

В.В. Холицевников, И.С. Кудрин
(Академия ГПС МЧС России, reglament2004@mail.ru)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ С УЧЁТОМ СТОХАСТИЧНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА В ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЯХ

Проведён анализ влияния внешних условий на стохастичность распространения опасных факторов пожара в высотном здании. По результатам моделирования определены показатели систем противопожарной защиты, обеспечивающие безопасную эвакуацию людей.

Ключевые слова: моделирование пожара, эвакуация, высотные здания.

V.V. Kholshchevnikov, I.S. Kudrin

ENSURING THE SAFE EVACUATION OF PEOPLE WITH CONSIDERATION THE STOCHASTIC SPREAD OF FIRE HAZARDS IN HIGH-RISE BUILDINGS

Analysis of influence of external factors on the stochastic spread of fire hazards in high-rise buildings. As a result of fire simulations, the required characteristics for fire protection systems, which ensure the safe evacuation of people was determined.

Key words: fire modeling, evacuation, high-rise building.

Общее положение

Обеспечение безопасности людей в высотных зданиях при пожаре требует моделирования процессов движения людей, определяющих **время их эвакуации ($t_{эб}$)**, и моделирования динамики распространения **опасных факторов пожара (ОФП)**, определяющих **время блокирования ($t_{бл}$) путей эвакуации**. Нормативно это регламентируется ФЗ № 123 "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" и осуществляется согласно методике, разработанной в соответствии с его требованиями [1].

Распространение ОФП – сложный физико-химический процесс, начало изучения которого приходится на середину XVIII века. Оно заложило основы термодинамики и математической модели пожара, практическая реализация которой стала возможной, лишь в последние десятилетия, благодаря интенсивному развитию вычислительной техники. В противопожарном нормировании значения необходимого времени для последовательных этапов эвакуации ($t_{нб} = 0,8 t_{бл}$) впервые были приведены в СНиП II-2-80. Они были установлены [2] на основании ограниченного количества эмпирических данных о произошедших пожарах. Сегодня для расчёта времени блокирования путей эвакуации используются интегральные, зонные и дифференциальные (полевые) модели пожара.

Модели отражают, с одной стороны, последовательные этапы развития моделирования термодинамики пожара [3-5], с другой – имеющиеся возможности их программной реализации. Каждая из этих моделей является вехой

на многотрудном пути исследований термодинамики пожара. Как известно, интегральная модель описывает изменение во времени средних по объёму помещения значений параметров опасных факторов. В зонной модели объём помещения подразделяется на зоны по высоте (как правило, две) и для каждой из них описывается динамика средних значений ОФП. Наиболее подробная полевая модель дифференцирует пространство на элементарные объёмы-кубы и описывает динамику значений ОФП в каждом из них, давая тем самым наиболее точную картину изменений значений ОФП в любом возможном месте нахождения человека. Степень точности полевой модели зависит от величины элементарных объёмов, то есть от величины размеров ячеек пространственной сетки, используемой для дифференциации объёма помещения.

Широкое практическое применение полевой модели стало возможным с развитием вычислительной техники. Сегодня имеются программные комплексы, реализующие эту модель, и грамотный пользователь может применить их для определения: "Каким же временем ($t_{нб}$) располагает человек для своей временной эвакуации ($t_{эв} \leq t_{нб} = 0,8 \cdot t_{ол}$).

В России полевая модель впервые была разработана в диссертации А.М. Рыжова [6] в 1986 г. Далее, значительно повлияли на развитие полевой модели И.Ф. Астахова, С.В. Пузач и др. Однако, сегодня ***программное обеспечение модели отсутствует как в свободном доступе, так и для коммерческого пользования.***

Среди зарубежных программ можно выделить универсальные (ANSYS CFX, FLUENT, STAR-CD) и специализированные программы (JASMINE, SOFIE, SMARTFIRE, PHOENICS и FDS). Для возможности пользования в России из этих программ выделим SMARTFIRE, FDS и SOFIE. Однако, SMARTFIRE и SOFIE – коммерческие программы. Лишь FDS является свободно распространяемой, благодаря чему она может применяться широким кругом пользователей в различных странах. Это обеспечивает воспроизводимость результатов, полученных разными авторами, и возможность совместного поиска рационального решения общих задач обеспечения безопасности людей при пожаре. Поэтому программное обеспечение FDS было использовано при анализе вероятных значений $t_{ол}$ в высотных зданиях.

Из технического руководства "Fire Dynamics Simulator (Version 5)" следует, что программа основана на решении уравнения Навье-Стокса и все уравнения, требуемые [1] для реализации полевого метода расчёта, представлены в качестве основополагающих (уравнение сохранения массы, энергии, импульса, химического компонента).

Кроме того, немаловажным является тот факт, что модель FDS успешно прошла оценочные испытания: валидацию и верификацию.

Во всех вариантах моделирования распространение опасных факторов пожара описывается как детерминированный процесс. Стремление к детерминированному описанию (из-за его простоты) традиционно, но, когда нормиро-

ванием требуется точность прогнозирования с вероятностью 0,999, оно становится недостаточным, поскольку время наступления предельно допустимых для человека значений ОФП определяется по результатам расчёта лишь одной реализации процесса их распространения.

Экспериментальная проверка моделей динамики ОФП, когда исходные данные для теоретических расчётов совпадают с исходными данными в эксперименте, позволяют судить только о корректности самой модели. При решении же задач по обеспечению безопасности людей стоит задача не только правильно воспроизвести динамику процесса при заданных условиях, но также спрогнозировать возможную ситуацию при вероятных вариациях реальных условий, зависящих от множества изменяющихся факторов и комбинаций их сочетаний. Стремлением избежать ошибки при нормировании $t_{нб}$ в сторону увеличения этой величины можно объяснить то, что расчётное время наступления предельно допустимых (критических) значений ОФП – $t_{кр}$ – умножается на коэффициент $K = 0,8$. Однако, для того, чтобы обоснованно принимать значение этого коэффициента, необходимо знать распределение случайной величины $t_{кр}$, которое описывается её дисперсией $\sigma_{t_{кр}}^2$ для различных ситуаций.

Случайные факторы, влияющие на параметры ОФП, можно подразделить на две группы: свойства пожарной нагрузки и внешние условия. Количественный и качественный состав пожарной нагрузки в реальной ситуации может отличаться от расчётной даже для однотипных её видов. Так, например, давно экспериментально показано [7], что для комбинированной пожарной нагрузки **дымообразующая способность** D_k определяется по формуле:

$$D_k = \sum_i^k D_i M_i / M_o,$$

где k – количество компонентов пожарной нагрузки;

M_i – вес i -го компонента пожарной нагрузки;

M_o – вес всей пожарной нагрузки;

D_i – дымообразующая способность i -го компонента.

Из этой формулы видно, что показатель D_k находится в прямой количественной зависимости от многообразия возможных сочетаний компонентов всей пожарной нагрузки.

О неоднозначности свойств материалов пожарной нагрузки свидетельствуют данные об их характеристиках, полученные из различных литературных источников, которые показывают, что свойства одного и того же материала существенно изменяются в зависимости от его агрегатного состояния, обработки, размещения и т.п. Так, например, может быть рассмотрена типичная для высотных конторских зданий (Ф4.3) пожарная нагрузка, состоящая из мебели, книг и бумаги. Низшая теплота сгорания такой пожарной нагрузки может быть принята постоянной ($Q_n^p = 13400 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$). Также постоянными принимаются значения: коэффициента полноты сгорания ($\eta = 1$), коэффициента потерь тепла на нагрев ограждающих конструкций ($\varphi_n = 0,55$), эмпирического коэффициента приведения среднеобъёмной температуры к уровню рабочей зоны ($\alpha = 1,3$), высота рабочей зоны ($h = 1,5 \text{ м}$), критическое значение температуры на уровне

рабочей зоны ($t_{кр} = 343 \text{ с}$). В качестве случайных рассматриваются только две величины: линейная скорость выгорания V_l и массовая скорость выгорания ψ_v . Распределение вероятности значений в интервалах их возможных изменений $V_l \in [0,02 \text{ мс}^{-1}; 0,07 \text{ мс}^{-1}]$, $\psi_v \in [0,003 \text{ кгм}^{-2}\text{с}^{-1}; 0,012 \text{ кгм}^{-2}\text{с}^{-1}]$ принято равномерным. С использованием генератора случайных чисел производится 300 расчётов (реализаций) при значениях V_l и ψ_v , выбираемых из указанных интервалов их возможных изменений [8].

На рис. 1 представлена гистограмма распределения плотности вероятности значений ОФП, полученная в результате расчётов.

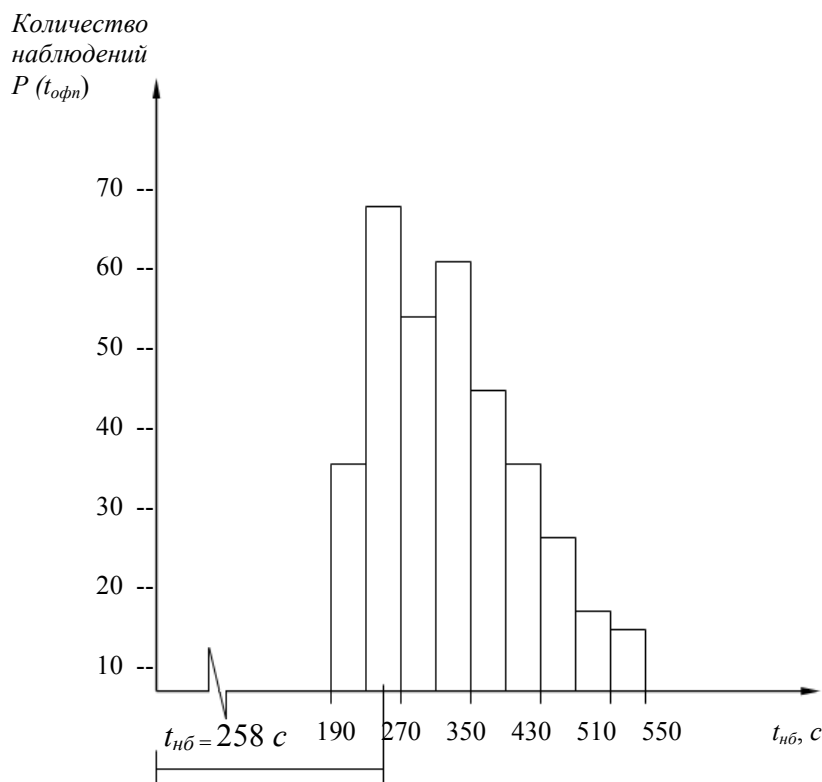


Рис. 1. Гистограмма распределения времени наступления критических значений опасных факторов пожара с учётом коэффициента безопасности 0,8 ($t_{н.б.}$) в помещении объёмом 17500 м^3 на уровне 1,5 м

В данном случае опасным фактором пожара, первым достигающим предельных значений, оказывается температура на уровне рабочей зоны.

Как видно из гистограммы на рис. 1, распределение плотности вероятностей значений $t_{кр}$ ассиметричное, имеющее минимальное значение $\min t_{кр} = 192 \text{ с}$ и математическое ожидание $m(t_{кр}) = 318 \text{ с}$.

Если же произвести детерминированный расчёт времени $t_{кр}$ при средних значениях $V_l = 0,045 \text{ мс}^{-1}$ и $\psi_v = 0,0075 \text{ кгм}^{-2}\text{с}^{-1}$, то получим: $t_{кр} = 322 \text{ с}$ и $t_{нб} = 258 \text{ с}$. Как видно, значение $t_{нб}$ более чем на треть превышает возможное значение $t_{кр}$ и, следовательно, значительно занижает уровень опасности воздействия ОФП, вводя тем самым в заблуждение и разработчиков систем активной противопожарной защиты, и их потенциальных приобретателей, и пользователей.

Влияние внешних факторов на стохастичность процесса распространения ОФП, проявляющееся в изменениях кинематики газовой среды, никогда не анализировалось прежде. Поэтому было организовано несколько серий экспериментов численного моделирования процесса по программе FDS, кинематические изменения которого имитировались за счёт различных вариантов расположения клапанов противодымной защиты в рассматриваемом объёме, изменений их производительности и систем пожаротушения. Оценка влияния этой "рукотворно создаваемой" стохастичности даёт возможность приблизиться к установлению пессимистических значений $t_{\text{бл}}$ и определить количественные показатели требований к системам противопожарной защиты высотных зданий, способствующие реальному выполнению условия $t_{\text{эв}} \leq 0,8 \cdot t_{\text{бл}}$ при вероятных параметра движения людских потоков во время эвакуации ($t_{\text{эв}}$) из высотных зданий последовательно на всех её этапах.

Первый этап. Опасные факторы пожара в помещениях

Помещение – наиболее вероятное место возникновения очага пожара. В качестве объекта исследования использовалась модель помещения (рис. 2) площадью 4×6 м с размещением типовой для офисов пожарной нагрузки: мебель (столы, стулья, шкафы).

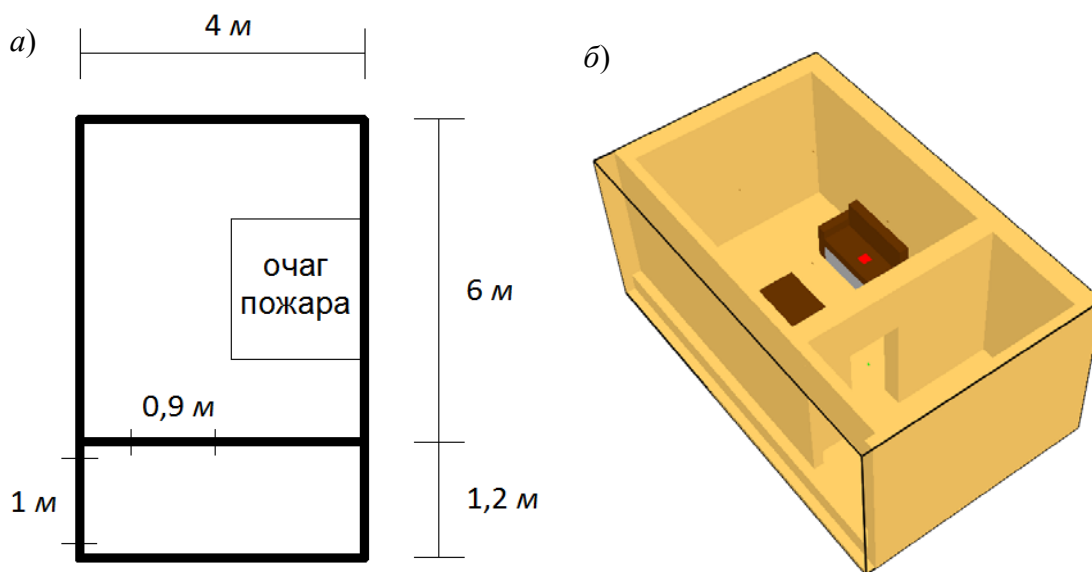


Рис. 2. Помещение для моделирования ОФП:
а) план моделируемого помещения,
б) моделируемое помещение в графическом редакторе Pyrosim

Исходная позиция для моделирования: развитие пожара – в начальной стадии: внутри зоны горения возникшего неконтролируемого очага пожара и вокруг неё температура такова, что скорость тепловыделения выше скорости отвода тепла из зоны горения, что обуславливает ускорение процесса горения. В результате этого процесса постепенно происходит распространение пламени на всё помещение. Поэтому распределение значений параметров опасных фак-

торов пожара по объёму помещения неравномерное. В качестве контрольной точки значений ОФП установлена точка на выходе из помещения на высоте 1,7 м, поскольку при достижении в ней критического значения одного из опасных факторов пожара безопасная эвакуация человека из помещения становится невозможной.

Задача моделирования первого варианта развития пожара – определить время ($t_{кр}$) достижения критического уровня воздействия ОФП в контрольной точке и его носителя (температура, дым, токсичность составляющих образующейся газозвдушной смеси) при нефункционирующих системах противодымной защиты и пожаротушения.

Поскольку, согласно требованиям ФЗ №123 – "Система противодымной защиты здания, сооружения или строения должна обеспечивать защиту людей на путях эвакуации и в безопасных зонах от воздействия опасных факторов пожара в течение времени, необходимого для эвакуации людей в безопасную зону, или всего времени развития и тушения пожара посредством удаления продуктов горения и термического разложения и (или) предотвращения их распространения" (Статья 56. ч.1), то задача моделирования второго варианта развития пожара состояла в определении целесообразного месторасположения клапана системы дымоудаления и влияния его производительности (расхода воздуха) на увеличение значения $t_{кр}$.

ФЗ №123 также требует: "Автоматические установки пожаротушения должны обеспечивать достижение одной или нескольких из следующих целей: 1) ликвидация пожара в помещении (здании) до возникновения критических значений опасных факторов пожара..." (Статья 61, ч.2). Поэтому задача моделирования третьего варианта развития пожара состояла в определении условий, при которых система АУПТ спринклерного типа (рис. 3) может обеспечить достижение этой цели.

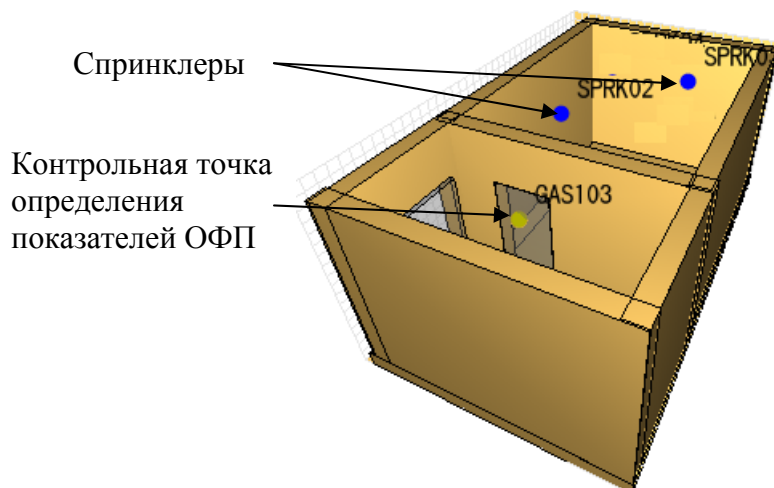


Рис. 3. Схема расстановки спринклеров в помещении

Результаты расчётов распространения ОФП при моделировании трёх перечисленных вариантов развития пожара в помещении приведены в табл. 1.

Результаты вариантов моделирования пожара в помещении

Изменяющийся параметр	Количественное значение параметра	Расположение в помещении	Время наступления критического значения опасного фактора пожара на выходе из помещения, $t_{кр}$, с
Без систем противопожарной защиты	–	–	35,1
Расход воздуха через клапан дымоудаления	5 м ³ /с	Стена, противоположная выходу	65,4
	8 м ³ /с	Стена, противоположная выходу	139
	9 м ³ /с	Стена, противоположная выходу	179
	10 м ³ /с	Стена, противоположная выходу	не наступает
	11 м ³ /с	Стена, противоположная выходу	не наступает
Спринклерная система	1,76 л/с	–	35,1
	6,7 л/с	–	35,1
	1,76 л/с*	–	не наступает

* В данном примере рассматривается применение автоматической установки спринклерного пожаротушения с принудительным пуском, срабатывающей от дымового извещателя пожарного с уменьшенным временем инерционности до 5 с

Результаты моделирования пожара в помещении без функционирующих систем противопожарной защиты показывают, что фактором, значения которого первыми достигают критического уровня воздействия, является потеря видимости.

Как показывают опросы людей, находившихся вблизи очага пожара, около 20 % из них тушили пожар, что называется, "до последней возможности". Когда же исчерпываются последние возможности людей тушить пожар? Очевидно, тогда, когда воздействия ощущаемых факторов пожара достигают "терпимых" пределов. Если эти пределы соответствуют значениям критических уровней воздействия ОФП, то время их наступления ($t_{кр}$) в плоскости вблизи очага пожара, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Время (с) наступления критических значений опасных факторов пожара в помещениях площадью от 10 м² до 50 м² с пожарной нагрузкой типа конторской

Площадь, м ²	Видимость (м)			HCL	Температура	Тепловой поток	O ₂	CO ₂	CO
	20	10	5						
10	19,9	28,9	38,7	20,3	44	88,5	96	-	-
20	24,7	38,5	46,4	29,6	53	138,6	120	-	-
30	26,8	42,2	52,6	31,2	61,2	160,2	141	-	-
50	33	50,8	60,6	43	73,8	200	160	-	-

Данные табл. 2 показывают, что первым ощущаемым человеком опасным фактором пожара в помещениях различной площади является дым, сокращающий предел видимости. И хотя имеются данные [9] о возможности движения человека в дыму при видимости менее 5 м, следует обратить внимание на то, что через несколько секунд воздействие на него неоощуемого НСL достигает критических значений. При сокращении нормируемого предела видимости до 10 м, НСL становится первым критическим фактором в помещениях любого объёма. Исходя из этих соображений нормирование значения $t_{нэ}$ для помещений очага пожара по потере видимости на расстоянии 20 м получает дополнительную аргументацию.

В зависимости от площади помещения (F) очага пожара значение $t_{кр}$, нормируемое исходя из этих соображений, может быть определено по формуле:

$$t_{кр} = 19,56 + 0,227 F.$$

Как видно, человек располагает весьма ограниченным резервом времени для тушения пожара. Поэтому из помещений очага пожара в большинстве случаев целесообразно эвакуироваться.

Второй вариант моделирования позволяет определить рациональное размещение клапана системы дымоудаления в помещении. При этом расход принимался согласно данным [10]. В ходе моделирования, положение клапана регулировало направление воздушных потоков, обеспечивая смешивание продуктов горения со свежим воздухом, входящим в помещение. В этой серии экспериментов был выбран вариант расположения клапана, при котором опасные факторы пожара в помещении наступают за наибольшее время – стена противоположная относительно входа в помещение на высоте 1,5 м от уровня пола.

После того, как было установлено оптимальное положение клапана, определялись количественные показатели системы дымоудаления. Расход воздуха повышался до таких значений, при которых опасные факторы пожара перестали выходить за пределы помещения. Для данного помещения требуемый расход через клапан дымоудаления составил $10 \text{ м}^3/\text{с}$.

Данные третьего варианта моделирования пожара в помещении позволили установить два показателя: момент времени достижения температуры срабатывания спринклерного оросителя и время, требуемое для локализации горения.

В результате было установлено, что АУПТ срабатывает после достижения опасными факторами пожара критических значений. Это объясняется тем, что спринклерная система срабатывает от теплового воздействия, время достижения которого наступает позже потери видимости. Кроме того, после достижения температуры срабатывания оросителя необходимо учитывать время инерционного действия (номинальное время срабатывания). Только после этого происходит вскрытие колбы и поступление огнетушащего вещества в очаг пожара. Согласно ГОСТу Р 51043-2002, время инерционного действия составляет 300 с.

Отсюда следует, что для выполнения требований Федерального Закона №123 о недопущении распространения пожара за пределы помещения и удаления продуктов горения для безопасной эвакуации людей возможны два решения. Либо необходима разработка установки спринклерной системы, срабатывающей от термочувствительных спринклерных оросителей с гораздо более низким номинальным временем срабатывания, и устройство системы дымоудаления, которая будет рассчитана на удаление количества дыма, образовавшегося до срабатывания системы пожаротушения. Либо необходима установка автоматической системы пожаротушения, срабатывающей от дымовых пожарных извещателей с минимальным временем инерционности [11], что позволит обеспечить быструю локализацию и ликвидацию горения до достижения опасными факторами пожара критических уровней воздействия на людей.

Опасные факторы пожара, распространившись в пределах очага пожара, опускаются ниже верхней отметки двери, после чего попадают в другие помещения, коридор и распространяются в пределах этажа.

Литература

1. **Методика** определения расчётных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. М., 2012.
2. **Обоснование** допустимого времени эвакуации из зданий различного назначения: отчётная справка / Стрельчук Н.А., Ройтман М.Я., Башкирцев М.П., Кривошеев И.Н., Котов Н.Л. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1972.
3. **Кошмаров Ю.А.** Развитие пожара в помещении // Научный сборник ВНИИПО МВД СССР "Горение и проблемы тушения пожаров". М.: ВНИИПО МВД СССР, 1977.
4. **Воланин Е.** Температурный режим и газообмен в помещениях в условиях пожара при горении ЛВЖ: Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1983.
5. **Кошмаров Ю.А.** Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учебное пособие. М.: Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
6. **Рыжов А.М.** Моделирование на ЭВМ скоростных, температурных и концентрационных полей при пожарах в помещениях: Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1986.
7. **Ани Э.В., Григорьев Г.Н., Леонович А.А.** Дымообразующая способность древесных материалов // Безопасность людей при пожарах. М.: ВНИИПО МВД СССР, 1981.
8. **Никонов С.А.** Разработка мероприятий по организации эвакуации при пожарах в зданиях с массовым пребыванием людей на основе моделирования движения людских потоков: Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1985.
9. **ISO/TR 16738.** Пожарная безопасность – техническая информация о методах оценки поведения и движения людей / ISO/TR 16738 "Fire-safety engineering – Technical information on methods for evaluating behavior and movement of people", 2009.
10. **Есин В.М., Сидорук В.И., Токарев В.Н.** Пожарная профилактика в строительстве. М.: ВИПТШ МВД России, 1995.
11. **Белоусов Л., Дауэнгауэр С.** Спринклерные системы водяного пожаротушения с принудительным пуском // Алгоритм безопасности, № 6, 2009.

Статья опубликована 29 апреля 2013 г.