

УДК 725.82.053

## УЧЕТ ЗАДЕРЖЕК ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ РАСЧЕТНОГО ВРЕМЕНИ ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ

Дмитриченко А.С., к.т.н., доцент, Полевода И.И., к.т.н.,  
Соболевский С.Л., к.ф.-м.н.

*Предложена методика определения расчетного времени эвакуации людей, позволяющая повысить объективность и реалистичность расчетов. Отличительными особенностями методики являются использование абсолютного времени от момента начала эвакуации и введение понятия фрагмента потока. Такой подход позволяет в качестве основной расчетной характеристики потока на участке принимать не одно значение интенсивности его замыкающей части, а кусочно-постоянную функцию, описывающую зависимость интенсивности на участке на протяжении всего периода эвакуации. В качестве базового допущения методики принимается отсутствие наслоений и перемешиваний фрагментов потоков. Следствием данного допущения является введение в расчет задержек двух видов. Первые обусловлены превышением интенсивности движения максимально возможного значения и формируются в начальной части участков, вторые следуют из допущения и формируются в конце участков, если скорость движения впереди идущего фрагмента менее скорости предыдущего. Основным преимуществом методики является возможность проведения расчетов как при помощи ручного счета, так и с использованием вычислительной техники.*

Основной задачей при проектировании противопожарной защиты зданий является обеспечение безопасности людей при пожаре. Пути эвакуации и выходы из зданий с наличием помещений с массовым пребыванием людей должны обеспечивать эвакуацию людей из помещений и здания в целом до наступления воздействия критических значений опасных факторов пожара, что должно быть подтверждено расчетом [1, 2]. На данный момент широкое распространение получила методика ГОСТ 12.1.004 [3], имеющая вместе с тем ряд недостатков:

1. Неопределенность методики расчета в ситуации образования скоплений людских потоков сверх критической плотности, ввиду отсутствия стандартизированных процедур учета времени задержки движения.

2. Невозможность учета слияния разнесенных во времени потоков в процессе эвакуации.

3. Неоднозначная зависимость скорости и плотности людского потока от его интенсивности. Средства разрешения этой неоднозначности не предусмотрены.

4. Неопределенность понятия наиболее удаленного участка.

5. Невозможность смоделировать ситуацию на различных участках пути эвакуации в режиме реального времени.

Для устранения указанных недостатков наряду с интегральным подходом стандартной методики, отдельными исследователями предпринимались попытки создания расчетных методов с использованием современной вычислительной техники [4]. При этом существующие модели процесса эвакуации коренным образом отличались от методики [1], которая в настоящее время используется специалистами проектных организаций. Стандартизировать зарубежные математические модели практически невозможно, поскольку в этом случае требуется детальное описание моделей, что нарушает коммерческие интересы производителей. Вместе с тем в работе В.В. Холщевникова отмечено, что стандартная методика является единственным теоретически обоснованным методом в данной области [5].

Поэтому стандартизированный метод ГОСТ 12.1.004 был взят за основу при разработке методики, учитывающей задержки движения потока. Для устранения существующих недостатков предложено, сохранив принципы разделения эвакуационного пути на участки и формирования соответствующих маршрутов, отойти от принципа обособленного расчета времени движения людей по отдельным участкам, с последующим их суммированием. В качестве альтернативы предлагается расчет ввести с использованием абсолютного времени от момента начала эвакуации. Тогда расчетное время эвакуации  $T$  будет определяться как максимальное из времен  $T_j$  окончания движения людей по  $j$ -му участку пути эвакуации:

$$T = \max \{T_1, T_2 \dots T_j\}, \quad (1)$$

где под временем окончания движения людей по участку понимается время с момента начала эвакуации, через которое данный участок покинет последний проходящий по нему человек. Понятие маршрута эвакуации и принципы его построения приняты в трактовке, приведенной в работе [6]. Подобный подход позволяет устранить неопределенность понятия наиболее удаленного участка.

Предлагаемая методика оставляет в силе основополагающие положения стандартной методики: интенсивность является базовой характеристикой потока; зависимость скорости потока от его плотности находится по таблице 2 [3]; параметры фрагмента потока являются однородными на всей протяженности его существования. Вместе с тем учесть взаимодействие на каждом участке пути эвакуации в каждый момент времени потоков со всех участков по стандартной методике невозможно. В отличие от стандартной методики, в которой принимается допущение, что потоки ( $j-1$ ,  $j-2$ , ...  $j-m$ ) на участок  $j$  (рисунок 1а) входят одновременно (независимо от реального времени их подхода к точке слияния потоков), в предлагаемой методике допускается неодновременность входа потоков. То есть становится

возможным учет входа людей на участок  $j$  с предварительных участков в зависимости от времени их подхода.

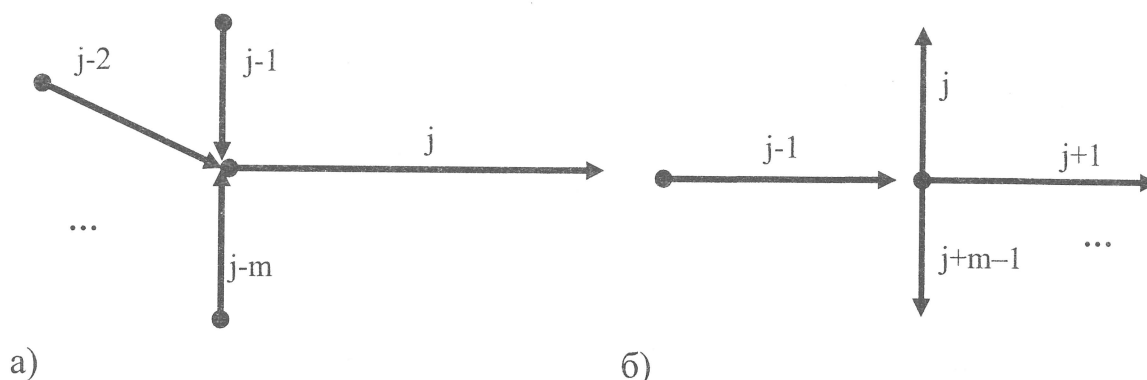


Рисунок 1 – Схема объединения (а) и разделения (б) участков

Такой подход позволяет в качестве основной расчетной характеристики людского потока на участке принимать не одно значение интенсивности замыкающей части людского потока, а кусочно-постоянную функцию, описывающую зависимость интенсивности людского потока на участке на протяжении всего периода эвакуации (рисунок 2а), на котором отрезок  $[0; T]$  соответствует временному интервалу, в течение которого на участке находятся люди. На последующем временном интервале  $(T; +\infty)$  для участка справедливо равенство  $q = 0$ . В приведенном примере время окончания движения людей по участку составит:  $T = t_0 + t_1 + t_2 + t_3$ . Таким образом, людской поток на участке делится на фрагменты, каждый из которых характеризуется постоянной интенсивностью и, соответственно, скоростью движения. Основными параметрами фрагмента потока  $k$  на участке  $j$  являются интенсивность  $q(j, k)$  и протяженность  $\tau(j, k)$ , определяемая как время прохождения всего фрагмента потока через фиксированную точку, а также момент  $\theta(j, k)$  входа фрагмента потока на участок с начала процесса эвакуации. Для примера, отображенного на рисунке 1:  $\theta(j, 0) = 0$ ,  $\theta(j, 1) = t_0$ ,  $\theta(j, 2) = t_0 + t_1$ ,  $\theta(j, 3) = t_0 + t_1 + t_2$ ,  $q(j, k) = q_k$ ,  $\tau(j, k) = t_k$ . В общем случае, в зависимости от величины  $q(j, k)$ , фрагменты потока могут существовать на участке с временными перерывами (рисунок 2б).

Для промежуточных участков скорость потока  $v(j, k)$  определяется с помощью таблицы 2 [3] как функция интенсивности  $q(j, k)$ , а время  $t(j, k)$  прохождения фрагмента потока (точнее, каждого составляющего его человека) при отсутствии дополнительных задержек движения по всему участку  $j$  выражается очевидной формулой:

$$t(j, k) = l_j / v(j, k), \quad (2)$$

где  $l_j$  – длина участка  $j$ .

Таким образом, момент  $\omega(j, k)$  начала выхода фрагмента потока  $k$  с участка  $j$  можно представить в виде:

$$\omega(j, k) = \theta(j, k) + t(j, k). \quad (3)$$

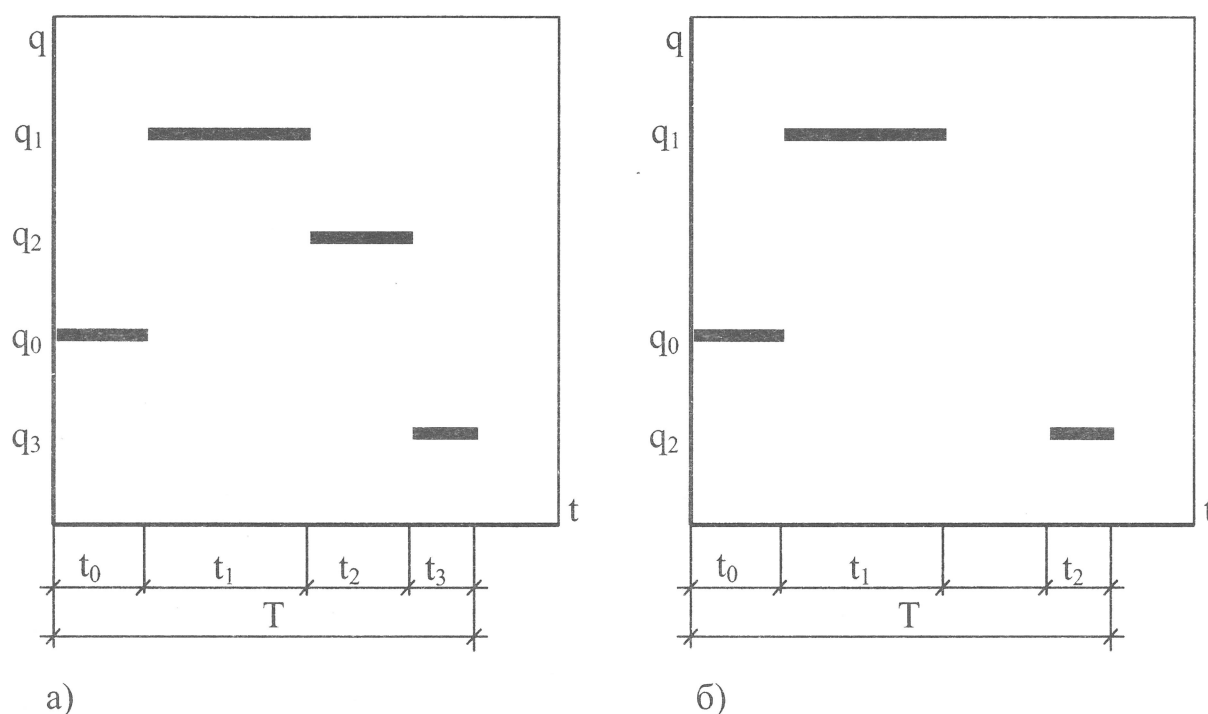


Рисунок 2 – Изменение интенсивности на участке

Следовательно, если на участке  $j$  проходят  $s+1$  фрагмент потока  $(0, 1, 2, \dots, s)$ , то время окончания движения людей по участку составит:

$$T_j = \omega(j, s) + \tau(j, s). \quad (4)$$

Для первоначальных участков пути эвакуации людской поток будет состоять из одного фрагмента интенсивности:

$$q(j, 0) = \frac{N_j \cdot f}{l_j \cdot \delta_j} \cdot v(j, 0), \quad (5)$$

где  $v(j, 0)$  – скорость, определяется по ГОСТ 12.1.004 исходя из найденной плотности людского потока  $N_j \cdot f / l_j \cdot \delta_j$ ,

$N_j$  – количество людей на участке в начале эвакуации,  
 $\delta_j$  – ширина участка  $j$ ,  
 $f$  – расчетная площадь горизонтальной проекции человека.

Формула (5) применима также для определения параметров начального (но уже не единственного) фрагмента потока на промежуточных участках (фрагмент потока 0 на рисунке 1). Разумеется  $\theta(j, 0) = 0$ .

Процесс перехода фрагментов потока с рассмотренных ранее участков на последующие при их слиянии или простом переходе одного в другой (случай  $m = 1$ ), проиллюстрирован на рисунке 1а. Поток людей через участок  $j$  разделяется во времени на  $s$  фрагментов интенсивности  $q(j, 1)$ ,  $q(j, 2)$ , ...,  $q(j, s)$ , где  $s$  очевидно не превосходит общего числа участков, потоки с которых проходят через участок  $j$ . Интенсивность указанных фрагментов определяется из условия неразрывности людского потока, путем преобразования формулы, а именно:

$$q(j, k) = \frac{1}{\delta_j} \cdot \sum_{i=j-m}^{j-1} q(i, k-1) \cdot \delta_i. \quad (6)$$

В методике вводится допущение, что фрагменты потоков на предшествующих участках  $j-1, j-2, \dots, j-m$  при необходимости дополнительно разбиты по времени так, чтобы потоки с различных участков либо достигали участка  $j$  одновременно и имели равную продолжительность, либо вовсе не пересекались (при этом на каждом предшествующем участке будет  $s$  фрагментов потоков, часть из которых будут иметь нулевую интенсивность). То есть считаем, что для  $k = 0, 1, \dots, s-1$ , имеем:

$$\tau(j-1, k) = \tau(j-2, k) = \dots = \tau(j-m, k) \text{ и}$$

$$\omega(j-1, k) = \omega(j-2, k) = \dots = \omega(j-m, k).$$

При этом  $\theta(j, k) = \omega(j-1, k-1)$ , а  $\tau(j, k) = \tau(j-1, k-1)$ .

Кроме того, в общем случае на участке  $j$  будет брать начало нулевой фрагмент потока, состоящий из людей, находившихся на участке в момент начала эвакуации, интенсивность которого рассчитывается по формуле (5). В случае, когда для некоторого фрагмента потока найденная по формуле (6) интенсивность превосходит максимальное значение интенсивности для данного вида путей эвакуации  $q_{\max}$ , имеет место задержка движения. Неполнота методики ГОСТ 12.1.004 для расчета времени задержек движения при образовании скопления людей обычно компенсируется формулой Предтеченского В.М.

В предлагаемой методике специальной формулы для расчета задержки движения не требуется – если  $q > q_{\max}$ , изменяются параметры фрагмента потока с учетом его движения в условиях критического скопления людей. Интенсивность фрагмента потока принимается предельной  $\bar{q}(j, k) = q_{\lim}$  (значение интенсивности потока с предельной плотностью), скорость, соответственно,  $v_{\lim}$ , а протяженность фрагмента потока увеличивается пропорционально уменьшению его интенсивности, т. е. в  $q(j, k)/q_{\lim}$  раз и становится равна:

$$\bar{\tau}(j, k) = \frac{q(j, k)}{q_{\lim}} \tau(j, k) . \quad (7)$$

В дальнейших расчетах для данного фрагмента потока в качестве протяженности  $\tau$  и интенсивности  $q$  рассматриваем найденные выше значения  $\bar{\tau}$  и  $\bar{q}$ .

Расчетная ситуация разделения потоков проиллюстрирована на рисунке 1б. В этом случае разделение фрагментов потока участка  $j-1$  при переходе на  $m$  последующих участков, в том числе рассматриваемый участок  $j$ , считается пропорциональным распределению ширины участков  $j, j+1, \dots, j+m-1$ :

$$q(j, k) = \frac{q(j-1, k-1) \cdot \delta_{j-1}}{\sum_{i=j}^{j+m-1} \delta_i} . \quad (8)$$

Дополнительные задержки движения фрагментов потока на участке  $j$  могут возникать вследствие более медленного движения впереди идущих фрагментов по сравнению с идущими сзади. Допущением предлагаемой методики является отсутствие наслоений и перемешиваний фрагментов потоков на участке. Из данного допущения следует, что, когда последующий (с большим номером, т. е. более поздний и следующий сзади) фрагмент потока начинает выходить с участка раньше, чем покинет участок предыдущий фрагмент потока:

$$\omega(j, k) < \omega(j, k-1) + \tau(j, k-1) , \quad (9)$$

для  $k$ -го потока необходимо учесть дополнительную задержку движения по участку  $j$ , равную:

$$\zeta(j, k) = \omega(j, k - 1) + \tau(j, k - 1) - \omega(j, k), \quad (10)$$

соответственно увеличив при этом время движения фрагмента потока  $k$  по участку  $j$ :

$$\bar{t}(j, k) = t(j, k) + \zeta(j, k) \quad (11)$$

и приняв в дальнейшем в качестве  $t(j, k)$  найденное по формуле (11) значение  $\bar{t}(j, k)$ . Для практического расчета проверку условий (8) с последующим вычислением задержек (9) и изменением времени движения фрагментов по участку (10) следует проводить в порядке нумерации фрагментов потока, начиная с фрагмента 1 и далее последовательно по фрагмент  $s$  включительно.

Таким образом, расчетная методика может быть представлена в виде следующего алгоритма:

1. Выполняем расчет для первоначальных участков пути эвакуации по формуле (5).

2. Далее для каждого участка  $j$ , все входящие в который участки уже рассчитаны, выполняется расчет по формулам (6) или (8), при необходимости выполняя описанное разбиение фрагментов потока на входящих участках.

3. При превышении определенными фрагментами потока на участке  $j$  максимального значения интенсивности, корректируются параметры фрагмента с учетом формулы (7).

4. При наличии наложений полученных фрагментов потока (условие 9) учитывается дополнительная задержка движения фрагментов по формулам (10–11).

5. Если остались нерассчитанные участки, то идет возврат к шагу 2.

6. Рассчитывается время эвакуации по формуле (1).

**Заключение.** Разработанная методика определения расчетного времени эвакуации людей позволяет повысить объективность расчета времени эвакуации людей. Расчет предлагается ввести с использованием абсолютного времени от момента начала эвакуации. Основным параметром, используемым для оценки характеристик потока на участке, является интенсивность потока. Для дифференцированной оценки параметров движения людей введено понятие фрагмента потока, характеризующегося посто-

янной интенсивностью. Такой подход позволяет в качестве основной расчетной характеристики людского потока на участке принимать не одно значение интенсивности замыкающей части людского потока, а кусочно-постоянную функцию, описывающую зависимость интенсивности людского потока на участке на протяжении всего периода эвакуации. В качестве базового допущения методики принимается отсутствие наслоений и перемешиваний фрагментов потоков. Следствием данного допущения является введение в расчет задержек двух видов. Первые обусловлены изменением параметров участка и формируются в его начальной части, вторые следуют из допущения и формируются в конце участков, если скорость движения впереди идущего фрагмента менее скорости последующего.

### ЛИТЕРАТУРА

1. СНБ 2.02.02-01. Эвакуация людей из зданий и сооружений при пожаре.
2. Ройтман, М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве / М.Я. Ройтман. – М.: Стройиздат, 1985. – 590 с.
3. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
4. Холщевников, В.В. Обзор компьютерных программ моделирования эвакуации зданий и сооружений / В.В.Холщевников, Д.А. Самошин, Н.Н. Галушка // Пожаровзрывобезопасность. – 2002. – № 5. – С. 40–49.
5. Холщевников, В.В. Людские потоки в зданиях, сооружениях и на территориях их комплексов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.В. Холщевников; МИСИ. – М., 1983. – 30 с.
6. Касперов, Г.И. Методические рекомендации по расчету параметров эвакуации людей / Г.И. Касперов, А.А. Свистун, И.И. Полевода. – Минск: КИИ МЧС РБ, 1999. – 64 с.

*Поступила в редакцию 11 января 2007 г.*