
МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЖАРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА FIRE DYNAMICS SIMULATOR

С.Ф. Лобова;

Т.А. Кузьмина, кандидат педагогических наук;

В.Г. Плотников.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Описано применение численного моделирования динамики пожара в ходе проведения пожарно-технической экспертизы. На конкретном примере продемонстрировано применение специализированного программного продукта Fire Dynamics Simulator для получения информации, необходимой пожарно-техническому эксперту для ответов на поставленные вопросы. Также сформулированы основные задачи, решение которых можно получить при осуществлении численного эксперимента, и допущения, в рамках которых моделируется динамика пожара полевым методом.

Ключевые слова: численное моделирование, полевая модель, пожарно-техническая экспертиза, Fire Dynamics Simulator

MODELLING OF DYNAMICS OF THE FIRE WITH USE OF THE SOFTWARE PACKAGE FIRE DYNAMICS SIMULATOR

S.F. Lobova; T.A. Kuzmina; V.G. Plotnikov.

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

Application of numerical modeling of dynamics of the fire is described during conducting fire investigation. On a concrete example use of the specialized Fire Dynamics Simulator software product for obtaining information is shown, to the expert necessary fire technically for answers to the questions posed. The main objectives which solution can be received at implementation of a numerical experiment, and assumptions within which dynamics of the fire is modeled by a field method are also formulated.

Keywords: numerical modeling, field model, fire and technical expertise, Fire Dynamics Simulator

Численное моделирование динамики пожара (полевое моделирование) – это с физико-математической точки зрения решение системы дифференциальных уравнений (системы Навье-Стокса для многокомпонентных неизотермических течений в существенно дозвуковом приближении) с заданными граничными и начальными условиями,

описывающими каждый конкретный сценарий пожара. Для решения данной системы уравнений используются численные методы, то есть решение уравнений с помощью специальных математических схем и компьютерных программ. Существует большое количество специализированных программ, способных не только решить данные уравнения численно, но и включающие в себя различные модели физических процессов, происходящих при пожаре. К таким моделям относятся модели турбулентности, модели горения, модели излучения. Все эти модели имеют различную степень точности и требуют разных вычислительных ресурсов.

В выбранной для решения поставленной задачи в данной работе программе Fire Dynamics Simulator (FDS) /10/ сочетаются достаточно точные численные модели указанных физических процессов. Моделирование крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES), моделирование горения с использованием концепции пассивного скаляра (переменная смешения, mixture fraction), решение уравнения переноса теплового излучения методом конечных объемов (finite volume method) корректно описывают естественно-конвективные пламена, наблюдаемые при пожарах.

Программа FDS прошла большое количество валидаций в научной среде и зарекомендовала себя как программа, решающая с большой степенью точности большинство инженерных задач в области пожарной безопасности.

Для удобства работы с программой FDS существует оболочка PyroSim, которая представляет собой графический интерфейс для FDS. PyroSim позволяет как построить расчетную модель с начальными и граничными условиями, так и работать с выходными данными, что значительно упрощает время ввода необходимых данных в программу FDS. Следует отметить, что программа PyroSim постоянно обновляется, соответствуя новым версиям FDS, что делает ее актуальной и востребованной для проведения численных расчетов.

В данной работе программа FDS в оболочке PyroSim использовалась для моделирования динамики естественно-конвективного пламени в условиях бокового ветра полевым методом, образовавшегося при горении одной из башен Псковского Кремля. Также осуществлялось моделирование передачи тепла от горячей башни на соседние конструкции.

Обстоятельства происшествия

Сообщение о пожаре в здании Власьевской башни Псковского Кремля, являющегося памятником федерального значения, поступило 27 апреля 2010 г. в 23 ч 28 мин от прохожего, наблюдавшего выход дыма, а затем и огня, с верхней части деревянного шатра башни.

Через 40 мин после обнаружения пожара во Власьевской башне поступило сообщение о возгорании кровли (шатра) башни Святых ворот, также входящей в комплекс Ансамбля Псковского Кремля. Кратчайшее расстояние между Власьевской башней и башней Святых ворот составляет около 135 м. Указанная башня расположена в северо-восточном направлении по отношению к Власьевской башне. Необходимо отметить, что в рассматриваемый период времени преобладал юго-западный ветер со скоростью 1–2 м/с, порывами до 10 м/с, то есть направление ветра совпадало с направлением расположения башни Святых ворот относительно Власьевской башни.

Здание Власьевской башни семиэтажное, размерами в плане 13,5x15,0 м, высота каменной части над уровнем земли составляет 13,3 м, общая высота башни с учетом высоты деревянной кровли (шатра) составляла 31,6 м.

Здание башни Святых ворот трехэтажное, размерами в плане 9,7x7,0 м, высота каменной части над уровнем земли составляет 12,5 м, общая высота с учетом высоты деревянной кровли (шатра) составляла 21,5 м.

Стены каменных частей башен выполнены из бутового камня. Кровли башен (шатры) выполнены из досок (теса) в два слоя.

В результате пожара были уничтожены кровли (шатры) Власьевской и Святых ворот башен, а также различному термическому воздействию подверглись конструкции, материалы отделки и оборудование, находящиеся в помещениях, расположенных на этажах каменной части Власьевской башни.

Учитывая ход развития пожара и последовательность возгорания деревянных шатров башен, следствием был поставлен вопрос о том, могли ли искры и горящие фрагменты кровли Власьевской башни, образовавшиеся при ее горении, достигнуть в раскаленном виде Башни Святых ворот и привести к возгоранию ее кровли при юго-западном ветре со скоростью 1–2 м/с и порывами до 10 м/с.

Из специальной литературы [1–3] известно, что искры, образующиеся при сгорании твердых веществ и материалов, в том числе и древесины, представляют собой твердые раскаленные частицы в газовом потоке, образующиеся в результате неполного сгорания или механического уноса горючих веществ.

На крупных пожарах мощнейшие конвективные потоки уносят и разбрасывают на большие расстояния не только раскаленные частицы угля, но и небольшие горящие фрагменты деревянных конструкций. Это уже не искры в прямом смысле этого слова, а раскаленные объекты, обладающие значительным запасом тепла и соответствующей зажигательной способностью. При сильном попутном ветре это может послужить причиной пожара.

Искры, образующиеся при сгорании твердых топлив, могут быть различных размеров, иметь различную температуру, химический состав. Очевидно, что чем частица больше и горячее, тем больше вероятность (при прочих равных условиях) на возникновение пожара. Так, например искра диаметром 2 мм пожароопасна, если имеет температуру 1 000 °С, диаметром 3 мм – 800 °С, 5 мм – 600 °С.

В работе [4] рассмотрен вопрос об особенностях разлета искр горючих материалов под действием ветра, в частности древесного угля, занесенных на высоту восходящими конвективными потоками пожара. В данной работе было показано, что горение в режиме тления существенно увеличивает время существования искры в качестве источника зажигания. Так, проведенные расчеты автором указанной статьи [4] показали, что искра древесного угля с начальным размером 5 мм за несколько секунд падения выходит на квазистационарный режим с температурой 870 °С. Далее, сохраняя зажигательную способность, она будет падать около 35 с вплоть до достижения размера в 1 мм. При этом вниз она сместится на 150 м. При скорости ветра в 6 м/с ее снесет на расстояние около 200 м.

Анализ имеющихся экспериментальных данных, а также информации, полученной от очевидцев различных пожаров, позволяет предположить, что в рассматриваемом конкретном случае пожара в Псковском Кремле восходящие конвективные потоки от пожара на кровле Власьевской башни вполне могли переместить горящие частицы древесного угля на значительную высоту и расстояние более 100 м. Этому также способствовали сильные порывы ветра (до 10 м/с) в юго-западном направлении (в направлении расположения башни Святых ворот). Сделанному предположению не противоречат и показания многих свидетелей, наблюдавших возгорание кровли башни Святых ворот, причем именно со стороны Власьевской башни.

Моделирование развития пожара

Для подтверждения сделанного предположения о возможности загорания одной башни от другой было проведено полевое моделирование турбулентного диффузионного факела (конвективной колонки), образующегося над Власьевской башней, в программном пакете FDS ver.5.

Математическая модель. Основные уравнения

Для описания турбулентного течения многокомпонентной смеси используются уравнения сохранения массы, импульса и энергии, формирующие систему уравнений Навье-Стокса для многокомпонентного неизотермического течения (существенно дозвуковое приближение) [5]:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0.$$

Уравнение баланса массы компонентов смеси:

$$\frac{\partial \rho \bar{Y}_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{Y}_\alpha}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial \bar{Y}_\alpha}{\partial x_j} + \bar{R}_\alpha.$$

Уравнение движения:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \left(\frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij,s}}{\partial x_j} \right) + \bar{\rho} g_i.$$

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial \rho \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{h}}{\partial x_j} = \frac{\partial P_0}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{q}_{rj}}{\partial x_j} + \dot{q}'''.$$

Для замыкания данной системы уравнений используются уравнение состояния идеального газа:

$$P_0 = R \rho \bar{T} \sum_{\alpha \neq C} \frac{\bar{Y}_\alpha}{M_\alpha}$$

и уравнение для энтальпии единицы массы, выраженной через массовые доли компонентов \bar{Y}_α , и энтальпию каждого из компонентов:

$$\bar{h}(Y_i, T) = \sum_i \bar{Y}_i \left(h_{f,i}^0 + \int_{T^0}^{\bar{T}} C_{p,i}(T) dT \right).$$

В данной системе уравнений линия означает осреднение (фильтрование).

Уравнения переноса решаются численно в расчетной области, показанной на рис. 1. Неизвестными являются плотность ρ , компоненты скорости u_j , энтальпия h , давление p . Кроме того, для решения данной системы уравнений необходимо моделирование следующих слагаемых: средняя скорость химической реакции \bar{R}_α (модель горения), тензор напряжений $\bar{\tau}_{ij}$ и турбулентная вязкость μ_t (модель турбулентности), радиационный перенос $\frac{\partial \bar{q}_{rj}}{\partial x_j}$ (модель излучения).

Граничные условия обсуждаются ниже.

Расчетная область и граничные условия

Расчетная область, моделировавшаяся в FDS, представлена на рис. 1. На данном рисунке показаны границы расчетной области, граничные и начальные условия.

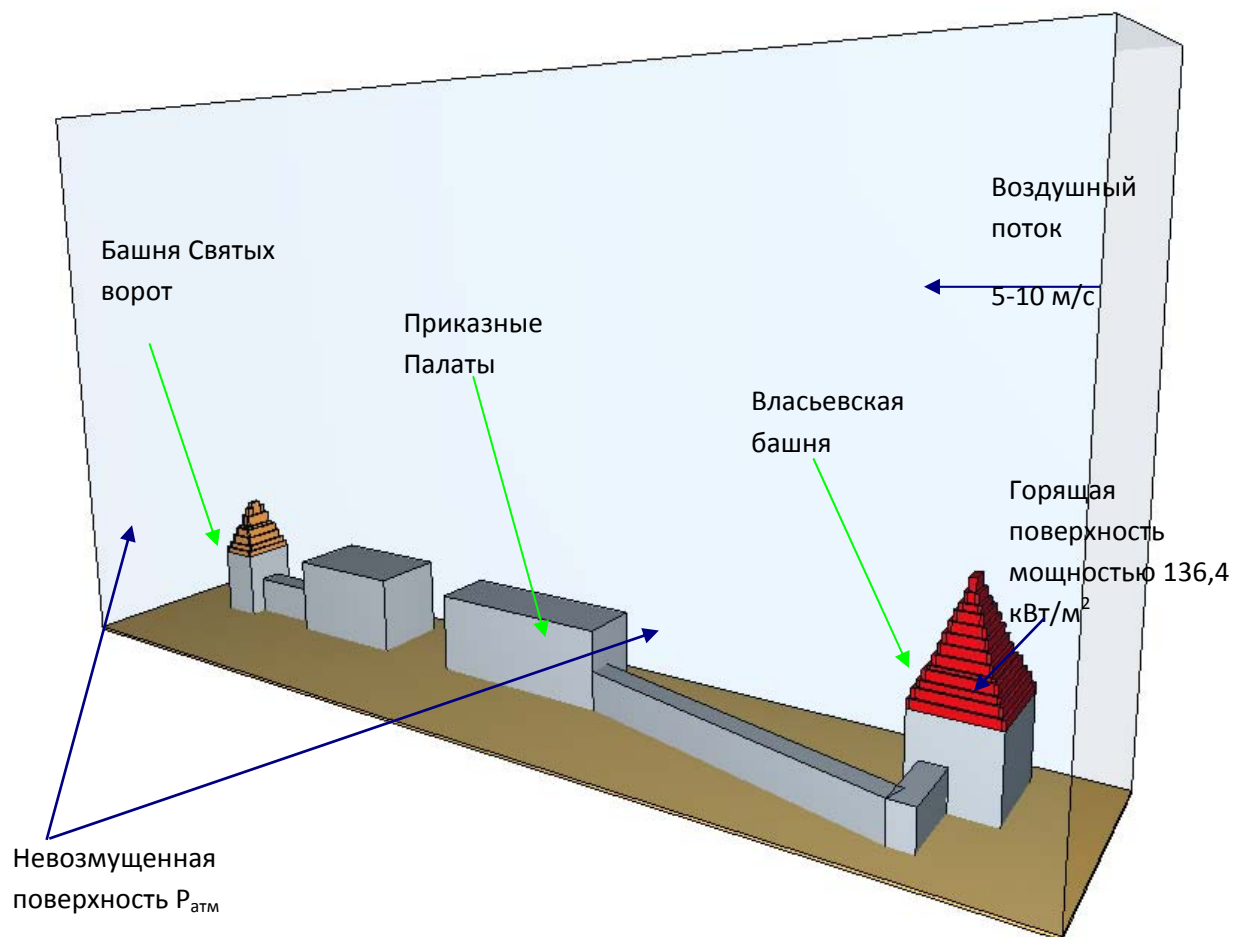


Рис. 1. Расчетная область

На рис. 1 изображены Власьевская башня, здания Приказных палат и Консистории, башня Святых ворот и элементы крепостной стены, расположенные между указанными зданиями. Расстояние между башнями составляет 135 м. На одной из границ расчетной области задавался входящий воздушный поток с переменной скоростью (5–10 м/с).

Власьевская башня моделировалась как каменное прямоугольное основание, на котором устанавливалась деревянная кровля. Для сокращения времени расчета моделировалась стадия пожара, когда вся кровля (шатер) охвачена пламенем. Мощность тепловыделения в этом случае составила 136,4 кВт/м².

Необходимые для расчета параметры пожарной нагрузки, а именно для материала «древесина», брались из специальной литературы [6, 7]:

- низшая теплота сгорания, кДж/кг – 12 400;
- удельная скорость выгорания, кг/м² с – 0,011;
- выделение газа угарного (CO), кг/кг – 0,004;
- выделение сажи, кг/кг – 0,015.

Выбор разрешения сетки основывался на следующем принципе [8]: размер ячейки сетки должен находиться в интервале от $0,25D^*$ до $0,0625 D^*$, где D^* – характеристический диаметр пожара:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}},$$

где \dot{Q} – мощность очага пожара, Вт; T_{∞} – температура воздуха, К; c_p – удельная теплоемкость воздуха, Дж/кгК; ρ_{∞} – плотность воздуха при температуре T_{∞} , кг/м³, g – ускорение свободного падения, м/с².

Для рассматриваемого случая значение D^* составило:

$$D^* = \left(\frac{1,0 \cdot 10^8}{1,2 \cdot 1000 \cdot 300 \cdot \sqrt{9,8}} \right)^{\frac{2}{5}} \approx 6.$$

Соответственно, максимальный размер ячейки сетки составил (грубая сетка):

$$\delta x = 0,25 \cdot D^* = 1,5,$$

минимальный размер ячейки сетки составил:

$$\delta x = 0,0625 \cdot D^* = 0,375.$$

В данной работе сетка строилась равномерной с размером ячейки сетки равным 0,5 м (рис. 2).

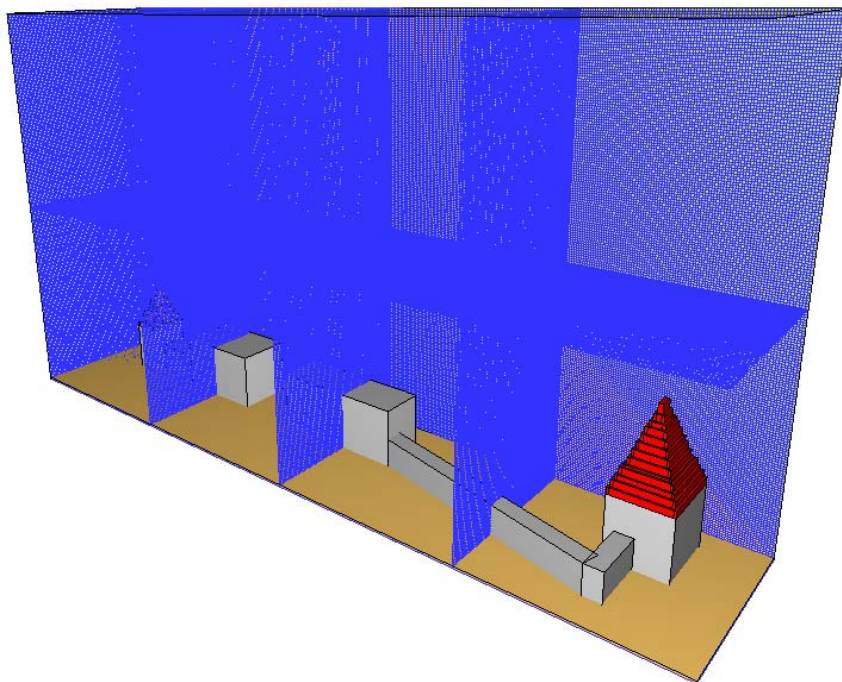


Рис. 2. Расчетные сетки

Результаты моделирования конвективной колонки, образовавшейся в процессе развития пожара на кровле (шатре) Власьевской башни, представлены на рис. 3, 6, 7.

На рис. 3 представлена описанная выше стадия горения Власьевской башни при скорости бокового ветра равной 5 м/с. Факел (конвективная колонка) под действием ветра отклоняется в сторону башни Святых ворот. Данное поведение факела также изображено на фотографии (рис. 4), сделанной в ходе развития пожара.



Рис. 3. Наклон факела от Власьевской башни в сторону башни Святых ворот, скорость ветра – 5 м/с



Рис. 4. Снимок Власьевской башни в процессе развития горения

Значение скорости ветра в ходе проведения моделирования менялось от 5 до 10 м/с (от среднего до максимального значения скорости ветра, регистрируемого во время пожара). При максимальной скорости ветра (10 м/с) факел практически «ложился» на строения

и полностью охватывал кровлю башни Святых ворот (рис. 6, 7). При этом горящие куски древесины (искры), летящие в конвективной колонке, могли осыпаться на встречающиеся преграды.

Из материалов по данному пожару известно, что на кровлю башни Святых ворот вода для тушения стала подаваться только после момента начала ее возгорания, что могло обеспечить длительный прогрев некоторой части, преимущественно верхней части, кровли со стороны Власьевской башни конвективной колонкой и падающими на нее искрами и горящими частицами древесины (рис. 5).



Рис. 5. Начало загорания и тушения шатра башни Святых ворот

На рис. 6 и 7 видно, что кровля (шатер) башни Святых ворот при скорости ветра 10 м/с оказывается полностью охваченной потоком дыма и горящих частиц. Так как верхняя часть кровли башни Святых ворот до момента ее возгорания не защищалась водой и находилась непосредственно в конвективной колонке, то это могло привести к возникновению горения ее конструкций.

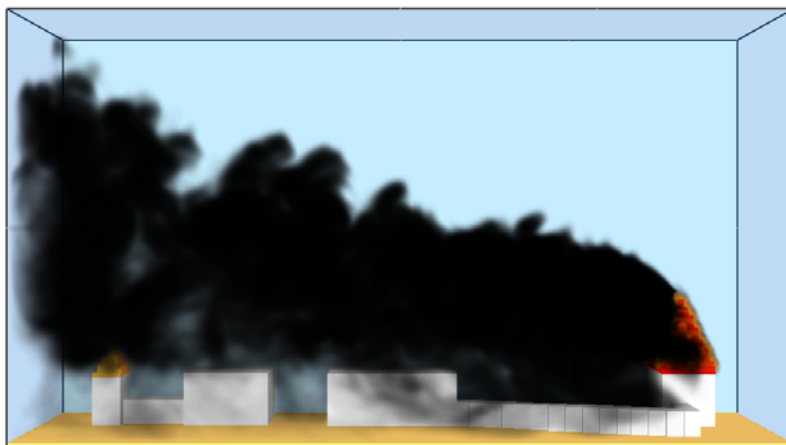


Рис. 6. Наклон факела при скорости ветра 10 м/с

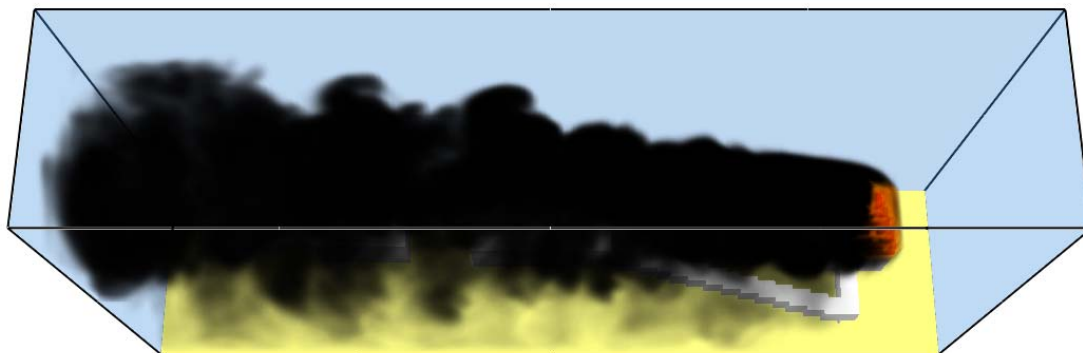


Рис. 7. Наклон факела при скорости ветра 10 м/с, вид сверху

На основании проведенного моделирования можно с уверенностью констатировать, что при юго-западном ветре со скоростью от 1–2 м/с до 10 м/с искры и горящие фрагменты кровли Власьевской башни могли непосредственно взаимодействовать с кровлей башни Святых ворот и тем самым привести к ее возгоранию.

Выводы

В данной работе для моделирования динамики пожара было применено полевое моделирование, осуществленное с помощью программы FDS в оболочке PyroSim. Применение данного метода для ответа на вопросы экспертизы позволило:

- получить наглядное представление картины пожара на основе физических законов;
- более детально исследовать необходимую область дополнительными методами (в дополнение к инструментальным методам, органолептическим);
- получать дополнительные подтверждения сделанным выводам.

Таким образом, численное моделирование динамики пожара позволяет эксперту ответить на многие вопросы, касающиеся физико-химических процессов, происходящих при пожаре. Однако следует помнить, что как и любая модель чего-либо полевое моделирование имеет ряд допущений и ограничений, это следует учитывать при интерпретации получаемых результатов. Так, в данной работе сделан лишь вероятностный вывод о возможности зажигания раскаленными частицами и горящими фрагментами кровли Власьевской башни на основании исследования поведения конвективной колонки. Процесс образования данных частиц и распределение их по размерам и температурам в программе не моделировался, так как для решения данной задачи требуется учет влияния многих физико-химических процессов, которые не предусмотрены в программе FDS. Поэтому, перед началом моделирования какого-либо процесса эксперту необходимо четко понимать, что возможно учесть в той или иной программе, а что потребует дополнительных исследований и других путей решения.

Вместе с тем представляется целесообразным включать в программу обучения пожарно-технических экспертов актуальную и систематизированную информацию, которая будет использоваться как в процессе дополнительного профессионального обучения сотрудников при оптимизации результативности предаттестационной подготовки действующих судебных пожарно-технических экспертов по ряду специализаций, так и для анализа нарушений нормативных требований в области пожарной безопасности, прогнозирования и экспертного исследования их последствий в ходе проведения судебных пожарно-технических экспертиз [9].

Литература

1. Чешко И.Д., Плотников В.Г. Анализ экспертных версий возникновения пожара: в 2-х кн. СПб.: ООО «Типография «Береста», 2010. Кн. 1.
2. Зернов С.И. Задачи пожарно-технической экспертизы и методы их решения. М.: ГУ ЭКЦ МВД РФ, 2001.
3. DeHaan Kirk, s J. Fire Investigation. BRADY Prentice Hall, 1997.
4. Шаршанов А.Я. Особенности определения радиуса разлета искр горючих материалов // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. трудов АПБУ. 2010. Вып. 27.
5. McGrattan K. Computational Fluid Dynamics and Fire Modeling, 2001.
6. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров. М.: Стройиздат, 1990.
7. Quintiere J.G. Principles of Fire Behavior.-Delmar Publishers, 1997.
8. Kevin McGrattan, etc. Fire Dynamics Simulator (version 5).User’s Guide, 2009. 200 с.
9. Kondratyev S.F., Petrova N.V., Voroncova A.A., Kuzmina T.A. Application of informative technologies and calculative methods in the forensic normative expertise and in professional education of forensic experts // IV International scientific conference on safety engineering and XIV International conference on fire and explosion protection. Republic of Serbia, Novi Sad. 2014. С. 110–118.

МЕТОД СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА В РЕШЕНИИ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ СИНТЕЗА ВИБРОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ

К.С. Иванов, кандидат технических наук, доцент;

Н.А. Мороз, кандидат технических наук;

А.В. Широухов.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Представлен алгоритм поиска оптимальных характеристик виброзащитных элементов, основанный на методе случайного поиска глобального экстремума по наилучшей пробе в направляющем конусе с переменным углом раскрытия. Для повышения эффективности поиска алгоритм дополнен методами статистического градиента, наискорейшего спуска и методикой поиска вдоль граничных поверхностей в параметрическом пространстве.

Ключевые слова: оптимизируемый параметр, приращение критерия качества, наилучшая проба, статистический градиент, метод наискорейшего спуска

THE RANDOM SEARCH METHOD IN THE SOLUTION OF THE OPTIMIZATION PROBLEM OF SYNTHESIS OF VIBRATION ISOLATION SYSTEMS

K.S. Ivanov; N.A. Moroz; A.V. Shiroukhov.

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

The article presents an algorithm for ending the optimal characteristics of the vibration isolation elements based on the method of random search for the global optimum at the best sample in the guide cone with a variable opening angle. To improve the efficiency of the search algorithm is supplemented by statistical gradient, steepest descent and the method of searching along the boundary surfaces in parametric space.