

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ «ЦЕПОЧКОЙ» В КУЛЬТОВЫХ ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ

Г.Л. Шидловский;

В.Я. Пророк, доктор технических наук.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Рассмотрена задача движения людей «цепочкой», выведены аналитические соотношения для расчета параметров движения группы людей и получены некоторые количественные оценки.

Ключевые слова: движение людей «цепочкой», защита людей от опасных факторов пожара

MODELLING OF MOVEMENT OF PEOPLE «CHAIN» IN CULT BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

G.L. Shidlovsky; V.Ya Prorok.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The problem of movement of people «chain» is considered, analytical parities for calculation of parameters of movement of group of people are deduced and some quantitative estimations are received.

Key words: movement of people by «chain», protection of people against dangerous factors of a fire

Защита людей от воздействия опасных факторов (пожара, угрозы взрыва, затопления и др.) является одной из актуальных задач. Ее успешное решение предполагает определение временных характеристик движения людей, например, в случае эвакуации – людского потока [1], в случае тушения пожара или ЧС – пожарных или спасателей [2, 3].

К настоящему времени проведен большой объем экспериментальных и теоретических исследований людских потоков [4, 5], который, будучи реализован в ГОСТе [1], позволяет определить время эвакуации людей из зданий при угрозе воздействия на них опасных факторов пожара. В расчете предполагается, что скорость движения людского потока по основным участкам (горизонтальный путь, лестница вверх, лестница вниз, дверной проем) зависит только от плотности D людского потока и является величиной детерминированной. Расчетное время эвакуации с учетом схемы движения людских потоков, их слияния, задержки и изменения ширины эвакуационного пути также находится в детерминированном виде.

Другой разновидностью модели движения людей является их свободное перемещение по открытой местности (например, эвакуирующихся из опасной зоны или спасателей) [5]. При этом предполагается, что на начальном участке они расположены случайно с плотностью $\varphi_0(x)$, скорость их движения также случайна и имеет плотность распределения $\psi(v)$, не зависящую от времени, взаимовлияние людей при движении несущественно. Итогом расчета является нахождение плотности распределения $\varphi(x,t)$ людей по эвакуационному пути в любой момент времени t и оценка с ее помощью вероятности выхода людей из опасной зоны к моменту t_* (например, взрыв) или времени выхода из этой зоны всех людей. В работе [6] изложен порядок нахождения $\varphi(x,t)$ в аналитическом виде на основе композиции распределений $\varphi_0(x)$ и $\psi(v)$.

Еще одной разновидностью потоков является движение людей по участкам, где их скорость не зависит от плотности D – турникеты, эскалаторы [7], аварийные лестницы [4] и

т.п., которые хотя и не являются эвакуационными путями по ФЗ-123, но обеспечивают выход людей и передвижение пожарных [2] и спасательных подразделений. Поскольку подход, изложенный в ГОСТе [1], к таким участкам в принципе неприменим.

Еще одной разновидностью потока, которой пока еще не уделено должного внимания является движение людей «цепочкой» – эвакуация по ненормируемым винтовым лестницам в культовых зданиях и сооружениях движение звеньев спасателей и т.п.

Моделирование движения «цепочкой»

Для описания движения «цепочки» людей примем следующие допущения:

- люди движутся один за другим (рис. 1);
- скорость движения каждого человека v_i (кроме направляющего) зависит только от расстояния Δx_i от него до предыдущего человека (то есть инерционность незначительна, человек реагирует быстро на перемещение предыдущего) и от вида пути;
- скорость движения направляющего ($i=1$) максимальна для данного вида пути:
 $v_1 = v_{max}$;
- люди обладают равными физическими возможностями.

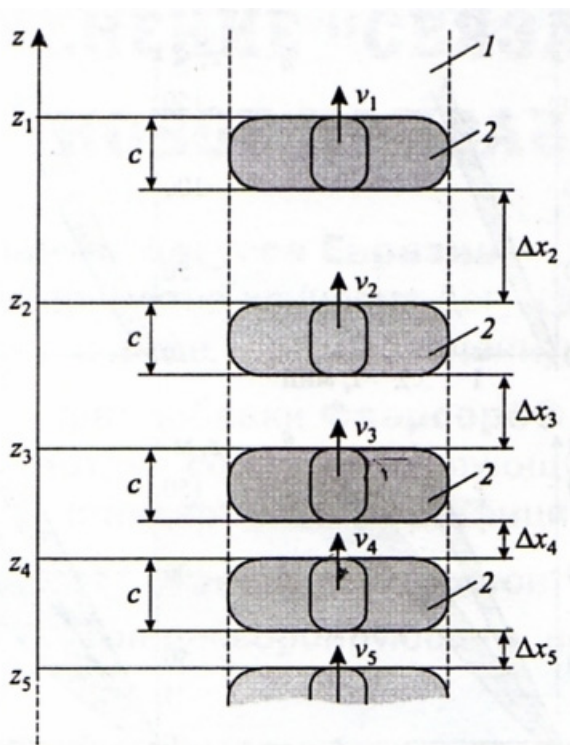


Рис. 1. Схема движения людей «цепочкой» (1 – путь; 2 – участник движения)

Математически для какого-либо вида пути это можно описать системой дифференциальных уравнений 1-го порядка:

$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = v_1 = v_{max}; \\ \frac{dz}{dt} = v_i = f(z_{i-1} - z_i - c); \quad i=2, \dots, N, \end{cases} \quad (1)$$

где z_i, v_i – координата положения и скорость i -го человека соответственно; t – время, отсчитываемое от момента начала движения; c – «толщина» человека [4]; f – зависимость скорости движения i -го человека от расстояния до предыдущего, характерная для каждого вида пути; N – число человек в «цепочке».

Решая систему уравнений (1) при начальных условиях $\{z_i(0) = z_{i0}\}$, можно построить графики движения каждого человека $\{z_i(t)\}$. А зная их, можно, в свою очередь, оценить время, когда направляющий достигнет нужного рубежа с координатой z_p ($t_{1p} = (z_p - z_{10}) / v_{max}$); когда этого рубежа достигнет замыкающий – t_{np} ; насколько растянется «цепочка»: $\Delta z = z_1(t) - z_N(t) + c$ и т.д.

Некоторый нюанс заключается в определении зависимости f . Применительно к движению колонны машин, которое также описывалось системой уравнений (1) [8] (c – длина машины; v_{max} – скорость головной машины; N – число машин), в предположении о линейной зависимости f было получено аналитическое выражение:

$$\begin{cases} z_1 = v_{max} t \\ z_i = v_{max} t - (i-1)(c + v_{max} k^{-1}) + \\ + e^{-kt} \sum_{j=1}^{i-1} (kt)^{j-1} \frac{z + (i-j)(c + v_{max} k^{-1})}{(j-1)!} \end{cases} \quad (2)$$

где k – коэффициент пропорциональности между скоростью v и расстоянием Δx .

Из системы (2), например, становится возможным оценить протяженность колонны при установившемся движении:

$$\Delta z \approx (N-1)(c + v_{max} k^{-1}) + c$$

При моделировании движения людей зависимость $f(\Delta x)$ целесообразно уточнить. Для этого можно воспользоваться результатами ранее проведенных исследований зависимости скорости движения людей от плотности потока [4, 5, 9] и логарифмической аппроксимацией [5], после чего представить зависимость $f(\Delta x)$ в виде:

$$f(\Delta x) \approx \begin{cases} 0 \text{ при } D > D_0 \\ v_{max} \left(1 + a \ln \frac{D_k}{D} \right) \text{ при } D \in [D_k, D_0]; \\ v_{max} \text{ при } D < D_k \end{cases} \quad (3)$$

где a, v_{max} – параметры, зависящие от вида пути (горизонтальный, лестница, тоннель с поездом или без поезда [9]); D_k – плотность, ниже которой человек движется с максимальной скоростью; D_0 – плотность, выше которой движение «цепочкой» останавливается.

Плотность при этом для каждого i -го участника движения можно оценить из выражения:

$$D_i \approx \frac{\dot{r}_q}{\delta(z_{i+1} - z_i)} = \frac{c}{c + \Delta x_i} \quad (4)$$

где \dot{r}_q – площадь проекции человека; δ – ширина участка пути.

X, M

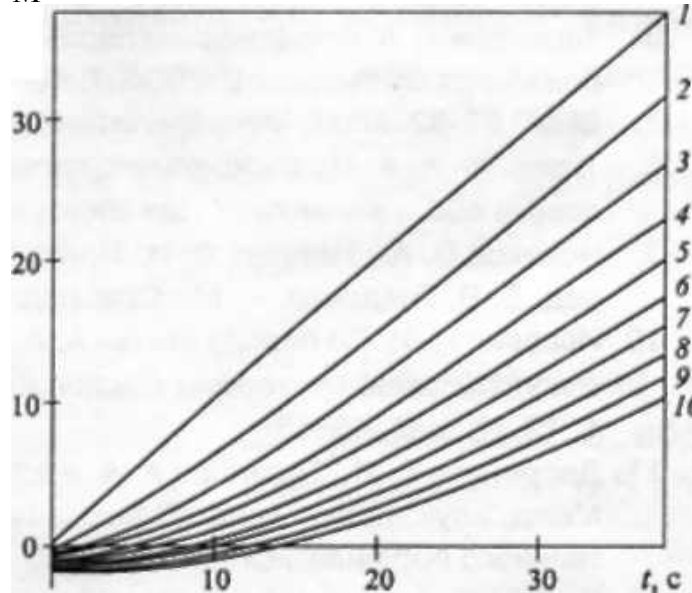


Рис. 2. Динамика движения «цепочки» из 10 человек по винтовой лестнице (цифрами обозначены порядковые номера участников движения: 1 – направляющий,..10 – замыкающий)

В отличие от системы (2) решение уравнений (1) с учетом выражений (3) и (4) не предполагает получение зависимостей $\{z_i(t)\}$ в аналитическом виде, что потребовало бы создания специальной компьютерной программы. На рис. 2 представлены результаты моделирования движения «цепочки» из 10 человек по винтовой лестнице в культовом здании, на рис. 3 – обобщенные графики их движения по различным видам пути. Как и следовало ожидать, «цепочка» в большей степени растягивается на лестнице и в наименьшей – при движении по горизонтальному участку пути вне здания.

Таким образом, с использованием данного подхода можно промоделировать еще один вид людского потока – движение «цепочкой», оценить время достижения направляющим или замыкающим определенного рубежа, длину «цепочки» и др.

Дальнейшим развитием данного подхода может явиться моделирование слияния цепочек, учет экипировки участников движения (средств защиты органов дыхания, переносимых грузов и т.п.), различных физических параметров людей и др.

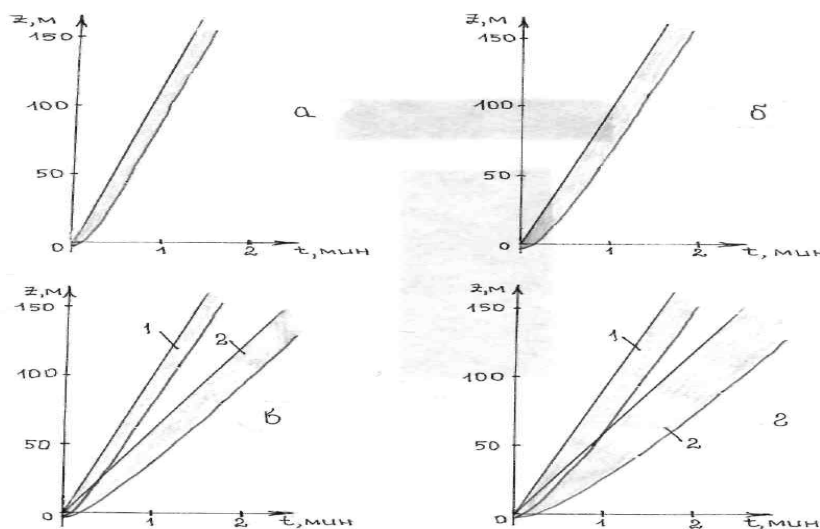


Рис. 3. Обобщенные графики движения «цепочек» из 10 человек (а – горизонтальный путь вне зданий; б – горизонтальный путь в зданиях; в – лестница вниз (1) и вверх (2); г – по винтовой лестнице 1, 2)

Литература

1. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. Обязательное приложение 2. Метод определения уровня обеспечения пожарной безопасности людей. М.: Стандартинформ, 2006.
2. Пожарная тактика / под ред. Я.С. Повзика. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984.
3. О порядке применения региональных и территориальных поисково-спасательных служб и формирований МЧС России и временные нормативы их действий: Приказ МЧС России от 23 окт. 1997 г. № 384.
4. Предтеченский В.М., Милинский А.И. Проектирование зданий и сооружений с учетом организации движения людских потоков. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1979.
5. Холщевников В.В. Исследования людских потоков и методология нормирования эвакуации людей из зданий при пожаре. М.: МИПБ МВД России, 1999.
6. Таранцев А.А. Определение параметров людского потока при свободном движении // Пожаровзрывобезопасность. 2004. Т. 13. № 5. С. 64–69.
7. 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.
8. Дворников А.И., Таранцев А.А. [и др.]. О моделировании движения колонны техники // материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Международный опыт подготовки специалистов пожарно-спасательного профиля» / СПб ин-т ГПС МЧС России, 20–21 янв. СПб., 2004 г.
9. Зычков Э.А. Закономерности процессов эвакуации людей при пожаре подвижного состава в тоннеле метрополитена: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1998.