без проема в конце участка определялось по формуле:

$$t = \frac{l}{V_D}, \quad (2.1)$$

где l – длина пути, м; V_D – скорость движения (м/мин) по данным [15] в зависимости от плотности потока. Результаты расчета приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Время эвакуации людей по горизонтальному участку без проема

Номер теста	Количество человек	Время эвакуации, с
1-2	40	15,0
2-2	80	20,0
3-2	120	25,5
4-2	160	30,0
5-2	200	36,4
6-2	240	42,9
7-2	280	52,2
8-2	320	63,2
9-2	360	80,0

2.2. Движение по горизонтальному участку с дверным проемом шириной 1,2 м

Далее оценим влияние наличия дверного проема на параметры движения потока, так как его пропускная способность ниже, чем пропускная способность предшествующего ему участка горизонтального пути. В этой серии задач ширина проема равна 1,2 м. Пешеходы размещены на участке (рис. 2.2) равномерно в соответствии с заданной плотностью (табл. 2.3). Скорости их движения соответствуют [15]. Площадь горизонтальной проекции пешеходов $0,1 \text{ м}^2$.

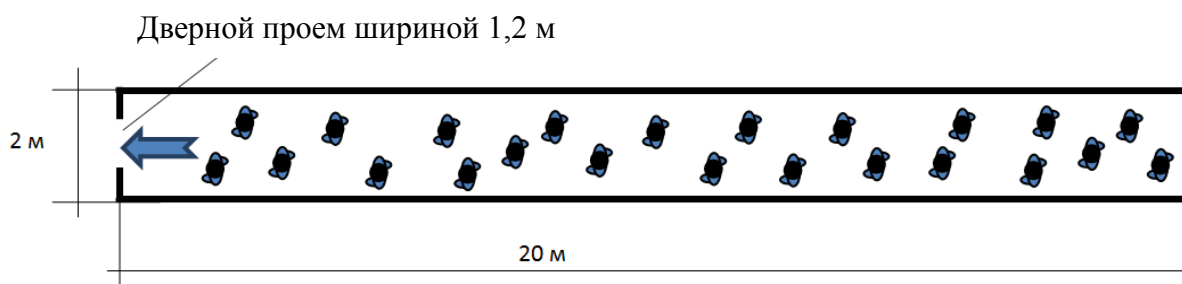


Рис. 2.2. Размеры горизонтального участка, в конце которого расположен дверной проем шириной 1,2 м (примечание: участок 1 – горизонтальный путь; участок 2 – дверной проем)

Таблица 2.3

Исходные данные для расчета движения по горизонтальному участку пути с проемом шириной 1,2 м

Номер теста	Описание теста
10-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,1 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 1,2 м
11-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,2 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 1,2 м
12-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,3 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 1,2 м
13-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,4 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 1,2 м
14-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,5 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 1,2 м
15-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,6 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 1,2 м
16-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,7 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 1,2 м
17-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,8 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 1,2 м
18-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,9 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 1,2 м

Время движения рассчитывалось следующим образом. При наличии проема в конце участка проверялось, превышает ли полученное расчетом значение интенсивности q_2 максимальное значение q_{\max} [15]:

$$q_2 = \frac{q_1 b_1}{b_2}, \quad (2.2)$$

где q_1 и q_2 – интенсивность движения на участках 1 и 2 соответственно, м/мин; b_1 и b_2 – ширина участков 1 и 2 соответственно, м.

Если $q_2 \leq q_{\max}$, то расчет выполнялся по формуле (2.1); если значение q_{\max} превышалось (т. е. к проему подошло людей больше, чем он физически сможет пропустить), то перед проемом образовывалось скопление людей и время движения определялось интенсивностью движения $q_{D\max}$ через дверной проем:

$$t = \frac{N \cdot f}{q_{D\max} \cdot b_2}, \quad (2.3)$$

где N – количество человек; f – площадь горизонтальной проекции, м²; $q_{D\max}$ – интенсивность движения при максимальной плотности [15], м/мин; b_2 – ширина проема, м. По данным [15], для проема шириной 1,2 м интенсивность движения будет равна: $2,5 + 3,75 \cdot 1,2 = 7,0$ м/мин.

Интенсивность движения через проем определяется параметрами людского потока и не зависит от того, какая модель используется.

Результаты расчета приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Время эвакуации людей по горизонтальному участку пути с проемом шириной 1,2 м в конце участка

Номер теста	Количество человек	Время эвакуации, с
10-2	40	15,00
11-2	80	57,14
12-2	120	85,71
13-2	160	114,29
14-2	200	142,86
15-2	240	171,43
16-2	280	200,00
17-2	320	228,57
18-2	360	257,14

2.3. Движение по горизонтальному участку с дверным проемом шириной 0,8 м

Рассмотрим ситуацию, аналогичную приведенной в разделе 2.2, но с дверным проемом шириной 0,8 м в конце участка. Пешеходы размещены на участке (рис. 2.3) равномерно в соответствии с заданной плотностью (табл. 2.5). Скорости их движения соответствуют [15]. Площадь горизонтальной проекции пешеходов $0,1 \text{ м}^2$.

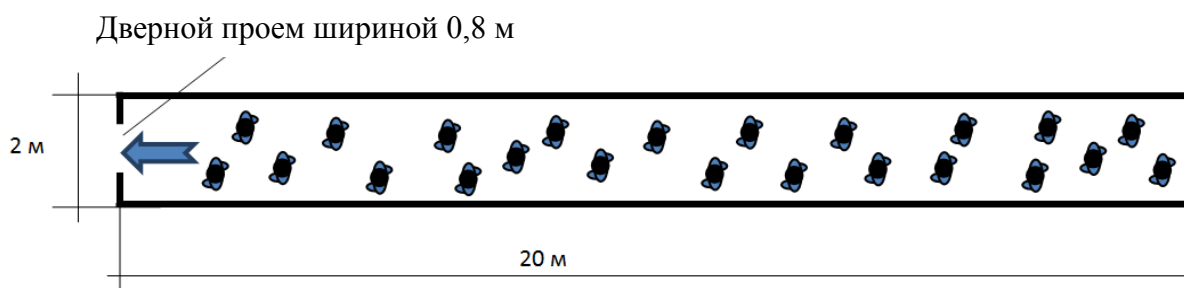


Рис. 2.3. Размеры горизонтального участка, в конце которого расположен дверной проем шириной 0,8 (примечание: участок 1 – горизонтальный путь; участок 2 – дверной проем)

Таблица 2.5

Исходные данные для расчета движения по горизонтальному участку пути с проемом шириной 0,8 м

Номер теста	Описание теста
19-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,1 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 0,8 м
20-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,2 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 0,8 м
21-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,3 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 0,8 м
22-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,4 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 0,8 м
23-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,5 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 0,8 м
24-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,6 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 0,8 м
25-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,7 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 0,8 м
26-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,8 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 0,8 м
27-2	Люди размещены равномерно с плотностью $D = 0,9 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в конце участка проем шириной 0,8 м

Расчеты проводились рассмотренным выше образом с учетом того, что по данным [15] для проема шириной 0,8 м интенсивность движения составит: $2,5 + 3,75 \cdot 0,8 = 5,5 \text{ м/мин}$. Результаты расчета приведены в табл. 2.6.

**Время эвакуации людей по горизонтальному участку пути
с проемом шириной 0,8 м в конце участка**

Номер теста	Количество человек	Время эвакуации, с
19-2	40	54,55
20-2	80	109,09
21-2	120	163,64
22-2	160	218,18
23-2	200	272,73
24-2	240	327,27
25-2	280	381,82
26-2	320	436,36
27-2	360	490,91

2.4. Слияние людских потоков на горизонтальном участке

Следующий блок задач посвящен расчету параметров людских потоков при их слиянии на общем пути. Расчетная схема движения представляет собой Т-образный перекресток, на который выходят люди с участков 1 и 2.

Пешеходы размещены на участках 1 и 2 (см. рис. 2.4) равномерно в соответствии с заданной плотностью (табл. 2.7). На участке 3 пешеходов нет. Скорости их движения соответствуют [15]. Площадь горизонтальной проекции пешеходов $0,1 \text{ м}^2$.

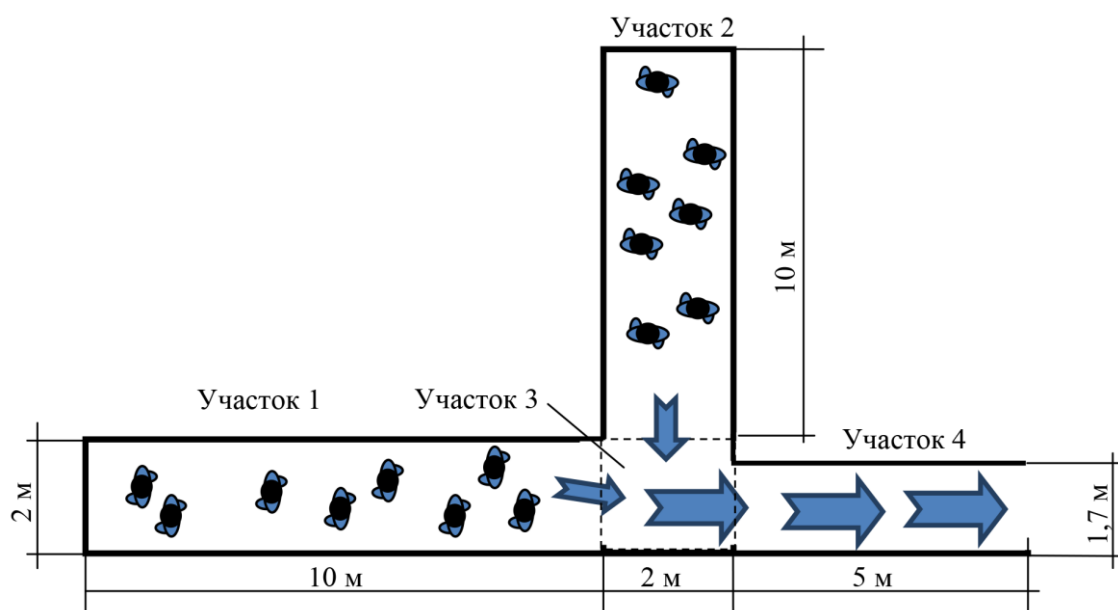


Рис. 2.4. Слияние людских потоков на горизонтальных участках пути

Таблица 2.7

Количество людей и плотность их размещения на участках

Номер теста		Участок 1		Участок 2	
		Плотность, м ² /м ²	Количество человек	Плотность, м ² /м ²	Количество человек
Серия №1 – плотности на участках одинаковые	28-2	0,20	40	0,20	40
	29-2	0,30	60	0,30	60
	30-2	0,40	80	0,40	80
	31-2	0,50	100	0,50	100
	32-2	0,60	120	0,60	120
	33-2	0,70	140	0,70	140
	34-2	0,80	160	0,80	160
	35-2	0,90	180	0,90	180
Серия №2 – плотности на участках разные	36-2	0,30	60	0,10	20
	37-2	0,40	80	0,20	40
	38-2	0,50	100	0,30	60
	39-2	0,60	120	0,40	80
	40-2	0,70	140	0,50	100
	41-2	0,80	160	0,60	120
	42-2	0,90	180	0,70	140

Время движения рассчитывалось следующим образом. По формуле (2.4) определялась интенсивность объединенного людского потока:

$$q_3 = \frac{q_1 b_1 + q_2 b_2}{b_3}, \quad (2.4)$$

где q_1 , q_2 , q_3 – интенсивность движения на участках 1, 2 и 3 соответственно, м/мин; b_1 , b_2 , b_3 – ширина участков 1, 2 и 3 соответственно, м.

Далее проверялось, превышает ли расчетное значение q_3 максимальное значение q_{\max} [15]. Если значение q_{\max} превышалось, то в месте слияния людских потоков, выходящих из участков 1 и 2, образовывалось скопление людей. Миновав место слияния людских потоков, пешеходы начинали движение по участку 4. Таким образом, общее время движения определялось суммой времени прохождения места слияния потоков и времени движения по участку 4:

$$t = \frac{N \cdot f}{q_{D\max} \cdot b_4} + \frac{l_4}{V_4}, \quad (2.5)$$

где N – количество человек; f – площадь горизонтальной проекции, м²; $q_{D\max}$ – интенсивность движения при максимальной плотности для

горизонтального участка, равная 13,5 м/мин [15]; b_4 – ширина участка 4, м; l_4 – длина участка 4, м; V_4 – скорость движения по участку 4, м.

Параметры движения на участке 4 определяются из выражения:

$$q_4 = \frac{q_3 b_3}{b_4}. \quad (2.6)$$

Миновав место скопления, людской поток на участке 4 уже не встречает помех движению, поэтому при рассчитанном значении интенсивности ($q_4 = 15,9$ м/мин) скорость движения будет равна $V_4 = 40,0$ м/мин [15]. Результаты расчета представлены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Количество людей и плотность их размещения на участках

Номер теста		Время движения, с
Серия №1 – плотности на участках одинаковые	28-2	28,42
	29-2	38,87
	30-2	49,33
	31-2	59,79
	32-2	70,25
	33-2	80,70
	34-2	91,16
Серия №2 – плотности на участках разные	35-2	101,62
	36-2	28,42
	37-2	38,87
	38-2	49,33
	39-2	59,79
	40-2	70,25
	41-2	80,70
42-2	91,16	

Подводя итог этому разделу, следует отметить, что воспроизведение процесса движения людей в потоке с помощью того или иного набора формул является сложнейшей задачей. Вполне очевидно, что использование различных техник вычисления и алгоритмов моделирования обуславливает некоторую вариабельность результатов расчетов. В связи с этим, небольшое отклонение результатов моделирования от данных, приведенных в настоящем пособии, как в меньшую, так и, разумеется, в большую сторону, по всей видимости, необходимо допустить. Величина этого отклонения не должна превышать 10 %, так как в настоящем пособии рассмотрены пути движения длиной всего 20 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование процесса эвакуации уже сейчас играет и, без сомнений, далее будет играть все большую роль при решении практических задач пожарной безопасности. На сегодняшний день разработано несколько компьютерных программ, выполняющих проверочные расчеты по определению условия безопасности людей с возможностью моделирования и визуализации процесса их движения в зданиях и сооружениях при пожарах.

Однако количество существующих программных продуктов не всегда свидетельствует об их хорошем качестве и адекватности воспроизведения моделируемых процессов. Это связано с тем, что имеющиеся на рынке программно-вычислительные комплексы часто (за небольшим исключением) не соответствуют не только реально наблюдаемому движению людских потоков, но и их упрощенному изложению в рамках положений существующих нормативных документов [15]. Очевидно, что разработчики современного программного обеспечения не совсем понимают и не всегда желают понимать устоявшиеся и реализованные в нормах взаимосвязи между параметрами людского потока.

В ходе проводимого тестирования и обсуждения полученных материалов стало ясно, что необходим некий эталонный материал, своего рода камертон, по которому можно было бы настраивать производимую продукцию. Таким базовым источником, по мнению авторов, может послужить настоящее учебно-методическое пособие, в котором приведены фундаментальные зависимости между параметрами людского потока и рассмотрены 42 простейшие задачи, позволяющие провести тестирование компьютерных программ, имитирующих движение людей.

Данное пособие позволит не только проверять адекватность разрабатываемых моделей, но и контролировать качество продаваемого на рынке программного обеспечения, что предоставит возможность повысить точность проведения расчетов при оценке безопасной эвакуации людей в зданиях и сооружениях. В дальнейшем авторский коллектив планирует разработать более сложные тестовые задачи, которые будут изложены в следующей части учебно-методического пособия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Предтеченский В. М. О расчете движения людских потоков в зданиях массового назначения // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. – 1958. – № 7.
2. Холщевников В. В. Моделирование зависимостей между параметрами людских потоков // Сб.: Исследование по основам архитектурного проектирования. – Томский Государственный университет. – 1982. – С. 36–53.
3. Закономерности связи между параметрами людских потоков. Диплом № 24-S на открытие в области социальной психологии (автор Холщевников В. В.) // Научные открытия. – М.: Российская академия естественных наук, Международная академия авторов научных открытий и изобретений – М.: 02.06.2005.
4. Архитектура гражданских и промышленных зданий: Учебник для вузов : в V т. Т. II : Основы проектирования / Л. Б. Великовский, Н. Ф. Гуляницкий, В. М. Ильинский и др.; под общ. ред. В. М. Предтеченского – М., Стройиздат, 1966.
5. Предтеченский В. М., Милинский А. И. Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков: Учеб. пособие для вузов. – М.: Стройиздат, 1969. – 200 с. *Berlin*, 1971; *Koln*, 1971; *Praha*, 1972; *New Delhi*, 1978.
6. Предтеченский В. М, Милинский А. И. Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1979. – 376 с.
7. Архитектура гражданских и промышленных зданий: Гражданские здания: Учебник для вузов / А. В. Захаров, Т. Г. Маклакова, В. В. Холщевников и др.; под общ. ред. А.В. Захарова. – М.: Стройиздат, 1993. – 508 с.
8. Холщевников В. В., Самошин Д. А. Эвакуация и поведение людей при пожарах: Учеб. пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. – 212 с.
9. Холщевников В. В., Самошин Д. А. и др. Эвакуация и поведение людей при пожарах: Учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 262 с.
10. Холщевников, В. В. Исследования людских потоков и методология нормирования эвакуации людей из зданий при пожаре. – М.: МИПБ МВД России, 1999. – 93 с.
11. Холщевников В. В. Моделирование людских потоков // Моделирование пожаров и взрывов. Глава 7. – М.: Пожнаука. – 2000. – С. 139–169.

12. Самошин Д. А. Состав людских потоков и параметры их движения при эвакуации: Монография. – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2016. – 210 с.
13. Холщевников В. В. Гносеология людских потоков: Монография. – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2019. – 592 с.
14. СНиП II–2–80. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений. Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1981 – 14 с.
15. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности [Электронный ресурс]: приказ МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382 (в ред. от 02.12.2015). – Режим доступа: <http://www.pravo.gov.ru>
16. ГОСТ 12.1.004–91. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 14.06.1991 № 875) (ред. от 01.10.1993). – М.: Стандартинформ, 2006.
17. Беляев С. В. Эвакуация зданий массового назначения – М.: Издательство Всесоюзной академии художеств, 1938. – 72 с.
18. Холщевников В. В. Людские потоки в зданиях, сооружениях и на территории их комплексов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.10 / Валерий Васильевич Холщевников. – М., 1983. – 442 с.
19. Дувидзон Р. М. Проектирование спортивных сооружений с учетом движения людских потоков: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.10 / Ринат Миронович Дувидзон. – М., 1968. – 173 с.
20. Холщевников В. В., Никонов С. А., Шамгунов Р. Н. Моделирование и анализ движения людских потоков в зданиях различного назначения: Учебное пособие. – М.: МИСИ им. В. В. Куйбышева, 1985. – 75 с.
21. Холщевников В. В., Самошин Д. А., Галушка Н. Н. Обзор компьютерных программ моделирования эвакуации зданий и сооружений // Пожаровзрывобезопасность. – 2002. – Т. 11. № 5. – С. 40–49.
22. Красавин А. В. Анализ технического регламента о требованиях пожарной безопасности на предмет наличия в законе коррупциогенных факторов // Пожарное и спасательное дело. – 2009. – № 5. – С. 50–57.
23. О техническом регулировании [Электронный ресурс]: федер. закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ: (в ред. от 29.07.2017). – Режим доступа: <http://www.pravo.gov.ru>
24. Милинский А. И. Исследование процесса эвакуации зданий массового назначения: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.10 / Анатолий Иванович Милинский. – М., 1951. – 178 с.

25. Холщевников В. В., Копылов В. А. Движение людских потоков через проемы // Пожарное дело. – 1982. – № 3. – С. 24–25.

26. Копылов В. А. Исследование параметров движения людей при вынужденной эвакуации: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.10 / Владимир Андреевич Копылов. – М., 1974. – 145 с.

ХОЛЩЕВНИКОВ Валерий Васильевич
САМОШИН Дмитрий Александрович
ИСТРАТОВ Роман Николаевич
ШАРАНОВА Милена Михайловна

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАЧИ
ДЛЯ ПРОВЕРКИ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ВРЕМЕНИ ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ
В СЛУЧАЕ ПОЖАРА

Учебно-методическое пособие

Часть 1

Подписано в печать 30.09.2019. Формат 60×90 1/16.
Печ. л. 1,75. Уч.-изд. л. 1,2. Бумага офсетная.
Тираж 30 экз. Заказ 359

Академия ГПС МЧС России
129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, д. 4