

Д.А. Самошин

(Академия ГПС МЧС России; e-mail: inbox-d@mail.ru)

ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ВРЕМЕНИ НАЧАЛА ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ ПРИ ПОЖАРАХ

Одной из наиболее острых проблем является недостаточная изученность законов распределения величины $t_{нэ}$. Анализ опубликованной литературы и результатов экспериментов показал, что для этой цели могут быть использованы три закона распределения: нормальный, логнормальный и равномерный. В настоящее время для целей нормирования предлагается использовать равномерный закон распределения.

Ключевые слова: время начала эвакуации, законы распределения, генерация выборок, расчёт рисков, процесс эвакуации.

D.A. Samoshin

THE LAWS OF DISTRIBUTION OF RANDOM VARIABLE OF PEOPLE PRE-MOVEMENT TIME DURING FIRE EVACUATION

One of the most important issue is the insufficient knowledge about the distribution law of this value. The analysis of the published literature and results of experiments has shown that for this purpose one can use the three statistical laws: normal, lognormal and uniform. Currently, for the purposes of the fire risk calculations it is proposed to use a uniform statistical law.

Key words: the start time of the evacuation, statistical laws, sampling, the risk calculation, the process of evacuation.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 17 января 2016 г.

Время начала эвакуации людей при пожарах ($t_{нэ}$) – это интервал времени от момента возникновения пожара до начала эвакуации людей. На основе серии проведенных работ можно утверждать, что время начала эвакуации может занимать до 90 % всего времени эвакуации. Однако, первые исследования были проведены лишь в 80-х годах прошлого века [1], а первым нормативным документом, в котором этот параметр был определен и численно выражен – ГОСТ 12.1.004 [2]. Затем значения $t_{нэ}$ были нормированы в территориальных строительных нормах [3], стандарте организации [4] и каждый раз по новому в каждой из трёх редакций методики расчёта рисков [5-7]. В связи с остротой этой проблемы, за последние несколько лет в России интенсивность исследований в этой области возросла [8-11]. Попытки анализировать [12-14] и нормировать [15] этот этап эвакуации проводятся и за рубежом. Зарубежными коллегами проведены отдельные серии наблюдений в торговых комплексах [16], жилых зданиях [17], кинотеатрах [18] и библиотеках [19], однако выполненные работы в большей мере ставят вопросы, чем дают на них ответы.

Анализ состояния вопроса и полученные результаты позволяют сформулировать основные недостатки существующих сегодня приемов нормирования. Установлено, что не выявлены факторы, которые оказывают основное влияние на величину времени начала эвакуации, недостаточно изучена техническая

инерционность систем обнаружения и оповещения о пожаре, время реакции людей на сигнал о пожаре и время подготовки к эвакуации, отсутствует связь площади здания и рассматриваемого параметра, так как очевидно, что чем меньше здание, тем $t_{нэ}$ должно быть меньше.

Также выявлено, что некоторые факторы, оказывающее влияние на время начала эвакуации, нормированы некорректно. Например, в настоящее время в методике [7] значения $t_{нэ}$ тем ниже, чем выше тип СОУЭ. Однако, дело обстоит ровно наоборот: чем выше тип СОУЭ, тем значения $t_{нэ}$ будут выше, так как с ростом СОУЭ существенно возрастает сложность системы и, как следствие, инерционность системы. Более того, общая правоприминительная практика вынуждает расчётчиков считать, что люди ждут истечения нормативного времени $t_{нэ}$ и лишь затем приступают к эвакуации. Также не установлены минимальные и максимальные значения $t_{нэ}$ и закономерность распределения значений внутри этого интервала. Решению последней задачи посвящена настоящая статья.

Время оповещение людей, находящихся в непосредственной близости к очагу пожара

Очевидно, что существующая сегодня в нормах жесткая дифференциация помещений только на 2 типа (помещения с очагом пожара и все остальные помещения) представляется в значительной мере огрубленной. Легко представить сценарий эвакуации, при котором для двух рядом расположенных помещений нормативное время начала эвакуации будет отличаться в несколько раз. В качестве апогея несуразности такого подхода можно рассмотреть ситуацию с возникновением пожара в кабинете директора – время начала эвакуации 0,1 мин. и секретаря в его приемной – время начала эвакуации до 3 мин. [7], что даёт 30-кратное различие для людей, находящихся на расстоянии нескольких метров друг от друга.

Очевидно, что чем ближе к очагу пожара расположено помещение, тем более низкими по отношению к $t_{нэ}^{max}$ будут значения $t_{нэ}$ в близлежащих помещениях. Это связано с тем, что, как показывают эксперименты, многие эвакуирующиеся оповещают окружающих людей о пожаре голосом, двигаясь к выходу из здания. Такой способ оповещения вызывает больше доверия у оповещаемых и значительно снижает значения $t_{нэ}$. Такой факт отмечался, например, при проведении учебной эвакуации из здания одного из вузов, рис. 1.

Для зданий коридорного типа количество оповещенных людей $A(N)$ за время до включения общеобъектовой системы оповещения $t_{СОУЭ}$ можно определить из выражения:

$$A(N) = NV(t_{СОУЭ} - t_1)/l, \quad (1)$$

где $t_{СОУЭ}$ – время срабатывания общеобъектовой системы оповещения, мин.;

t_1 – время на оповещение первого помещения, мин.;

N – количество человек в помещениях, выходящих в данный коридор;

l – длина коридора, м.;

V – скорость движения при оповещении, м/мин.

Использование формулы (1) позволяет рассчитать количество оповещенных людей при отсутствии или нефункционировании системы оповещения. В таком случае $t_{\text{СОУЭ}}$ следует принять равным общему времени оповещения людей на объекте, обусловленному временем блокирования путей эвакуации.

Принимая во внимание, что в рассматриваемой ситуации оповещать будет не только тот, кто обнаружил пожар, но и оповещенные им в дальнейшем люди, скорость оповещения фактически будет равна скорости свободного движения людей.



Рис. 1. Оповещение людей в соседних помещениях при проведении учебной эвакуации из здания вуза:
 а) эвакуация из помещения и оповещение людей в помещении 2;
 б) движение к помещению 3; в) оповещение людей в помещении 3 и выход людей из помещения 2; г) дальнейшая совместная эвакуация

Для зданий со сложной внутренней планировкой (музеи, дискотеки, торговые залы), где оповещение может осуществляться по нескольким направлениям, количество людей $A(N)$ определяется суммой геометрической прогрессии оповещённых людей:

$$A(N) = \frac{1 - N^{\left(\frac{l}{t_{\text{соуэ}} - t_1}\right)}}{1 - N}, \quad (2)$$

где N – размер группы оповещаемых людей;

t_1 – время на оповещение одной группы людей, мин.;

l – длина пути между помещениями (группами людей), м;

V – скорость движения, м/мин.

Решая задачу для более распространённого случая однонаправленного оповещения, например, при времени на оповещение первого помещения $t_1 = 0,2$ мин. и при затратах времени на включение системы оповещения $t_{\text{соуэ}} = 1$ мин., люди в коридоре длиной 80 м будут оповещены полностью. При возникновении пожара в наиболее удаленной от выхода точке количество оповещенных людей и соответствующие им значения времени начала эвакуации оценочно можно определить из графика на рис. 2.

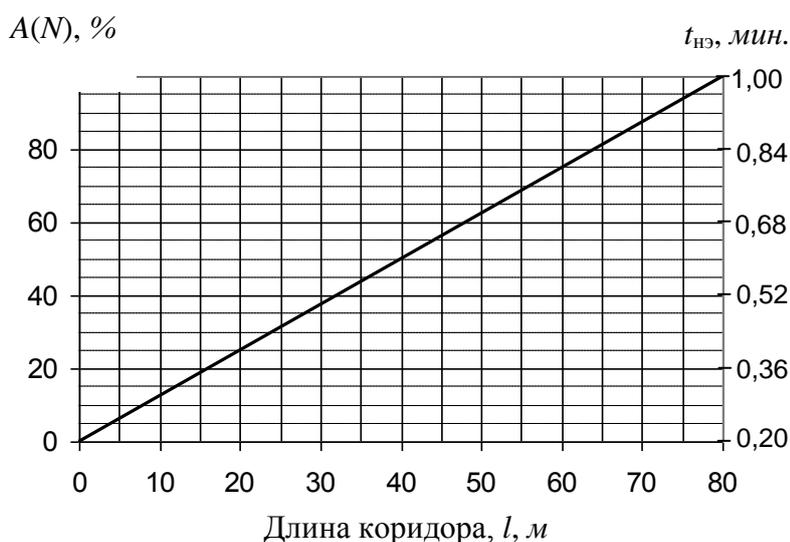


Рис. 2. Количество оповещенных в зависимости от времени, прошедшего с момента обнаружения пожара, и длины коридора

При решении конкретных задач на основе фактических планировочных решениях здания можно точно рассчитать время оповещения конкретной группы людей в различных помещениях.

Распределение времени начала эвакуации для людей в здании

Важной задачей является выявление основных факторов влияния на величину $t_{нэ}$, проведении серии экспериментов и установление значений $t_{нэ}^{min}$ и $t_{нэ}^{max}$. Однако остаётся открытым вопрос о виде закона распределения рассматриваемой случайной величины. В настоящее время есть 3 основные гипотезы о распределении случайной величины времени начала эвакуации: описываемое нормальным, логнормальным (предложено проф. В.В. Холщевниковым и И.Р. Белосоховым [8]) и равномерным законами распределения. Их функции плотности вероятности имеют следующий вид:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{1}{(b-a)}, \quad (5)$$

где μ – математическое ожидание;

σ – стандартное отклонение;

a – нижняя граница интервала распределения;

b – верхняя граница интервала распределения.

В настоящее время затруднительно математически аргументировано утверждать, что значения $t_{нэ}$ подчиняются тому или иному закону распределения, поэтому задача обоснования необходимого для нормирования закона распределения решалась по результатам, полученным использованием того или иного теоретического распределения, то есть на основе генерации выборки значений по заданному закону и её последующему анализу. Для выборки (то есть для каждого i -го человека), описываемой **нормальным** распределением, справедлива следующая формула с использованием преобразования Бокса-Мюллера [20]:

$$t_{нэ,i} = \mu + \sigma\sqrt{-2\ln R_1} \sin(2\pi R_2), \quad (6)$$

где R_1, R_2 – случайные величины, распределённые **равномерно** на отрезке $[0; 1]$.

Логнормальное распределение генерируется на основе экспоненциального нормального распределения:

$$t_{нэ,i} = e^{(\mu + \sigma\sqrt{-2\ln R_1} \sin(2\pi R_2))}. \quad (7)$$

Выборку, подчиняющуюся **равномерному** распределению, можно получить из выражения:

$$t_{нэ,i} = R(b-a) + a, \quad (8)$$

где R – случайная величина, распределённая равномерно на отрезке $[0; 1]$.

Различия в получаемых по выражениям (6)-(8) выборкам обусловлены различными плотностями вероятности значений случайной величины $t_{нэ}$, что фактически выражается в различном распределении значений времени среди эвакуирующихся людей. Очевидно, что выборка любого размера характеризуется одними и теми же особенностями. Ниже приведён пример распределения случайной величины времени начала эвакуации для каждого из 30 человек при $\mu = 2$ мин., а $\sigma = 0,6$ мин. Результаты представлены на рис. 3 и в табл. 1.

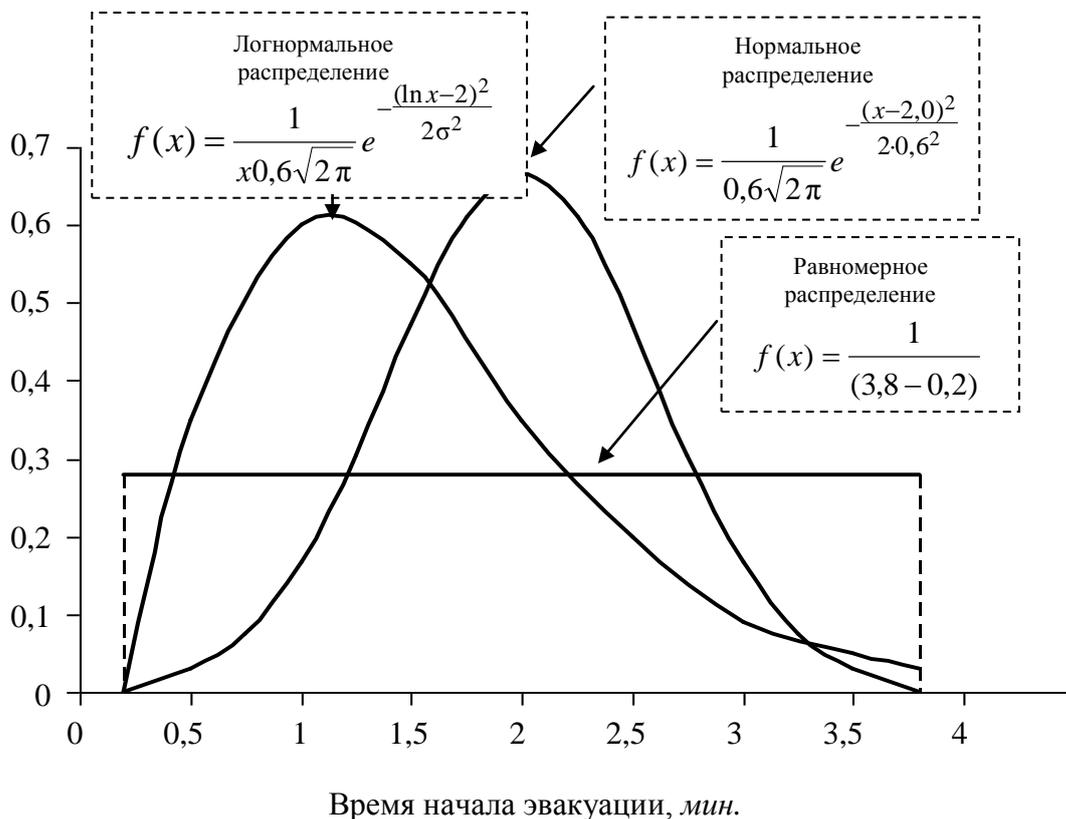


Рис. 3. Сравнение различных законов распределения случайной величины времени начала эвакуации при $\mu = 2$ мин., $\sigma = 0,6$ мин. (диапазон значения от 0,2 до 3,8 мин)

Таблица 1

Сравнение сгенерированных выборок по различным законам распределения при $\mu = 2$ мин., и $\sigma = 0,6$ мин.

Вид распределения	Выборка ($n = 30$)	Интервал времени	Количество человек со значениями $t_{нэ}$ в этом интервале
Нормальное	3,40; 3,11; 2,54; 2,42; 2,41; 2,40; 2,28; 2,25; 2,21; 2,19; 2,18; 2,13; 2,13; 2,04; 2,03; 1,98; 1,93; 1,82; 1,70; 1,63; 1,52; 1,39; 1,36; 1,36; 1,36; 1,24; 1,12; 0,97; 0,89; 0,71	до 1 мин.	3
		от 1 до 2 мин.	12
		от 2 до 3 мин.	13
		свыше 3 мин.	2
Равномерное	3,60; 3,38; 3,36; 3,32; 3,25; 3,18; 3,06; 2,70; 2,64; 2,64; 2,52; 2,44; 2,28; 2,24; 1,99; 1,70; 1,60; 1,38; 1,34; 1,28; 1,14; 1,06; 0,81; 0,70; 0,67; 0,66; 0,57; 0,32; 0,28; 0,21	до 1 мин.	8
		от 1 до 2 мин.	8
		от 2 до 3 мин.	7
		свыше 3 мин.	7
Логнормальное	3,95; 3,47; 3,28; 2,91; 2,61; 2,55; 2,48; 2,46; 2,33; 2,25; 2,05; 2,03; 2,01; 1,93; 1,92; 1,80; 1,77; 1,68; 1,60; 1,58; 1,53; 1,51; 1,11; 1,05; 0,95; 0,96; 0,92; 0,90; 0,88; 0,89	до 1 мин.	6
		от 1 до 2 мин.	11
		от 2 до 3 мин.	10
		свыше 3 мин.	3

Анализ полученных выборочных совокупностей показывает, что при использовании в расчётных сценариях эвакуации равномерного распределения и логнормального закона увеличивается вероятность появления большего количества людей с высокими значениями времени начала эвакуации в диапазоне значений $[(\mu + 2\sigma); \mu + 3\sigma]$, что будет увеличивать общее время эвакуации. Однако, применение нормального закона ведет к увеличению нагрузки на эвакуационные пути и выходы, так как значительное количество людей (почти 70 % из диапазона $[\mu - \sigma); \mu + \sigma]$) подходит в ограниченный интервал времени к эвакуационным выходам, что может вести к образованию задержек движения и скопления людей. Это указывает на необходимость дифференциации законов распределения в зависимости от численности людей в здании.

Многовариантный анализ показал, что в случае, если количество людей на этаже невелико (не более 50 человек на один эвакуационный выход), то к прогнозированию наихудшего сценария ведут равномерный и логнормальный законы, а если больше 50 человек – то нормальный закон распределения.

Весьма показательным с рассматриваемых позиций сравнение характерных результатов моделирования эвакуации с этажей зданий: гостиницы ($N = 56$ чел., количество источников – 28, длина коридора – 50 м, ширина входа в лестничную клетку – 0,8 м), офисного здания ($N = 244$ чел., количество источников – 28, длина коридора – 50 м, ширина входа в лестничную клетку – 1,2 м) и торгового комплекса ($N = 644$ чел. количество источников – 16, длина коридора 60 м, ширина входа в лестничную клетку – 1,2 м), табл. 2.

Таблица 2

Сравнение результатов расчётов процесса эвакуации при использовании различных законов распределения $t_{нэ}$

Закон распределения	Тип здания					
	Гостиница		Административное здание		Торговый комплекс	
	$t_{эв}$, мин.	$t_{ск}$, мин.	$t_{эв}$, мин.	$t_{ск}$, мин.	$t_{эв}$, мин.	$t_{ск}$, мин.
Нормальный	4,22	0,00	4,56	1,20	10,66	8,66
Логнормальный	4,42	0,00	5,11	0,00	10,42	8,08
Равномерный	4,77	0,00	4,76	0,00	10,19	8,25

Примечание: $t_{эв}$ – время эвакуации; $t_{ск}$ – время существования скопления людей

Полученные результаты показывают, что для зданий различных классов функциональной пожарной опасности целесообразно использовать различные законы распределения случайной величины $t_{нэ}$ для прогнозирования наиболее пессимистичных сценариев развития ситуации. Однако, в настоящее время значения времени $t_{нэ}$ принимаются одинаковыми для всех людей в здании (кроме помещения с очагом пожара, но и в этом случае значения $t_{нэ}$ принимаются равными для всех людей в помещении) и движение к выходам начинается для всех одновременно, то есть никакого распределения значений не предусматривается [7].

В связи с этим, введение изменений в нормативную базу, связанных с назначением конкретных значений $t_{нэ}$ для каждого человека на основе сложных законов распределения, представляется следующим этапом работы. Тем не менее, уже в настоящее время для исправления явных несоответствий методики [7] необходимо введение вариабельности времени начала эвакуации людей в диапазоне $t_{нэ}^{\min}$ и $t_{нэ}^{\max}$. Совокупность изложенных выше соображений предопределяет **необходимость использования равномерного закона распределения** как наиболее доступного для решения практических задач.

Переход от нормального (логнормального) распределения к равномерному можно осуществить из следующих соображений. Очевидно, что высота распределения всегда вычисляется из условия нормировки: полный интеграл от плотности вероятности должен быть равен единице. Поэтому задача сводится к определению границ интервала изменения равномерно распределенной случайной величины. Необходимо выбрать границы интервала из условия, чтобы среднее значение и дисперсия полученного распределения совпадали с исходным средним и дисперсией. Так как для равномерного распределения среднее $\mu = (a + b)/2$, а дисперсия $D = \frac{(b - a)^2}{12}$, (где a, b – границы интервала), то получается линейная система для неизвестных a и b :

$$a + b = 2\mu, \quad (9)$$

$$b - a = \sqrt{12D}. \quad (10)$$

Тогда, решая (9) и (10) относительно a и b получим:

$$a = \mu - \sqrt{3D}, \quad (11)$$

$$b = \mu + \sqrt{3D}. \quad (12)$$

Плотность вероятности равномерного распределения будет (из условия нормировки):

$$h = \frac{1}{b - a} = \frac{1}{2\sqrt{3D}} \quad (13)$$

или

$$h = \frac{1}{2\sigma\sqrt{3}}. \quad (14)$$

Соотношение (10) позволяет математически корректно переходить от нормального (логнормального) к равномерному закону распределения. В дальнейшем, безусловно, необходимо учитывать различия в формировании значений времени начала эвакуации в зданиях различных классов функциональной пожарной опасности.

Заключение

В настоящее время в методике расчёта рисков [7] содержатся недостаточно обоснованные и некорректные положения нормирования времени начала эвакуации. На наш взгляд, одной из принципиальных задач, является исправление сложившейся правоприминительной практики "ожидания" человеком истечения времени $t_{нэ}^{max}$ для того, что бы приступить к эвакуации, что совершенно не соответствует тому, что в реальности происходит при пожарах. В рамках данной работы рассматриваются варианты распределения значений $t_{нэ}$ в интервале времени начала эвакуации.

Анализ полученных результатов показал, что сегодня можно говорить о трёх законах распределения времени начала эвакуации: нормальном, логнормальном и равномерном. Исследование законов распределения показало, что для прогнозирования наиболее пессимистичных сценариев эвакуации необходимо использовать различные законы распределения для зданий различных классов функциональной пожарной опасности. Однако, ввиду невозможности резкого перехода от сложившейся к настоящему времени практики учёта этого параметра к более развитой концепции нормирования $t_{нэ}$, в настоящее время для решения практических задач с учётом фактических особенностей процесса эвакуации следует использовать равномерный закон распределения.

Литература

1. **Никонов С.А.** Разработка мероприятий по организации эвакуации при пожарах в зданиях с массовым пребыванием людей на основе моделирования движения людских потоков: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1985.
2. **ГОСТ 12.1.004-91***. Пожарная безопасность. Общие требования.
3. **МГСН 4.19-2005**. Временные нормы и правила проектирования многофункциональных высотных зданий и зданий-комплексов в городе Москве.
4. **СТО НОСТРОЙ 2.35.73-2012**. Национальное объединение строителей. Стандарт организации. Инженерные сети высотных зданий. Системы обеспечения комплексной безопасности высотных зданий и сооружений. М.: издОво БСТ, 2014. 205 с.
5. **Приказ** МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382 "Об утверждении методики определения расчётных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности".
6. **Приказ** МЧС России от 12 декабря 2011 г. № 749 "О внесении изменений в методику определения расчётных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности, утвержденную приказом МЧС России от 30.06.2009 № 382".
7. **Приказ** МЧС России от 2 декабря 2015 г. № 632 "О внесении изменений в приказ МЧС России от 30.06.2009 № 382".
8. **Государственный контракт** 2012-08.708-47-044 "Разработка норм пожарной безопасности объектов сферы образования на основе программного комплекса по осуществлению эвакуационных мероприятий в образовательных дошкольных учреждениях". Минобрнауки России, Академия ГПС МЧС России. М., 2013. 229 с.
9. **Белосохов И.Р.** К проблеме формирования продолжительности времени начала эвакуации // Технологии техносферной безопасности. Вып. 2 (36). 2011. 9 с. <http://ipb.mos.ru/ttb>.
10. **Samoshin D.A., Belosokhov I.R.** Pre-movement time in public buildings: experiments and their practical application // International Scientific and Technical Conference "Emergency evacuation of people from buildings". Warsaw, 2011. Pp.299-308.

11. **Парфененко А.П.** Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в зданиях детских дошкольных образовательных учреждений: дис. ... канд. техн. наук. М. : Академия ГПС МЧС России, 2012.
12. **Fahy R.F., Proulx G.** Toward Creating a Database on Delay Times to Start Evacuation and Walking Speeds for Use in Evacuation Modeling // Proceedings of the 2nd International Conference on Human Behaviour in Fire. Boston, Interscience Communication Ltd, 2001.
13. **Proulx G.** The Time Delay to Start Evacuation Upon Hearing a Fire Alarm // Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 38th Annual Meeting, 1994.
14. **Brennan P.** Timing Human Response in Real Fires // Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science, 1997.
15. **ISO/TR 16738:2009.** Fire-safety engineering. Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people.
16. **Shields T.J., Boyce K.E.** A study of evacuation from large retail stores // Fire Safety Journal, 2000. Vol. 35. Pp. 25-49.
17. **Proulx G.** Evacuation Time and Movement in Apartment Buildings // Fire Safety Journal, 1995. Vol. 24. Pp. 229-246.
18. **Nilsson D., Johansson A.** Social influence during the initial phase of a fire evacuation – Analysis of Evacuation experiments in a cinema theatre // Fire Safety Journal, 2009. Vol. 44. Pp. 71-79.
19. **Machado Tavares R., Gwynne S., Galea E.R.** Collection and Analysis of Pre-Evacuation Time Data Collected from Evacuation Trials Conducted in Library Facilities in Brazil // Journal of Applied Fire Science, 2006-2007. Vol. 15. No. 1. Pp. 23-40.
20. **Ермаков С.М., Михайлов Г.А.** Курс статистического моделирования. М.: Наука, 1976. 320 с.