

¹А.С. Дмитриченко, канд. техн. наук, доцент, ²В.Н. Рафальский,
³Ю.С. Иванов, канд. техн. наук, ⁴А.К. Деменчук, канд. физ.-мат. наук, доцент,
⁴С.Г. Красовский, канд. физ.-мат. наук, доцент, ⁴Е.К. Макаров, д-р физ.-мат. наук, доцент
(¹Белорусский государственный технологический университет
²Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь
³Учреждение «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем
чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь
⁴Институт математики НАН Беларуси)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОГО ВРЕМЕНИ ЭВАКУАЦИИ И АЛГОРИТМА ОПОВЕЩЕНИЯ О ПОЖАРЕ В ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЯХ, ОБОРУДОВАННЫХ СИСТЕМОЙ ОПОВЕЩЕНИЯ СО-5

Приведены особенности движения людского потока по лестничным клеткам высотных зданий, установленные на основании проведенных экспериментальных исследований. Предложен алгоритм оповещения и эвакуации людей из высотных зданий, оборудованных системой СО-5. Разработана методика определения расчетного времени эвакуации из высотных зданий.

Ключевые слова: эвакуация людей, зона безопасности, высотные здания, время эвакуации, прямая и обратная эвакуация, алгоритм оповещения.

В рамках действующих норм и сложившейся на сегодняшний день практики, определение расчетного времени эвакуации людей из высотных зданий проводится на основе методики ГОСТ 12.1.004-91 [1] в предположении одновременности оповещения о возникновении пожара всех этажей. Указанное предположение подразумевает почти одновременное несогласованное и неуправляемое движение эвакуируемых потоков людей в лестничных клетках, осложняющееся многочисленными слияниями и переформированиями на поэтажных площадках, что приводит к возникновению задержек движения и существенному его торможению по сравнению со свободным движением потоков той же плотности. В целом такой процесс эвакуации характеризуется нерегулярными пульсациями всех основных параметров потока: скорости, плотности и интенсивности с сильной тенденцией к хаотизации. На практике именно учет этих беспорядочных колебаний составляет основную трудность при проведении соответствующих расчетов.

В то же время, на основании проведенных экспериментальных исследований движения людских потоков по лестничным клеткам высотных зданий [2] можно вывести следующие общие закономерности:

1) Движение людей по лестничным клеткам возможно лишь в очень узком интервале плотностей, так как при ширине лестницы 120 см на каждой ступеньке размещается не более двух человек.

2) Вне зависимости от условий на старте людского потока его параметры, при условии беспрепятственного движения, достаточно быстро стабилизируются, принимая некоторые постоянные значения, которые зависят в основном от геометрических характеристик лестничной клетки и качественного состава людского потока.

3) Любое слияние и переформирование потоков вызывает задержки движения и, в конечном счете, увеличивает общее время, необходимое для ухода людей в безопасную зону.

4) Обгон медленно движущейся группы численностью более десяти-пятнадцати человек отдельным человеком или малой группой, перемещающейся с большей скоростью, крайне затруднен, а обгон нескольких медленных групп подряд практически невозможен, если исключить из рассмотрения силовые приемы, приводящие в конечном случае к задержкам в движении потока.

С учетом этих обстоятельств можно сформулировать два основных вывода, которые будут положены в основу предлагаемой методики планирования эвакуации.

Во-первых, наиболее эффективным является организованное движение фрагментов людского потока, сформированного в поэтажные колонны без последующих слияний и переформирований.

Во-вторых, интенсивность движения людского потока по лестничной клетке является величиной приблизительно постоянной и незначительно изменяется с течением времени. Указанный параметр детерминируется наиболее массовыми и в то же время наименее мобильными фракциями людского потока.

Таким образом, нам необходимо определить время оповещения каждого этажа с таким расчетом, чтобы люди, выходящие со своего этажа на лестничную клетку, образовывали согласованные четко отграниченные поэтажные колонны, имеющие впереди себя достаточное свободное пространство для беспрепятственного движения и проходящие площадки других этажей после их полного освобождения другими колоннами, так чтобы гарантированно избежать слияния и переформирования в этих узлах маршрута эвакуации. Кроме того, выбранный порядок оповещения должен обеспечивать общее время эвакуации людей из здания наиболее близкое к минимально возможному.

Сформулированная задача относится к области теории расписаний. В таких задачах, как правило, поиск точного оптимального решения достаточно труден, поэтому для ее решения (построения близкого к оптимальному расписания эвакуации) мы будем использовать следующие принципы эвристического характера.

Принцип субоптимальности. Время эвакуации, наиболее близкое к минимально возможному достигается при таком расписании, которое обеспечивает равномерное заполнение лестничной клетки движущимся людским потоком с плотностью, соответствующей наибольшей интенсивности потока. Чем дальше принятое решение отстоит от такой равномерности, тем большим будет время эвакуации.

Близкая к равномерной наполняемость обеспечивается приемами, описанными ниже. Однако, плотность получающегося при этом потока остается неконтролируемой, так как она зависит не от расписания потоков, а от условий выхода людей на лестничную клетку и условий их движения по ней. С этой целью должны предусматриваться инженерно-технические решения, направленные на создание оптимальной плотности людского потока: установка дверей и лестничных маршей соответствующей ширины, а также регулирование выхода людей с этажа на лестничную клетку, если плотность слишком велика.

Принцип надежности. Всякое оптимальное решение, как правило, неустойчиво. Решение, удовлетворяющее сформулированному принципу субоптимальности также неустойчиво: при случайном возникновении локального уплотнения потока, либо при его случайном локальном торможении, вперед уйдет разрыв потока, а назад побежит волна сжатия и торможения. Поэтому, для повышения устойчивости процесса эвакуации необходимо принимать специальные меры, в качестве которых предлагается введение в поток преднамеренных разрывов, для создания которых люди с разных этажей выводятся на лестничную клетку с некоторыми дополнительными задержками. Введенные таким образом разрывы могут компенсировать полностью или частично, небольшие отличия фактического количества людей на этаже от расчетного, отличие фактической скорости и растяжения фрагментов потока от их расчетных значений, а также несанкционированную активность эвакуируемых.

Выбор величины таких разрывов представляет собой сложную задачу, принципиальные основы, для решения которой в настоящее время недостаточно ясны. В настоящей работе в качестве первого приближения к такому решению мы предлагаем определять их величину путем введения таких параметров как эффективная длина колонны, заранее учитывающая растяжение поэтажных колонн в процессе их движения.

Необходимые термины и определения

Процесс эвакуации людей из высотных зданий предполагает их вывод не только непосредственно наружу, но также и на крышу зданий или в специально предусмотренные зоны безопасности. В таком случае при расчете здание условно разбивается на секции, с фиксированным направлением движения (вверх или вниз) и единым местом эвакуации. Разбиение на секции определяется сценарием развития пожара. Выбор такого разбиения представляет собой отдельную задачу, которая в настоящей статье не рассматривается.

Каждому этажу секции присваивается свой расчетный номер: №1 присваивается этажу, ближайшему к выходу из секции, а последующие номера присваиваются в направлении, противоположном движению колонн в лестничной клетке. Поскольку при данной нумерации варианты расписаний эвакуации в каждой из секции одинаковы, будем рассматривать только нижнюю секцию здания (направление движения вниз с выходом на улицу). С целью реализации описанного выше расписания эвакуации предлагается ввести следующие параметры движения и соответствующие им определения.

Колонна – это фрагмент людского потока на лестничной клетке, состоящий из всех людей, вышедших с одного этажа.

k -я колонна – колонна, сформированная на k -м этаже.

Контрольная линия этажа – граница между площадкой и лестничным маршем, ведущим по направлению эвакуации.

Старт колонны – момент пересечения первым человеком колонны контрольной линии своего этажа.

Уход колонны с этажа – момент пересечения последним человеком в хвосте колонны контрольной линии этажа.

Прямой процесс эвакуации – такое состояние процесса эвакуации, при котором направление последовательного оповещения этажей о пожаре противоположно направлению движения людских потоков.

Обратный процесс эвакуации – такое состояние процесса эвакуации, при котором направление последовательного оповещения этажей о пожаре совпадает с направлением движения людских потоков.

n – номер верхнего этажа секции (при эвакуации вниз).

τ_k – момент оповещения k -го этажа о возникновении пожара.

t_k – момент ухода k -й колонны со своего этажа.

θ_k – время движения головы колонны по k -му этажу: время от оповещения о пожаре на k -м этаже до старта k -й колонны.

λ_k – фактическая временная длина колонны: время от старта k -й колонны до ее ухода со своего этажа.

l_k – путь, проходимый k -й колонной от старта до окончания процесса эвакуации.

$l_k(j)$ – путь, проходимый k -й колонной от старта до ухода с этажа с номером j .

$T(k, j)$ – время от пересечения головой колонны контрольной линии k -го этажа до пересечения головой колонны контрольной линии j -го этажа, принято одинаковым для всех колонн (здесь, $k > j$).

$T_k = T(k, k-1)$ – время от пересечения головой колонны контрольной линии k -го этажа до пересечения головой колонны контрольной линии $k-1$ -го этажа.

γ_k – коэффициент растяжения k -й колонны при движении по путям эвакуации; определяется из экспериментальных данных и принимается равным $1+0,0064l_k$, где l_k – путь, проходимый k -й колонной от старта, до окончания процесса эвакуации [2].

ω – время от момента оповещения о пожаре до прихода головы колонны этажа с расчетным номером №1 в безопасную зону эвакуации (например, до выхода непосредственно наружу).

$\tau_{зд}$ – расчетное время эвакуации людей из здания.

$\tau_{сек}$ – расчетное время эвакуации людей из секции.

Порядок оповещения людей при пожаре

Перед началом расчета времени оповещения необходимо определить следующие величины: θ_k , λ_k , T_k , l_k , ω по методике [1]. Кроме того, следует определить эффективные временные длины колонн для оповещения L_k^0 по формуле $L_k^0 = \lambda_k \gamma_k$.

Все этажи секции оповещаются одновременно в том случае, если пожар происходит на этаже секции с расчетным номером №1 или в другой секции и если выполняется следующее условие (на всех k , кроме $k = n$):

$$L_k^0 + \theta_k \leq \theta_{k+1} + T_{k+1}. \quad (1)$$

Если пожар происходит на этаже секции с расчетным номером №1 или в другой секции, но условие (1) не выполнено, то различные этажи должны оповещаться в различное время с тем, чтобы на лестничной клетке $k+1$ -я колонна выстраивалась в хвост k -й колонне с расчетным интервалом. В этом случае реализуется прямой процесс эвакуации от первого этажа.

В данном случае оповещение каждого этажа производится от первого этажа навстречу эвакуации, то есть вверх в следующем порядке:

В момент $t = \tau_1$ происходит оповещение 1-го этажа о пожаре и начинается движение людей к эвакуационным выходам.

В момент $t = \tau_1 + \theta_1$ происходит старт первой колонны.

В момент $t = \tau_1 + \theta_1 + L_1^0$ первая колонна (с учетом возможного растяжения и необходимого разрыва колонн) уходит со своей площадки.

В этот же момент колонна второго этажа должна подойти к контрольной линии первого этажа. Поэтому в момент $t = \tau_1 + \theta_1 + L_1^0 - T_2$ должен произойти старт второй колонны, для чего оповещение второго этажа должно быть сделано в момент $\tau_2^* = \tau_1 + \theta_1 + L_1^0 - T_2 - \theta_2$. Если $\tau_2^* \geq \tau_1$, то полагаем время оповещения второго этажа должно быть равным $\tau_2 = \tau_2^*$. Если же $\tau_2^* < \tau_1$, тогда $\tau_2 = \tau_1$. Последнее означает, что оповещение о пожаре какого-либо этажа не может быть сделано до момента оповещения этажа, на котором возник пожар.

Аналогичным образом оповещение этажа с номером k при $k > 2$ должно быть сделано в момент $\tau_k^* = \tau_{k-1} + \theta_{k-1} + L_{k-1}^0 - T_k - \theta_k$. Если $\tau_k^* \geq \tau_1$, то полагаем время оповещения k -го этажа равным $\tau_k = \tau_k^*$. Если же $\tau_k^* < \tau_1$, то полагаем $\tau_k = \tau_1$.

Если пожар происходит на этаже с номером p в рассматриваемой секции, то:

А) запускается прямой процесс эвакуации от первого этажа. Его расчет производится точно так же, как и выше;

Б) одновременно запускается прямой процесс эвакуации от p -го этажа. Его расчет также производится по правилам, изложенным выше, с заменой первого этажа на p -й этаж.

В момент, когда голова p -й колонны приближается к начинающему эвакуацию этажу с номером $m-1$, причем этаж с номером m еще не оповещен, эвакуация этажа с номером m откладывается и процесс, эвакуации запущенный от первого этажа завершается. При этом остаются неэвакуированными этажи от m -го до $(p-1)$ -го.

Для определения этого момента и номера этажа m после вычисления каждого τ_k проверяется условие:

$$\tau_k + \theta_k + L_k^0 \leq \tau_p + \theta_p + T(p, k). \quad (2)$$

Если условие (2) выполняется, то происходит переход к этажу с номером $k+1$. В противном случае, полагаем $m=k$, а этаж с текущим номером k не эвакуируется.

В момент времени $t = \tau_n + \theta_n + L_n^0 + T(n, p-1)$, когда хвост n -й колонны минует $(p-1)$ -й этаж, должна стартовать колонна $(p-1)$ -го этажа. Поэтому в момент τ_{p-1} производится оповещение $(p-1)$ -го этажа и запускается обратный процесс эвакуации этажей от $(p-1)$ -го до m -го с выстраиванием соответствующих колонн в порядке, обратном нумерации в хвост друг другу с расчетным интервалом. Здесь момент τ_{p-1} определяется следующим образом.

Если выполняется условие:

$$\tau_n + \theta_n + L_n^0 + T(n, p-1) - \theta_{p-1} \geq \tau_1, \quad (3)$$

тогда

$$\tau_{p-1} = \tau_n + \theta_n + L_n^0 + T(n, p-1) - \theta_{p-1}.$$

Если условие (3) не выполняется, тогда принимаем $\tau_{p-1} = \tau_1$.

В данном случае оповещение каждого этажа производится от $p-1$ -го этажа в направлении эвакуации, то есть вниз в следующем порядке.

В момент $t = \tau_{p-1}$ происходит оповещение $p-1$ -го этажа о пожарной опасности и начинается движение людей к эвакуационным выходам.

В момент $t = \tau_{p-1} + \theta_{p-1}$ происходит старт $p-1$ -й колонны.

В момент $t = \tau_{p-1} + \theta_{p-1} + L_{p-1}^0 + T_{p-1}$ колонна $p-1$ -го этажа уходит с площадки $p-2$ -го этажа.

В этот же момент колонна $p-2$ -го этажа должна подойти к контрольной линии своего этажа. Для этого в момент времени равный:

$$\tau_{p-2}^* = \tau_{p-1} + \theta_{p-1} + L_{p-1}^0 + T_{p-1} - \theta_{p-2},$$

должно быть сделано оповещение $p-2$ -го этажа. Если $\tau_{p-2}^* \geq \tau_1$, то время оповещения второго этажа принимается равным $\tau_{p-2} = \tau_{p-2}^*$. При условии $\tau_{p-2}^* < \tau_1$ время оповещения второго этажа принимается равным $\tau_{p-2} = \tau_1$.

Аналогичным образом оповещение этажа с номером k при условии $p-2 > k > m-1$ должно быть сделано в момент времени $\tau_k^* = \tau_{k+1} + \theta_{k+1} + L_{k+1}^0 - T_{k+1} - \theta_k$.

Если $\tau_k^* \geq \tau_1$, то время оповещения второго этажа принимается равным $\tau_k = \tau_k^*$. При условии $\tau_k^* < \tau_1$ время оповещения второго этажа принимается равным $\tau_k = \tau_1$.

В приведенном расчете расписания эвакуации возможен учет усталости людей, составляющих поток, возникающий в процессе движения по лестнице. Согласно экспериментальным данным [2], функция усталости $\mu(l)$, определяемая как отношение времени, затраченного на путь длины l с учетом усталости ко времени, затрачиваемому на этот же путь при отсутствии усталости, принимает следующие значения, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения функции усталости

l_k	Движение вверх					Движение вниз				
	10	31,0	53,3	75,5	97,8	10	23,4	43,7	63,9	84,1
$\mu(l_k)$	1	1,265	1,43	1,49	1,56	1	1,33	1,39	1,43	1,47

В этом случае необходимо изменить определения используемых в расчете величин:

1. T_k – время от пересечения головой колонны контрольной линии k -го этажа до пересечения головой колонны контрольной линии $k-1$ -го этажа, принято одинаковым для всех колонн;

2. $T(n, j) = \mu(l_n(j)) \sum_{k=j+1}^n T_k$ – время от пересечения головой колонны контрольной линии k -го этажа до пересечения головой колонны контрольной линии j -го этажа с учетом усталости.

В остальном порядок расчета остается прежним.

Данная методика позволяет также определить время движения каждой колонны по лестничным клеткам и тем самым расчетное время эвакуации.

Если все этажи секции оповещаются одновременно, а также если пожар происходит на первом этаже здания или в другой секции, но условие (1) не выполнено, то время эвакуации из секции $\tau_{сек}$ совпадает со временем завершения выхода n -й колонны в безопасную зону. Это время определяется по формуле

$$\tau_{сек} = \tau_n + \theta_n + L_n^0 + T(n,1) + \omega.$$

Если же пожар происходит в данной секции, то время эвакуации из секции совпадает со временем завершения выхода m -й колонны в безопасную зону. Это время определяется по формуле

$$\tau_{сек} = \tau_m + \theta_m + L_m^0 + T(m,1) + \omega.$$

За время эвакуации из здания принимается наибольшее из значений времен эвакуации из секций.

Время эвакуации, вычисленное указанным способом, будет зависеть от этажа пожара, причем для его определения в большинстве случаев придется вычислять время оповещения для каждого этажа. Реализацию столь громоздких расчетов целесообразно осуществлять при помощи ЭВМ. Более простую верхнюю оценку расчетного времени эвакуации можно получить ручным счетом по упрощенной методике, приведенной ниже.

Упрощенная методика определения времени эвакуации людей из высотного здания при пожаре

При построении расписания эвакуации выше считалось, что эвакуация любого этажа не может быть начата до обнаружения пожара, но если пожар обнаружен, то эвакуация некоторых может быть начата немедленно после этого. Такое предположение, однако, значительно усложняет расчеты времени эвакуации, так как обуславливает сильную его зависимость, как от номера этажа пожара, так и от предполагаемого количества людей на каждом из этажей. Если считать, что каждый последующий этаж может быть оповещен лишь после оповещения предыдущего, то, с одной стороны, получается некоторое завышение общего времени эвакуации из здания, но с другой – значительное упрощение выше приведенных расчетов, которые при таком предположении сводятся к следующей последовательности действий.

1. Определяется величина ω .
2. Вычисляется фактическая длина колонн λ_k для каждого этажа.
3. Определяется T_k для каждого этажа и выбирается наибольший из них:

$$T_{\max} = \max \{ T_k : 1 \leq k \leq n \}$$

4. Для каждого этажа находится путь l_k и выбирается наибольший из них:

$$l_{\max} = \max \{ l_k : 1 \leq k \leq n \}.$$

5. Вычисляются эффективные длины колонн L_k следующим образом:

$$5.1. \text{ Определяется величина } L_k^* = \lambda_k \gamma_k;$$

5.2. Величина $L_k = L_k^*$, если не выполняется условие $L_k^* > \theta_{k+1} - \theta_k + T_{k+1}$ или $k=n$, если указанное условие не выполняется, то $L_k = \theta_{k+1} - \theta_k + T_{k+1}$.

6. Определяется расчетное время эвакуации по формуле:

$$\tau_{эд} = \mu(l_{\max})(\omega + \sum_{k=1}^n L_k + \max_{1 \leq k \leq n-1} L_k)$$

Полученная величина является завышающей оценкой для времени эвакуации. Ее максимальная погрешность равна:

$$\sum_{k=1}^n L_k - T(n,1) + \max_{1 \leq k \leq n-1} L_k.$$

Источников этой погрешности два. Во-первых, точное значение разрыва на m -м этаже в точке соединения прямого и обратного процессов эвакуации, не превосходящее величины L_m оценивается через $\max_{1 \leq k \leq n-1} L_k$.

Во-вторых, при возможности перенести момент оповещения некоторого этажа на момент начала пожара, это отнесение, как указано выше, делается на более поздний момент оповещения соседнего этажа.

Особенности расчетов для случая двух лестниц

При планировании эвакуации через две лестничные клетки каждый этаж разделяется на две зоны с эвакуацией в отдельную лестничную клетку. Для каждой зоны определяется количество эвакуируемых людей, маршрут движения по этажу и все величины, необходимые для расчета времени оповещения и времени эвакуации по одной лестнице.

Расчет ведется в том же порядке (по направлению хода эвакуации, прямому или обратному), что и в случае одной лестницы.

При прямом ходе эвакуации после того, как вычислено время оповещения k -го этажа, для каждой зоны этажа по формулам методики определяется время оповещения $k+1$ -го этажа. Из двух полученных величин берется максимальная (т.е. принимается более позднее время оповещения).

При остановке прямого хода эвакуации номер блокируемого этажа определяется из условия его блокировки хотя бы по одной из лестниц.

При обратном ходе эвакуации расчет времени оповещения снова ведется отдельно для каждой лестницы и время оповещения $k-1$ -го этажа берется в виде максимума из полученных величин.

При определении расчетного времени эвакуации по упрощенной методике для каждой из зон текущего этажа определяется эффективная длина колонны, затем в качестве эффективной длины колонны этажа принимается максимальная из полученных величин.

Заключительные замечания

Предлагаемая схема будет работать только в условиях соблюдения эвакуируемыми твердой дисциплины и порядка. Массовая несанкционированная активность эвакуируемых полностью ее обрушит. В частности, это произойдет, если время выхода на лестничную клетку будет определяться каждым эвакуируемым самостоятельно.

Кроме того, еще раз необходимо подчеркнуть, что расчет расчетного времени эвакуации справедлив только для того случая, когда оповещение происходит не одновременно, а в соответствии с указанным алгоритмом. В противном случае будут возникать многочисленные слияния потоков и вызванные ими задержки, что существенно увеличит общее время эвакуации.

Список литературы:

- 1. Пожарная безопасность.** Общие требования. : ГОСТ 12.1.004-91. – Введ. 01.07.92 – М. : Гос. комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1992. – 81 с.
- 2. Разработать методику** расчета времени эвакуации людей при пожарах в высотных зданиях : отчет о НИР (промежут.) / Командно-инженерный ин-т; рук. темы А.С. Дмитриченко. – Минск, 2012. – 87 с. – № ГР 20121923.

*А.С. Дмитриченко, В.Н. Рафальский, Ю.С. Иванов,
А.К. Деменчук С.Г. Красовский, Е.К. Макаров*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОГО ВРЕМЕНИ ЭВАКУАЦИИ И АЛГОРИТМА ОПОВЕЩЕНИЯ О ПОЖАРЕ В ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЯХ, ОБОРУДОВАННЫХ СИСТЕМОЙ ОПОВЕЩЕНИЯ СО-5

Приведены особенности движения людского потока по лестничным клеткам высотных зданий, установленные на основании проведенных экспериментальных исследований. Предложен алгоритм оповещения и эвакуации людей из высотных зданий, оборудованных системой СО-5. Разработана методика определения расчетного времени эвакуации из высотных зданий.

Ключевые слова: эвакуация людей, зона безопасности, высотные здания, время эвакуации, прямая и обратная эвакуация, алгоритм оповещения.

A.S.Dmytrychenko, V.N. Raphalskyi, Yu.S. Ivanov, A.K.Demenchuk

DETERMINING THE ESTIMATED TIME OF EVACUATION AND ALGORITHM FIRE ALARM IN HIGH BUILDINGEQUIPPED WITH THE ALERTING SERVICE AS-5

The features of pedestrian traffic on the stairwells of tall buildings, established on the basis of experimental studies were studied. An algorithm alert and people evacuating from tall buildings equipped with system AS-5. A technique for determining the estimated time of evacuation from high-rise buildings was calculated.

Key words: evacuation, safety zone, high-rise buildings, the evacuation, the forward and reverse evacuation alert algorithm.

