

УДК 614.841.33

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫНУЖДЕННОЙ ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ В ПОМЕЩЕНИИ ЗРИТЕЛЬНОГО ЗАЛА С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЛЮДСКОГО ПОТОКА В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЛЮДЕЙ ПРИ ПОЖАРЕ

Полоз Д.А.

*В статье подчеркивается актуальность исследования процесса движения людей в зрительных залах, необходимость разработки новых расчетных методов определения расчетного времени вынужденной эвакуации людей, учитывающих неоднородность людского потока. Кратко приводятся основные результаты исследований. С учетом ранее опубликованных материалов предлагается математическое описание процесса движения людей. Результаты моделирования вынужденной эвакуации сравниваются с экспериментальными и теоретическими данными.*

(Поступила в редакцию 22 декабря 2008 г.)

### Введение

В Республике Беларусь существует достаточно развитая сеть кинотеатров, театров, клубов, домов и дворцов культуры, спортивных сооружений, цирков и других зрелищных и культурно-просветительных учреждений. Ежегодно посетителями подобных учреждений становятся миллионы белорусских граждан самого различного возраста.

К сожалению, мировая история знает немало случаев, когда крупные пожары в зданиях с массовым пребыванием людей сопровождаются огромными человеческими жертвами. Чаще всего трагические последствия наблюдаются в помещениях зрительных залов. Основной причиной гибели и травмирования зрителей является воздействие на людей предельно допустимых уровней опасных факторов пожара: пламени и искр, повышенной температуры окружающей среды, токсичных продуктов горения и термического разложения, дыма, пониженной концентрации кислорода.

Вынужденная эвакуация людей является одним из самых простых и распространенных способов обеспечения безопасности людей при пожарах в зданиях и сооружениях различного назначения, в том числе в помещениях зрительных залов. В последнее время изучению явления вынужденной эвакуации людей, а также способам определения расчетного времени вынужденной эвакуации людей уделяется повышенное внимание.

### Проблемные моменты определения расчетного времени вынужденной эвакуации людей в Республике Беларусь

С 1991 г. определение расчетного времени вынужденной эвакуации людей в Республике Беларусь осуществляется по методике [1]. Наличие целого ряда недостатков, подробно описанных в работах [2–4], существенным образом сказывается на итоговом значении расчетного времени вынужденной эвакуации людей. В результате не всегда правильно и объективно производится оценка соответствия заложенных в проект конструктивных и объемно-планировочных решений требованиям технических нормативных правовых актов системы противопожарного нормирования и стандартизации Республики Беларусь в области обеспечения безопасности людей при пожаре.

Практика показывает, что расчетное время вынужденной эвакуации людей, определенное по методике [1], даже при одних и тех же исходных данных у различных специалистов может быть различным. Кроме этого, до сих пор непонятно, как надо учитывать возможную неоднородность людского потока, когда входящие в его состав люди

существенным образом отличаются друг от друга по антропометрическим данным, возрасту, уровню физической подготовки и здоровья.

Таким образом, только детальное изучение процесса движения людей с учетом обозначенного выше ряда проблем позволяет разработать ряд новых альтернативных подходов, алгоритмов, способов и методов расчета, которые позволяют повысить достоверность и объективность оценки обеспечения безопасности людей при пожаре.

### **Исследование процесса движения людских потоков в зрительных залах**

Первая попытка дифференциации людского потока на группы была предпринята в работе [5]. Данная работа хоть и не имеет никакого отношения к зрительным залам, но все же заслуживает пристального внимания. Принадлежность человека к той или иной группе людей определялась путем рассмотрения его антропометрических данных. В процессе исследований было выделено 3 условные группы людей: школьники младших классов, школьники средних классов, школьники старших классов. Результаты проведенных исследований показали, что при одних и тех же значениях плотности людского потока представители различных групп людей движутся с разными скоростями.

Исследование процесса движения людских потоков в зрительных залах зрелищных и культурно-просветительных и школьных учреждений Республики Беларусь [6] проводилось с учетом отличительных особенностей работы [5]. Предварительно, еще на стадии анализа возможного состава людского потока в зрительных залах, были выделены 5 условных групп людей: группа Г1 – дети дошкольного возраста, школьники младших классов в возрасте от 5 до 9 лет; группа Г2 – школьники средних классов в возрасте от 10 до 14 лет; группа Г3 – школьники старших классов, учащиеся профессионально-технических училищ, техникумов и колледжей в возрасте от 15 до 19 лет; группа Г4 – взрослые люди в возрасте от 20 до 65 лет; группа Г5 – взрослые люди в возрасте от 20 до 65 лет, ведущие детей в возрасте до 5 лет за руку либо несущие их на руках. Полученные в ходе исследований многочисленные результаты натурных наблюдений позволили определить расчетные зависимости скорости движения от плотности людского потока для представителей всех выделенных групп людей и адаптировать их применительно к условиям вынужденной эвакуации для различных видов пути. Кроме этого, было установлено, что, во-первых, представители различных групп людей при одних и тех же значениях плотности людского потока движутся с различными скоростями, причем быстрее всех движутся представители группы Г2, медленнее всех – представители группы Г5, во-вторых, траектория движения каждого отдельно взятого человека не всегда есть прямая линия, особенно ярко этот момент проявляется при переходе людей с одного участка на другой, отличающихся друг от друга как минимум шириной, в-третьих, процесс движения людей в помещениях зрительных залов характеризуется более низкими значениями скорости, что свидетельствует об увеличении итогового значения расчетного времени вынужденной эвакуации людей.

### **Математическое описание процесса движения людей в зрительных залах**

Процесс движения людского потока в зрительном зале состоит из последовательного передвижения людей сначала по проходам между рядами мест для зрителей, а затем по объединяющим их продольным и поперечным проходам в направлении эвакуационных выходов. В ходе движения люди могут останавливаться, ускоряться, обгонять друг друга, выбирая при этом оптимальную для себя траекторию движения. В большинстве случаев траектория движения отдельно взятого человека представляет собой ломаную линию.

Каждый из участников процесса движения людей в фиксированный момент времени относится только к одному эвакуационному участку. При достижении его конца человек переходит на следующий эвакуационный участок, а если их несколько, то на один из них. В случае если на пути движения человека появляется другой человек, движущийся с более медленной скоростью, то траектория его движения изменится. Более быстрый человек обходит более медленного человека под углом до  $45^\circ$ , после чего продолжает движение в

сторону конца рассматриваемого эвакуационного участка параллельно его краям. Корректировка направления движения человека может производиться также и в случае изменения ширины следующего эвакуационного участка, а именно: при увеличении ширины – на угол до  $30^\circ$ , при ее уменьшении – на угол до  $45^\circ$ . С учетом вышесказанного очевидно, что одной из характеристик процесса движения человека является направление. Единичный вектор направления движения человека  $\vec{r}$  в точке определяется с учетом двух факторов: расположения конца эвакуационного участка, которого стремится достичь человек, и неравномерности людского потока вблизи данного человека и стремления последнего занять наиболее комфортное место в людском потоке. Итоговое направление  $\vec{r}$  движения каждого отдельного человека может корректироваться на угол до  $45^\circ$  от направления, задаваемого вектором  $\vec{r}^1$ , посредством добавления составляющей  $\vec{r}^2$ , позволяющей человеку оптимизировать свое положение в людском потоке, обходя препятствия и покидая области локального скопления людей. При определении вектора  $\vec{r}^2$  необходимо учитывать, что для того чтобы занять наиболее удобное положение для движения в людском потоке, каждый человек стремится как можно более отдалиться от своих соседей. Причем чем ближе сосед, тем больше помех он создает при движении и тем больше стремление человека к отдалению от него. В этой связи можно считать, что между участниками движения существуют «силы отталкивания», придающие скорости каждого из участников движения составляющую, направленную в противоположную сторону от соседа и имеющую относительную величину, обратно пропорциональную квадрату расстояния между людьми. При этом, учитывая расчетную форму горизонтальной проекции человека и неоднородность его восприятия вдоль осей этого эллипса, расстояние между людьми целесообразно считать неевклидовым, учитывающим указанную неоднородность вдоль осей. Предполагаем, что горизонтальные проекции людей не пересекаются. Каждую из горизонтальных границ участка эвакуации также будем считать отталкивающей человека, подобно другому участнику эвакуации.

Тогда если координаты рассматриваемого человека  $(x, y)$ , а остальных участников людского потока  $(x_i, y_i)$ ,  $i = \overline{1..n}$ , то:

$$h_x = \sum_{i, (a/c)^2(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 \leq 9a^2} \frac{(x-x_i)/\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{(a/c)^2 \max\{x-x_i-c, 0\}^2 + \max\{y-y_i-a, 0\}^2}, \quad (1)$$

$$h_y = \frac{1}{\max\{y - \min\{a, c\}/2, 0\}^2} - \frac{1}{\max\{H - y - \min\{a, c\}/2, 0\}^2} + \sum_{i, (a/c)^2(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 \leq 9a^2} \frac{(y-y_i)/\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{(a/c)^2 \max\{x-x_i-c, 0\}^2 + \max\{y-y_i-a, 0\}^2} \quad (2)$$

Вектор  $\vec{r}^2$  коллинеарен вектору  $\overline{(h_x, h_y)}$ , однако его длину следует нормировать таким образом, чтобы она не превосходила  $\text{tg}45^\circ = 1$ . При этом, будем считать, что максимального значения длина вектора отталкивания  $\vec{r}^2$  достигает в ситуации, когда два человека находятся друг от друга на расстоянии не более  $a/3$ . Следовательно:

$$r_x^2 = \frac{h_x a^2 \min\left\{9/a^2, \sqrt{(h_x)^2 + (h_y)^2}\right\}}{9\sqrt{(h_x)^2 + (h_y)^2}}, \quad (3)$$

$$r_y^2 = \frac{h_y a^2 \min \left\{ 9/a^2, \sqrt{(h_x)^2 + (h_y)^2} \right\}}{9 \sqrt{(h_x)^2 + (h_y)^2}}. \quad (4)$$

Итоговое мгновенное направление движения человека может быть найдено как

$$\vec{r} = \frac{\vec{r}^1 + \vec{r}^2}{|\vec{r}^1 + \vec{r}^2|}. \quad (5)$$

Определенное таким образом направление движения не более чем на 45° отклоняется от вектора  $\vec{r}^1$ , направленного в сторону выхода с эвакуационного участка. Остальные особенности процесса движения людей, а также правила перехода людей с одного эвакуационного участка на другой описаны в работах [7, 8].

### Моделирование процесса вынужденной эвакуации людей в помещении зрительного зала

Перечисленные выше особенности процесса движения людей были реализованы в виде специального программного обеспечения. Это позволило существенно упростить процедуру определения расчетного времени вынужденной эвакуации людей и производить оценку с учетом возможной неоднородности людского потока. Таким образом, был совершен следующий шаг в области моделирования процесса вынужденной эвакуации людей в Республике Беларусь. Эффективность моделирования процесса эвакуации людей из помещения зрительного зала с помощью данной программы оценивалось экспериментально. Кроме этого, полученные результаты сравнивались с результатами теоретических вычислений по методике [1]. Полученные результаты были сведены в таблицу.

Таблица – Результаты определения расчетного времени вынужденной эвакуации людей из зрительного зала Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь

Метод расчета	Расчетное время вынужденной эвакуации людей из зрительного зала $t_p$ , с					
	расчетная схема эвакуации № 1	расчетная схема эвакуации № 2	расчетная схема эвакуации № 3	расчетная схема эвакуации № 4	расчетная схема эвакуации № 5	расчетная схема эвакуации № 6
Эксперимент	61,21	50,78	51,67	33,83	35,92	31,28
Программа	76,92	73,29	72,24	69,08	70,19	65,71
ГОСТ 12.1.004-91	218,88	206,70	203,40	90,05	92,88	92,58

### Заключение

Моделирование процесса вынужденной эвакуации людей с помощью специально разработанного программного обеспечения позволило оценить расчетное время вынужденной эвакуации людей с учетом возможной неоднородности состава людского потока. Результаты, приведенные в таблице, свидетельствуют о том, что расчетное время вынужденной эвакуации людей, определенное по методике [1], является существенно завышенным, а с помощью разработанной программы – более достоверным.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91. – Введ. 01.07.92. – М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР: Изд-во стандартов, 1992. – 78 с.
2. Дмитриченко, А.С. Новый подход к расчету вынужденной эвакуации людей при пожарах / А.С. Дмитриченко, С.Л. Соболевский, С.А. Татарников // Пожаровзрывобезопасность. – 2002. – № 6. – С. 50–53.
3. Самошин, Д.А. Расчет времени эвакуации. Проблемы и перспективы / Д.А. Самошин // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – № 1. – С. 33–46.
4. Транклевский, Л.Т. О некоторых проблемах расчетных методов эвакуации / Л.Т. Транклевский, А.А. Таранцев // Пожарная безопасность. – 2004. – № 5. – С. 40–49.
5. Холщевников, В.В. Нормирование путей эвакуации в учебных заведениях / В.В. Холщевников // Пожарное дело. – 1980. – № 12. – С. 26–29.
6. Дмитриченко, А.С. Исследование параметров смешанных людских потоков в помещениях с массовым пребыванием людей / А.С. Дмитриченко, Д.А. Полоз // Вест. Командно-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь. – 2007. – № 2 (6). – С. 88–97.
7. Математическая модель определения времени вынужденной эвакуации людей из помещений при пожаре / А.С. Дмитриченко [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2005. – № 8 (18). – С. 43–48.
8. Дмитриченко, А.С. Дифференцированная методика определения расчетного времени вынужденной эвакуации людей из помещений с массовым пребыванием людей / А.С. Дмитриченко, С.Л. Соболевский, Д.А. Полоз // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2007. – № 2 (22). – С. 107–121.