

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОГО ВРЕМЕНИ ЭВАКУАЦИИ СМЕШАННОГО ПОТОКА ЛЮДЕЙ В КУЛЬТОВЫХ ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ

Г.Л. Шидловский.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Изложен метод определения расчетного времени эвакуации для смешанного потока, содержащего людей из маломобильных групп населения. Рассмотрены некоторые проблемы стандартизованного метода расчета и показана его адаптация для смешанного потока. Дан пример расчета времени эвакуации для изучаемого случая.

Ключевые слова: безопасность людей, массовое пребывание людей

DEFINITION OF THE ESTIMATED TIME OF EVACUATION THE MIXED STREAM OF PEOPLE IN CULT BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

G.L. Shidlovsky. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The method of definition of an estimated time of evacuation for the mixed stream containing people from маломобильныхof groups of the population is stated. Some problems of the standardized method of calculation are considered and its adaptation for the mixed stream is shown. The example of calculation of time of evacuation for a studied case is set.

Key words: safety of people, mass stay of people

Современный этап развития городов характеризуется наличием большого количества зданий с массовым пребыванием людей, в том числе с ограниченной мобильностью (детей, пожилых людей, инвалидов, людей с вещами и багажом) – торгово-развлекательных комплексов, театров, вокзалов, аэропортов, а также культовых зданий и сооружений. Обеспечение безопасности людей путем эвакуации в случае пожара (а в последнее время – и при угрозе террористического акта) является одной из важнейших задач.

С этой целью были разработаны и стандартизованы методы расчета времени эвакуации людей t_p и необходимого времени эвакуации $t_{нб}$ до наступления какого-либо из опасных факторов пожара (ОФП) – повышенной температуры, потери видимости из-за задымления, пониженного содержания кислорода или опасной концентрации токсичных продуктов сгорания. На основании сопоставления значений t_p и $t_{нб}$ оценивается вероятность предотвращения воздействия ОФП на людей и делается вывод о приемлемости проекта строительства или реконструкции здания либо о необходимости его изменения.

Стандартизованный метод расчета t_p основывается на большом объеме экспериментальных данных [1, 2] о движении людей по различным участкам эвакуационного пути и широко используется соответствующим кругом специалистов, в частности, сотрудниками ГПС при экспертизе проектов.

Однако он, по умолчанию, предполагает, что эвакуируются только люди без ограничений по мобильности (группа М1 по СНиП [3]) и, кроме того, данный метод обладает рядом других недостатков [4].

Представляется необходимым рассмотреть возможность определения t_p при эвакуации смешанного потока, частично содержащего людей из маломобильных групп

населения (МГН) – М2, М3 и М4, для чего необходимо остановиться на основных положениях расчетного метода [1].

Основные положения известного метода расчета времени эвакуации

Сущность известного метода определения t_p заключается в следующем:

а) весь эвакуационный путь разделяется на n участков, первым из которых является участок от наиболее удаленного места нахождения человека, а расчетное время эвакуации определяется как сумма времени движения по участкам:

$$t_p = \sum_{i=1}^n l_i v_i + \Delta t_i, \quad (1)$$

где l_i, v_i – длина i -го участка и скорость движения людей по нему соответственно; Δt_i – время задержки движения людей на i -м участке из-за возникновения скопления (если скопления нет, то = 0);

б) скорость движения людей v зависит от плотности людского потока D и вида пути (горизонтальный путь, лестница, пандус), для чего в ГОСТ [5] дана таблица, где представлены зависимости скорости v от плотности D и от интенсивности q (индекс для простоты опущен). Известны также аналитические зависимости $v(D)$ и $q(D)$ [3, 6]:

$$v = \begin{cases} v_0 n p u D \leq D_0 \\ v_0 (1 - a_0 \ln D / D_0) n p u D > D_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$q = v D, \quad (3)$$

где v_0, a_0, D_0 – параметры, зависящие от вида пути и группы мобильности эвакуирующихся (М1 – ограничений по мобильности нет; М2 – пожилые и немощные люди, инвалиды на протезах, инвалиды по зрению, люди с психическими отклонениями; М3 – инвалиды с костылями или палками; М4 – инвалиды на креслах-колясках с ручным приводом) и представленные в табл. (рис. 1–4).

в) для 1-го участка находится плотность людского потока

$$D_1 = F / l_1, \quad (4)$$

где F, l_1, δ_1 , – соответственно общая площадь горизонтальной проекции людей на первом участке, его длина и ширина.

$$F = N f,$$

где N – количество людей на первом участке, $f \approx 0,1 \text{ м}^2$ – средняя площадь горизонтальной проекции человека.

г) по величине D_1 с использованием табл. 2 [1] или выражений (2) и (3) находится скорость v_1 , и интенсивность движения q_1 ; для дверного проема шириной $\delta_n < 1,6 \text{ м}$ и плотности потока $D_1 \geq 0,9 \text{ м}^2/\text{м}^2$ интенсивность движения следует определять по формуле:

$$q_n = 2,5 + 3,75 \delta_n \quad (5)$$

Таблица 1. Параметры различных групп мобильности людей

Участок пути	Группы мобильности											
	M1($f=0,1\text{м}^2$)			M2($f=0,2\text{м}^2$)			M3($f=0,3\text{м}^2$)			M4($f=0,96\text{м}^2$)		
	V_0	A_0	D_0	V_0	A_0	D_0	V_0	A_0	D_0	V_0	A_0	D_0
Г	100	0,295	0,051	30	0,335	0,135	70	0,35	0,102	60	0,4	0,135
ЛВН	100	0,4	0,089	30	0,346	0,139	20	0,454	0,208	–	–	–
ЛВВ	60	0,305	0,067	20	0,348	0,126	25	0,347	0,120	–	–	–
ПВН	115	0,399	0,171	45	0,438	0,171	105	0,416	0,122	115	0,424	0,146
ПВВ	80	0,399	0,107	45	0,438	0,171	55	0,446	0,136	40	0,42	0,150
ДП	$q_{\text{MAX1}}=19,6$ м/мин			$q_{\text{MAX2}}=9,7$ м/мин			$q_{\text{MAX3}}=17,6$ м/мин			$q_{\text{MAX4}}=16,4$ м/мин		

Примечание: Размерности: V_0 – м/мин; A_0 – безразмерный; D_0 – $\text{м}^2/\text{м}^2$; f – средняя площадь горизонтальной проекции человека; Г – горизонтальный путь; ЛВн – лестница вниз; ЛВв – лестница вверх; ПВн – пандус вниз; ПВв – пандус вверх; Дп – дверной проем.

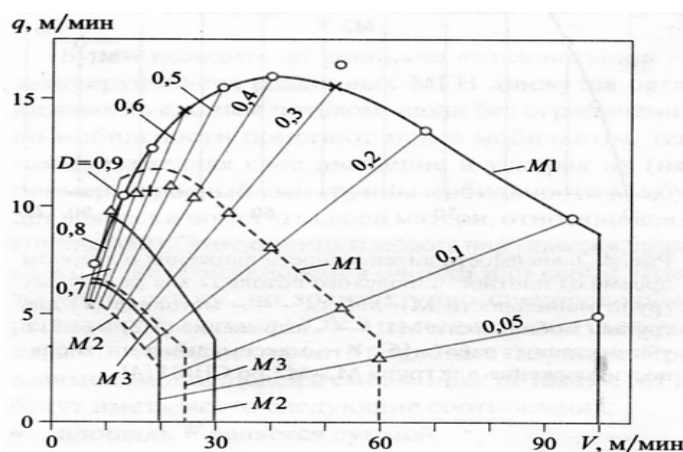


Рис. 1. Номограмма «интенсивность – скорость движения» на горизонтальном участке эвакуационного пути с учётом плотностей людского потока D для различных групп мобильности M1–M4: о – методика [5]; СНИП [3]; х – данные публикации [14]

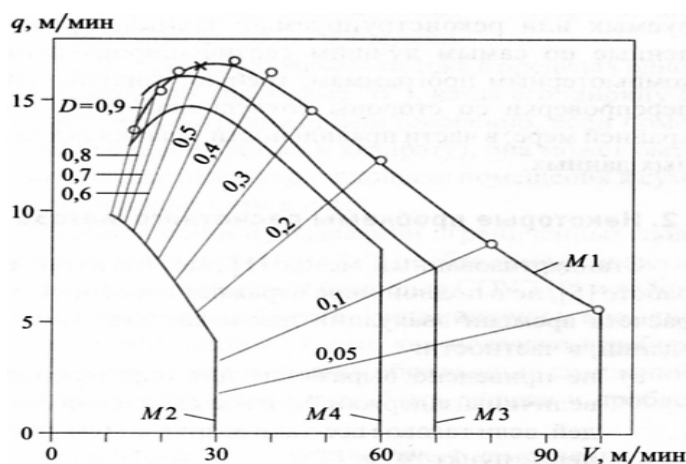


Рис. 2. Номограмма «интенсивность – скорость движения» на лестнице с учётом плотностей людского потока D для различных групп мобильности M1–M4: о, Δ – методика [5] для движения вверх и вниз соответственно; - - - СНИП [3] для движения вверх и вниз соответственно; +, x – данные публикации [14]

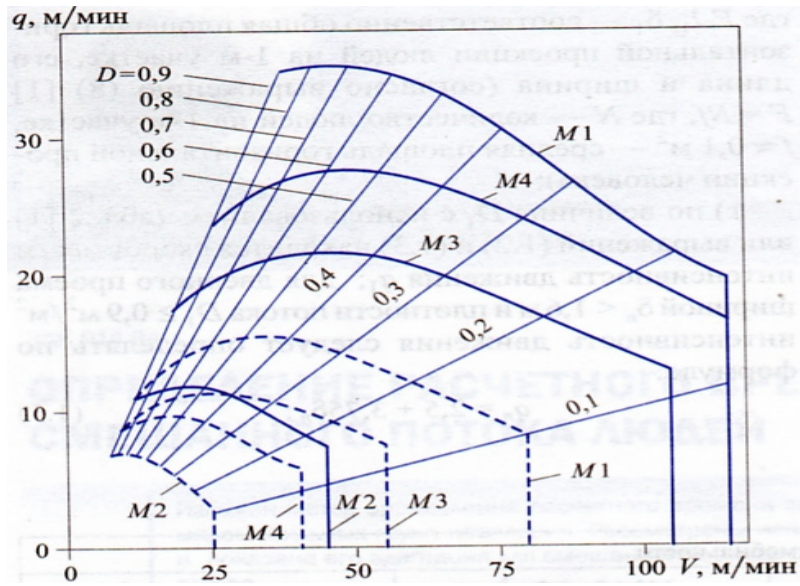


Рис. 3. Номограмма «интенсивность – скорость движения» на пандусе с учётом плотностей людского потока D для различных групп мобильности М1–М4- - СНиП [3] для движения вверх и вниз соответственно

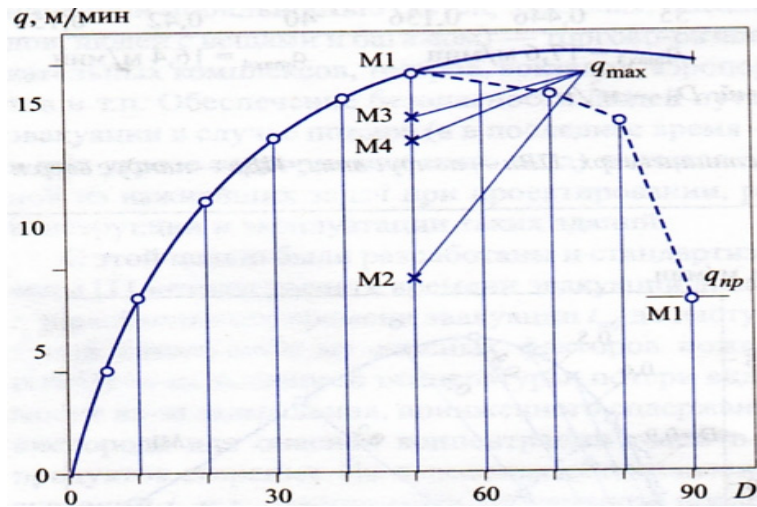


Рис. 4. Зависимость интенсивности движения в дверном проёме плотностей людского потока D для различных групп мобильности М1–М4: o - - методика [5] для групп мобильности М1; - выражения (2) и (3) с учетом данных работы [6]; x - максимальная интенсивность для групп М2–М3 по СНиП [3]

Для второго и последующих участков определяются интенсивности движения людского потока:

– нет слияния потоков

$$q_i = q_{i-1} \delta_{i-1} / \delta_i$$

(для дверного проема $q_n = q_i \delta_i / \delta_n$);

– имеет место слияние нескольких людских потоков:

$$q_1 = S / \delta_1 ,$$

где S – сумма произведений интенсивностей на ширину путей для сливающихся потоков;

д) если выполняется условие:

$$q_1 < q_{max} \text{ или } q_n < q_{max} \quad (6)$$

для горизонтальных путей $q_{max} = 16,5$ м/мин; для дверных проемов $q_{max} = 19,6$ м/мин; для лестницы вниз $q_{max} = 16$ м/мин; для лестницы вверх $q_{max} = 11$ м/мин), то скопления людей не образуется и $\Delta t_i = 0$, а если условие (6) не выполняется, то образуется скопление людей и необходимо учитывать возникающую задержку. Плотность потока D_{max} , при которой имеет место максимальная интенсивность q_{max} , с учетом выражений (2) и (3) может быть найдена из равенства (аналогичная формула приведена в работе [6]):

$$D_{max} = D_0 \exp(a_0^1 - 1);$$

е) полученные данные подставляются в выражение (1). Если

$$t_p + t_{нэ} < t_{нб} ,$$

где $t_{нэ}$ – промежуток времени между началом пожара и началом эвакуации, то вероятность успешной эвакуации считается весьма высокой (99,9 %).

К настоящему времени созданы компьютерные программы, моделирующие процесс эвакуации [7], но неоспоримое достоинство метода [5] в его прозрачности.

В тоже время расчеты t_p для конкретных проектируемых или реконструируемых зданий, проведенные по самым лучшим сертифицированным компьютерным программам, требуют тщательной перепроверки со стороны сотрудников ГПС, по крайней мере, в части правильности задания исходных данных.

Некоторые проблемы расчетного метода

Стандартизованный метод [5], как показано в работе [4], не в полной мере отражает особенности расчета времени эвакуации для некоторых типов зданий, в частности:

– не приведено выражение для определения величины задержки Δt_i из-за скопления людей, если таковое все-таки возникает;

– не учитываются криволинейность участков путей эвакуации и повороты людских потоков на них;

– не в полной мере принимаются во внимание особенности слияния и разделения людских потоков;

– не учитываются усталостные явления при движении людей [8];

– величина $t_{нэ}$ принимается одинаковой для всех этажей, лежащих выше этажа пожара, что может привести к скоплениям в лестничных клетках при одновременном начале эвакуации большого числа людей и не предполагает оперативного управления эвакуацией с использованием системы оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ) [9];

– кроме того (и это исключительно важно для объектов с массовым пребыванием людей – театров, концертных залов, торговых комплексов, вокзалов, лечебных заведений и

т.п.), не определена методика расчета времени эвакуации смешанных людских потоков, содержащих различные МГН – от М1 до М4, хотя параметры этих потоков в отдельности приведены в СНиП [3].

Большинство указанных проблем может быть решено с использованием выражений и подходов, изложенных в работах [10–12]. В частности, время задержки (проблема «а») может быть определено по выражению:

$$\Delta t_i \approx F[(q_{np} \delta_c) - (q_i \delta_i)] - (q_i \delta_i)^{-1}, \quad (7)$$

где δ_c – ширина проема или следующего участка, перед которым возникает скопление; q_{np} – предельная интенсивность, которая для проема шириной не менее 1,6 м равна 8,5 м/мин (для проема уже 1,6 м используется выражение (5), для лестницы вниз – 7,2 м/мин, для лестницы вверх – 9,9 м/мин.

При повороте людского потока в пределах одного помещения (проблема «б»), когда его ширину δ_i определить затруднительно (особенно, если помещение в плане близко к квадрату), она может быть оценена как отношение площади помещения к суммарной длине пути в нем.

При слиянии и разделении ограниченных людских потоков (проблема «в») необходимо осуществлять управление ими с помощью СОУЭ [9] и действий персонала объекта (установление времени начала эвакуации $t_{нэ}$), что, как показано в работе [13], может предотвратить образование скоплений.

Подобным образом может быть решена и проблема «д».

Проблема «г» – усталостного замедления движения эвакуирующихся – будет рассмотрена в отдельной статье (разрабатывается соответствующая математическая модель), здесь же остановимся на проблеме «е» – оценке величины t_p при движении смешанного людского потока, содержащего различные МГН.

Нужно отметить еще и то, что существуют некоторые расхождения между стандартизованными данными [5] и результатами расчетов по СНиП [3] или выражениям (2) и (3). Это частично поправлено в работе [14] (рис. 2, сплошная кривая М1), но расхождения для движения вверх по лестнице для группы М1 достаточно ощутимы (рис. 2, пунктирная кривая М1).

Еще более заметны расхождения интенсивностей движения людей группы М1 в дверном проеме при $D > 0,5$ (рис. 4) для стандартизованных [5] и расчетных [3] данных – в работе [6] приведено: $a_0 = 0,295$, $D_0 = 0,65$ чел./м² ($\approx 0,065$ м²/м²), для активной и повышенной активности категорий движения v_0 (90; 120) м/мин [6], что соответствует стандартизованному значению [5] $v_0 \approx 100$ м/мин.

Кроме того, в СНиП [3] представлены только величины максимальной интенсивности q_{max} движения в дверном проеме различных групп мобильности, но не даны предельные интенсивности q_{np} , что затрудняет оценку времени задержки по выражению (7).

Эта проблема преодолевается путем введения соотношения

$$q_{np} = k_q q_{max}, \quad (8)$$

где $k_q < 1$ – коэффициент снижения интенсивности, который может быть принят по группе М1 [5]: $k_q = 8,5/19,6 \approx 0,43$.

Адаптация метода расчета времени эвакуации для смешанного потока

Будем исходить из принципа взаимопомощи – эвакуирующиеся различных МГН движутся организованно единым потоком, люди без ограничений по мобильности помогают

менее мобильным, тем самым замедляя свое движение и ускоряя их (например, взрослый сын группы мобильности М1 будет всячески помогать своей матери, относящейся к группе М2). Этот принцип может нарушаться только в случае возникновения паники или явной угрозы ОФП людям, но архитектурно-планировочные решения объектов и СОУЭ на них должны быть таковыми, чтобы исключить подобные ситуации. При взаимопомощи людей в смешанных потоках с МГН будут иметь место следующие соотношения:

– площадь F является суммой

$$F = N_{M1}f_{M1} + N_{M2}f_{M2} + N_{M3}f_{M3} + N_{M4}f_{M4}, \quad (9)$$

где N_{Mi} – число людей i -й МГН ($i=1, \dots, 4$); f_{Mi} – площадь горизонтальной проекции человека i -й МГН (табл. 1);

– выражения (4) и (7) для плотности D_i и времени задержки соответственно остаются в силе, величина F для них определяется по выражению (9);

– скорость общего потока является взвешенной суммой скоростей:

$$v = W_{M1}v_{M1} + W_{M2}v_{M2} + W_{M3}v_{M3} + W_{M4}v_{M4}, \quad (10)$$

где v_{Mi} , W_{Mi} – скорость и вес i -й МГН, которые находятся соответственно из выражений (2) (с учетом табл. 1) и

$$W_{Mi} = N_{mi}f_{mi}/F, \quad i=1, \dots, 4 \quad (11)$$

(очевидно, $W_{M1} + W_{M2} + W_{M3} + W_{M4} = 1$);

– максимальная и предельная интенсивности движения являются взвешенными суммами соответствующих интенсивностей движения МГН:

$$q_{max} = W_{M1}q_{max1} + W_{M2}q_{max2} + W_{M3}q_{max3} + W_{M4}q_{max4} \quad (12)$$

$$q_{np} = W_{M1}q_{np1} + W_{M2}q_{np2} + W_{M3}q_{np3} + W_{M4}q_{np4}, \quad (13)$$

а для дверного проема может быть использовано выражение (8).

Такой подход позволяет провести объективную оценку расчетного времени эвакуации из многих зданий и сооружений людей различных групп мобильности, используя стандартный метод [5] с учетом [3]. Подход легко алгоритмизируется, благодаря чему составлена соответствующая компьютерная программа.

Пример расчета времени эвакуации смешанного потока

В православном храме (Владимирской иконы Божьей матери) при проведении богослужения может находиться 700 человек различных групп мобильности (предположительно: М1 – 400 чел., М2 – 200 чел., М3 – 100 чел.). Требуется оценить величину времени их эвакуации t_p при возможном пожаре или угрозе теракта в храме, где этот храм расположен, когда СОУЭ указан путь «молельный зал – площадка – лестница вниз – вестибюль» (рис. 5).

Поскольку ожидается, что прихожане групп М2 и М3 на службе могут быть со своими родственниками группы М1, а также что СОУЭ срабатывает своевременно и правильно, эвакуирующиеся будут двигаться единым смешанным потоком. Как видим из рис. 5, путь эвакуации состоит из 4-х участков – их параметры приведены в табл. 2, а $N_{m1}=400$, $N_{M2}=200$, $N_{m3}=100$, $N_{m4}=0$. По выражениям (9) – (12) и (8) получаем:

$$F=400*0,1+200*0,2+100*0,3+0*0,96=413,4 \text{ м}^2;$$

$$w_{m1}=400*0,1/413,4\approx 0,0967;$$

$$w_{m2}=200*0,2/413,4\approx 0,0967;$$

$$w_{m3}=100*0,3/413,4\approx 0,0725;$$

$$q_{maxn}=0,0967*19,6+0,0967*9,7+0,0725*17,6\approx 4,2 \text{ м/мин.};$$

$$q_{np}=0,275*4,2\approx 1,155 \text{ м/мин.};$$

$$D=413,4/1500=0,2756;$$

$$V_1=0,0967*100+0,0967*30+0,0725*70=17,646 \text{ м/мин.};$$

$$q_1=17,646*0,2756=4,863 \text{ м/мин.};$$

Пользуясь этими данными, а также табл. 1 и выражениями (2), (3) и (10), получаем обобщенные зависимости $q(v)$ (рис. 6).

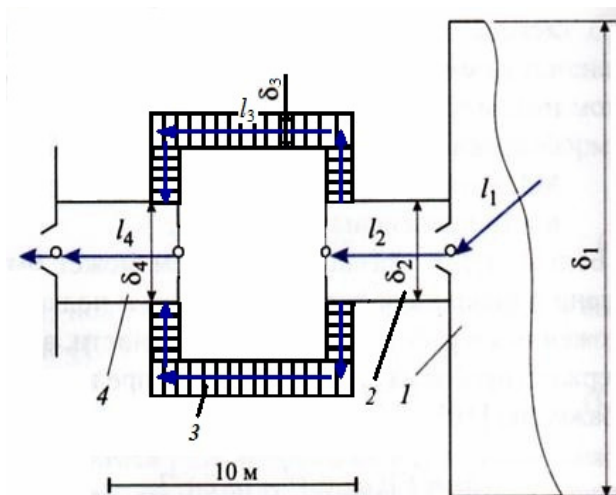


Рис. 5. Схема пути эвакуации смешанного потока в рассматриваемом примере:
1 – молельный зал; 2 – площадка; 3 – лестница вниз; 4 – вестибюль.

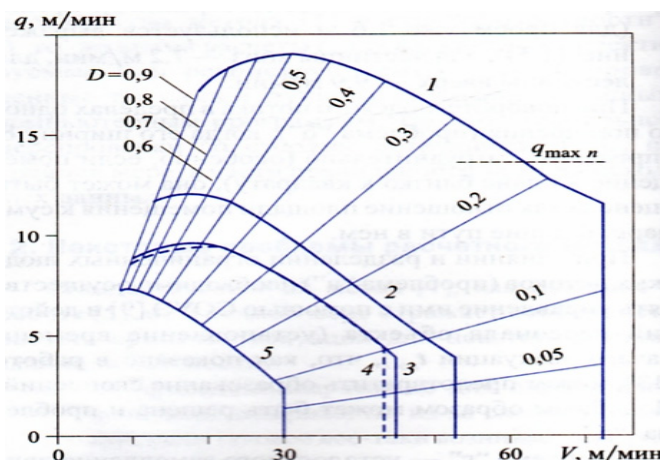


Рис. 6. Номограмма «интенсивность–скорость движения» смешанного людского потока (40% – М1; 50% – М2; 10% – М3) для различных участков эвакуационного пути:
1 – пандус вниз; 2 – горизонтальный путь; 3 – лестница вниз; 4 – пандус вверх; 5 – лестница вверх; - - - максимальная интенсивность в дверном проёме

Таблица 2. **Параметры эвакуационного пути и временные интервалы**

i	Участок пути	$l_i, \text{м}$	$\delta_i, \text{м}$	$\delta_n, \text{м}$	$l_i/v_i, \text{мин}$	$\Delta t_i, \text{мин}$
1	Молельный зал	50	30	1,5	2,833	2,092
2	Площадка	5,0	4	–	1,564	–
3	Лестница вниз	6,0	2	–	2,554	–
4	Вестибюль	7,0	4	1,5	1,2	–
$t_p, \text{мин}=10,243$						
<i>Примечание:</i> длина первого участка выбрана с учётом движения последнего эвакуирующегося из дальнего угла молельного зала						

Результаты расчетов, проведенные с использованием компьютерной программы, реализующей изложенный выше подход, сведены также в табл. 2. Как видим, скопление может возникнуть на выходе из молельного зала и выхода из вестибюля, а расчетное время эвакуации не превышает 10,3 мин.

При этом максимально учитываются стандартизованные выражения, приведенные в ГОСТ 12.4.001-91* [1] и СНиП 35-01-2001 [4], а также разработки специалистов в области движения людских потоков.

Литература

1. Предтеченский В.М., Милинский А.И. Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1979.
2. Холщевников В.В. Исследования людских потоков и методология нормирования эвакуации людей при пожаре. М.: МИПБ МВД России, 1999.
3. СНиП 35-01-2001. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения. Обязательное приложение В. М.: Госстрой России, 2001.
4. Танклевский Л.Т., Таранцев А.А. О некоторых проблемах расчетных методов эвакуации // Пожарная безопасность. 2004. № 5. С. 112–117.
5. ГОСТ 12.4.001-91*. Пожарная безопасность. Общие требования. Обязательное приложение 2* «Метод определения уровня обеспечения пожарной безопасности людей». М.: Стандартинформ, 2006.
6. Холщевников В.В. Психофизиологические закономерности поведения людей при движении в пешеходных потоках // Пожаровзрывобезопасность. 2005. Т. 14. № 4. С. 38–54.
7. Холщевников В.В., Самошин Д.А., Галушка Н.Н. Обзор компьютерных программ моделирования эвакуации из зданий и сооружений // Пожаровзрывобезопасность. 2002. Т. 11. № 5. С. 40–49.
8. Холщевников В.В. Проблема беспрепятственной эвакуации людей из зданий, пути ее решения и оценки // Пожаровзрывобезопасность. 2006. Т. 15. № 1. С. 30–35.
9. НПБ 104-03. СОУЭ при пожарах в зданиях и сооружениях. [Электронный ресурс] URL: <http://ppmspb.ru/index.php/statiyi/8-nbp-104-03> (дата обращения: 15.05.2012).
10. Пожарная профилактика в строительстве: учебник. / под ред. В.Ф. Кудаленкина. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1985.
11. Ройтман М.Я. Пожарная профилактика в строительном деле / под ред. Н.А. Стрельчука. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1975.
12. Ройтман М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1985.
13. Танклевский Л.Т., Юн С.П., Таранцев А.А. О возможности оптимизации движения эвакуирующихся из многоэтажных зданий // Пожаровзрывобезопасность. 2005. Т. 14. № 1. С. 53–55.
14. Самошин Д.А. Расчет времени эвакуации людей. Проблемы и перспективы // Пожаровзрывобезопасность. 2004. Т. 13. № 1. С. 33–46.
15. Таранцев А.А. Методы расчета времени эвакуации людей из зданий и сооружений: учеб. пособ. / под ред. В.С. Артамонова. СПб.: СПб ун-т ГПС МЧС России, 2009. С. 16–22.