

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИЯХ СУДНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРЕ

Г. Ф. Малыхина, А. И. Гусева, А. С. Невельский (Санкт-Петербург)

Введение. Срабатывание пожарных извещателей систем пожарной сигнализации (СПС) производится с использованием так называемого «порогового» принципа при достижении контролируемых параметров таких, как температура, ослабление светового потока в камере дымового пожарного извещателя, концентрация газов, заданных нормативных значений. Опыт эксплуатации пороговых СПС показал, что вероятность достижения параметрами критических значений при наличии внешних факторов (работа энергетических установок, пыль в помещениях, экстремальные климатические воздействия и т.п.) довольно велика. Количество ложных пожарных тревог поподобным причина настолько велико, что снижает доверие к сигналам СПС и требует перепроверки получаемой информации.

Недостаточная эффективность пороговых СПС является общей проблемой для всех производителей систем противопожарной автоматики. Ведущие зарубежные производители СПС ведут поиск разработку подходов к созданию СПС нового поколения. Такие системы будут основаны на мультикритериальном алгоритме обнаружения пожара. Непрерывный контроль нескольких параметров, являющихся возможными факторами пожара (дым, тепло, углекислый и угарный газ) от момента включения СПС до возникновения возгорания и формирования сигнала пожарной тревоги на основе анализа относительно изменения этих параметров во времени. Нормируемой величиной, при достижении которой объявляется пожарная тревога, является «дельта-фактор» – первая конечная разность значений контролируемых параметров, которая характеризует их допустимое возрастание.

Применение мультикритериальных алгоритмов обнаружения пожаров в корабельных СПС, основанных на контроле скорости изменения параметров, является значительным шагом вперед. Однако эти алгоритмы не позволяют учитывать внешние влияющие факторы, например, включение энергетических установок или нагревательных устройств, проявление климатических воздействий.

Поэтому целесообразно разработать более сложный алгоритм обработки сигналов мультисенсорной СПС, который позволяет учесть пространственно-временные зависимости между контролируемыми параметрами в нормальных условиях и при возникновении возгораний и внешние влияющие параметры. Решение этой задачи позволит добиться ряда положительных результатов:

- повышение достоверности обнаружения пожаров;
- снижение ложных тревог вплоть до их исключения;
- выявление пожаров на ранней стадии их возникновения.

Несмотря на ожидаемый положительный эффект, внедрение мультикритериального подхода в корабельные СПС сдерживается отсутствием обоснованных требований к критериям принятия решений и норм по установке мультикритериальных пожарных извещателей в помещениях различного назначения.

На начальных этапах разработки нового мультикритериального алгоритма его настройку и исследование целесообразно проводить с использованием математической модели пожара в судовых помещениях. Поэтому разработка модели пожара и проверка ее адекватности является важным этапом разработки судовой СПС нового поколения.

Целью работы является разработка компьютерной модели пожара в помещении УТ-НИИК «Огонёк» в условиях, приближенных к реальным корабельным пожарам, и проверка адекватности модели в условиях типовых очагов пожаров в испытательном

помещении. Модель создана с использованием программы моделирования динамики пожара FDS (FireDynamicsSimulator) и программы визуализации.

Разработанная модель может быть использована для решения следующих задач:

- исследование алгоритма обнаружения пожара, определение решающей функции и нормативных значений;
- проверка возможности распознавания типового источника возгорания (из нескольких возможных) СПС при использовании мультикритериального алгоритма обработки сигналов;
- сравнение полученных экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования типовых очагов пожаров.

Программное обеспечение. Программа моделирования динамики пожара FDS является моделью вычислительной гидроаэродинамики (CFD – computational fluid dynamics) пожара. Модель основана на численном решении уравнений Навье-Стокса, которое применяется при низкой скорости ($Ma < 0.3$) потоков с переноса дыма и тепла. FDS – это свободно распространяемое программное обеспечение.

Программное обеспечение [1, 2] позволяет моделировать распространение дыма, температуры, углекислого газа, окиси углерода и других опасных факторов. CFD моделирует сценарии вычислительной гидроаэродинамики, оптимизированные для низкоскоростных потоков, зависящих от температуры.

Для визуализации результатов моделирования использована программа PyroSim – графический интерфейс для FDS. Результаты моделирования могут быть продемонстрированы с помощью программы SmokeView [3].

Использование суперкомпьютерного центра «Политехник». Суперкомпьютер Политехнического университета позволяет выполнять до 1,2 петафлопс. Суперкомпьютер состоит из двух независимых вычислительных систем: кластерной «RSC Tornado» и массивно параллельной «RSC PetaStream».

Система «RSC Tornado» по своей пиковой производительности, составляющей 829 терафлопс, занимает третье место в списке самых мощных суперкомпьютеров по тесту LINPACK и оценивается по мировым рейтингам Top500 и Green500. «RSC Tornado» – это первый проект в России и СНГ на базе новых серверных процессоров Intel® Xeon® E5-2600 v3. Система «RSC Tornado» включает в себя 712 двухпроцессорных узлов, содержащих 1424 высокопроизводительных серверных процессора Intel® Xeon® E5-2697 v3 (14 ядер с частотой 2,6 ГГц каждый), серверные платы Intel® S2600KP и Intel® S2600WT для этого поколения процессоров, а также новейшие твердотельные накопители Intel® SSD DC S3500 для корпоративных центров обработки данных.

Система «RSC PetaStream», общая производительность которой составляет 258 терафлопс, по тесту LINPACK продемонстрировала производительность 170,5 терафлопс и занимает 8-е место в текущем выпуске списка Top50. Эта суперкомпьютерная система основана на 60-ядерных процессорах Intel® Xeon.

Наличие высокопроизводительных вычислительных средств позволило выполнить моделирование разных типов пожаров на судне [4].

Модель УТ-НИИК «Огонёк». Исходными данными для моделирования послужили характеристики материалов, приведенные в таблице 1, характеристики поверхностей, приведенные в таблице 2.

Стена и пол имеют поверхностные свойства стали с вентиляционным отверстием 4,6 м на полу. В стене создается отверстие, чтобы показать дверь высотой 1.095 м, а нижняя – 0.05 м, поднятая с поверхности. Небольшое вентиляционное отверстие мощностью 1000 кВт / м² расположено на кушетке, которая является источником огня и температуры.

Таблица 1

Характеристики материалов

Материал	Плотность (kg/m ³)	Удельная теплоёмкость (кДж/кгt°K)	Удельная проводимость (Вт/м t°K)	Коэффициент излучения	Коэффициент поглощения (1/м)
Petrol	740.0	2.05	0.1	0.9	5.0 10 ⁴
Steel	7850.0	0.46	45.8	0.95	5.0 10 ⁴

Таблица 2

Характеристики поверхностей

Поверхность	Толщина (м)	Состав	Скорость тепловыделения (кВт/м ²)
Сталь	0.05	1.0 Steel	
Бензин	0.015	1.0 Petrol	500

Помещение УТ-НИИК «Огонёк», в котором проводятся испытания, имеет размеры: длина 10 м, ширина 7 м, высота 4.2 м. Помещение разделено по высоте на нижнюю и верхнюю палубу. Высота нижней 2.4 м. В центральной части нижней палубы размещен поддон размером 4*4 м, опущенный ниже уровня настила нижней палубы на 500 мм, пайолы размещены на высоте 200 мм, по периметру поддона сооружено леерное ограждение. На уровне платформы по периметру помещения сооружены внутренние переходные мостики, имеющие леерные ограждения. В центре поддона над пайолами установлен металлический шкаф размером 95*300*250 см. В помещении имеются двери для выхода в ПДУ, в продольный коридор и на шкафут левого борта. Размер дверей 60*140 см. Помещение оборудовано двумя люками с вертикальными трапами, ведущими на верхнюю палубу. Сверху установлены люки (4 шт.). Размер 100*120 см.

Размещение сенсоров. В помещении расположены сенсоры на двух уровнях. Первый уровень находится на высоте 2.4 м и располагает 8 сенсоров, а второй уровень находится на высоте 4.2 м и имеет 4 сенсора. На рисунке 1 показано размещение сенсоров в помещении УТ-НИИК «Огонёк».

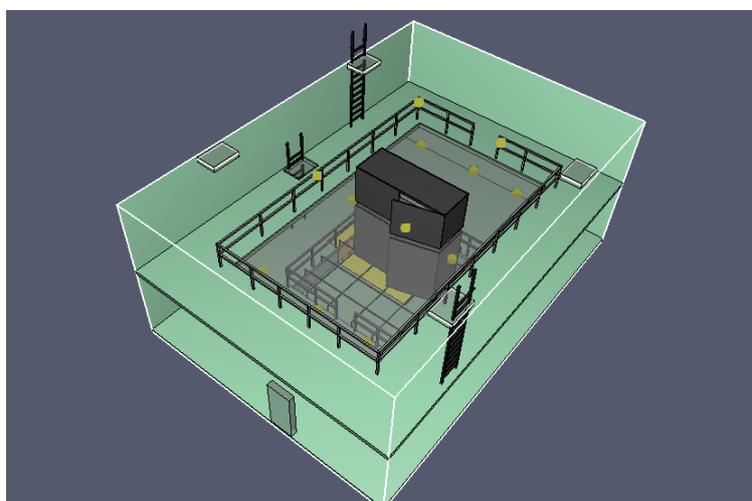


Рис. 1. Размещение сенсоров в помещении УТ-НИИК «Огонёк»

Критерий обнаружения пожара. Для повышения достоверности решений о возгорании критерий должен учитывать взаимную зависимость между результатами, полученными от сенсоров одного помещения, и результатами измерения влияющих факторов. Критерии, использующие «дельта-фактор», по сути, контролируют разность между предсказанным и текущим измеренным значением параметра, где в качестве предсказателем является предыдущее значение (предсказатель нулевого порядка) [5].

Для увеличения вычислительной мощности критерия предложено использовать предсказатель более высокого порядка p , в пространстве и времени. Пространственно-временная модель является фильтром с несколькими входами

$$\hat{x}_j(n+1) = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^p a_{ji}(k)x_i(n-k) + a_{j0} + \varepsilon_{n+1}, \quad (1)$$

где $\hat{x}_j(n+1)$ – предсказанное значение сигнала j -го сенсора в следующий $n+1$ -ый дискретный момент времени; $a_{ji}(k)$ – величина k -го коэффициента фильтра для i -го сенсора; $x_i(n-k)$ – выходной сигнал i -ого сенсора в момент времени $n-k$; a_{j0} – величина смещения; L – количество сенсоров.

В матрично-векторной форме уравнение имеет вид:

$$\hat{x}_j(n+1) = \sum_{i=1}^L \mathbf{a}_{i,j}^T \mathbf{x}_i(k) + \varepsilon_{n+1}, \quad (2)$$

где $\mathbf{a}_{i,j}^T \mathbf{x}_i(k)$ – скалярное произведение векторов $\mathbf{a}_{i,j}^T = [a_{ij}(1), a_{ij}(2), \dots, a_{ij}(p),]$ и $\mathbf{x}_i(k) = [x_i(n), x_i(n-1), \dots, x_i(n-p)]$.

Для обнаружения возгорания предложено использовать статистику для каждого сенсора, представляющую собой накопленную разность между предсказанным и наблюдаемым значением:

$$\begin{aligned} \delta_j(n+m+1) &= x_j(n+m+1) - \hat{x}_j(n+m+1), \\ \Xi_j(n+m+1) &= \sum_{m=0}^q \delta_j(n+m+1), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Xi_j(n+m+1)$ – статистика, накопленная к моменту времени $n+m+1$ на интервале m отсчетов для j -го сенсора.

Накопленная невязка между прогнозируемым по модели и измеренным значением для каждого сенсора после сравнения с допуском по формуле:

$$\text{if } \Xi_j(n+m+1) > \theta_j(n) \text{ then } \Omega_j(n+m+1) = \text{true} \quad (4)$$

Совместный анализ решений $\Omega_j(n+m+1) \forall j$, полученных по всем сенсорам, позволяет получить решение о положении источника возгорания в пространстве помещения. Решение $\Omega_{x,y}$ принимается относительно наличия возгорания на участке помещения с координатами (x, y) по формуле:

$$\Omega_{x,y} = \varphi_{x,y} \left(\sum_{j=1}^J w_j(n) \Xi_j(n) \right) \quad (5)$$

где $\Xi_j(n)$ – накопленные разности между измененным и предсказанным значением, $w_j(n)$ – веса для каждой накопленной разности ошибок предсказания измерений, $\varphi_{x,y}$ – нелинейная функция.

Результаты моделирования. На рисунке 2 отображены результаты моделирования, полученные сенсорами температуры (T1-6, T1-2) и угарного газа (CO 1-6, CO 1-2) при возгорании бензина в поддоне.

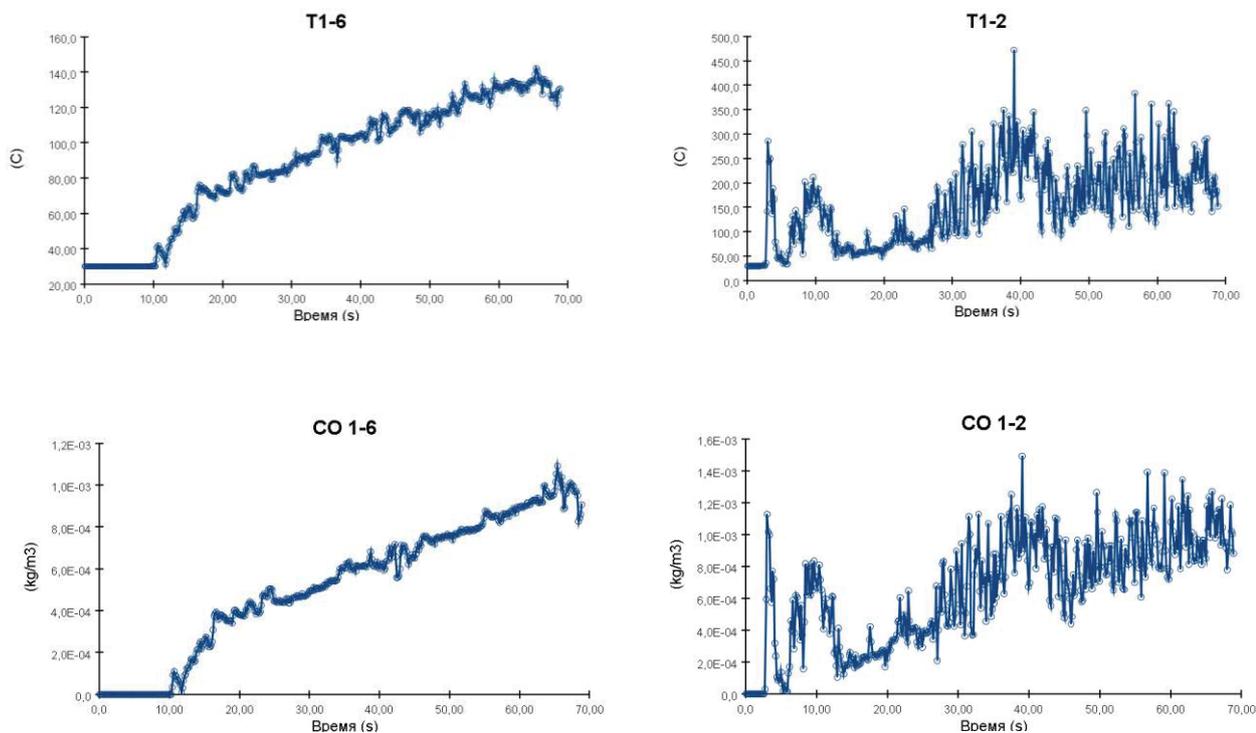


Рис. 2. Результаты моделирования

Преимущества предлагаемых критериев. Сенсоры нижнего уровня реагируют на изменение температуры значительно быстрее, что может быть использовано в качестве критерия временного изменения значения температуры из-за любого фактора не связанного с пожаром. Сопоставление данных сенсоров двух разных уровней может быть использовано для выявления ложных срабатываний. Этот метод может также применяться к данным всех сенсоров для использования в механизме инициирования аварийного реагирования на пожар. Кроме того, он может обнаруживать начало пожара в диапазоне сенсоров путем изучения самого высокого значения скорости изменения. Критерий может быть настроен так, чтобы не сигнализировать, пока скорость изменения температуры не будут постоянными.

Заключение. В статье обсуждалось, как обнаружить огонь, используя стандартное отклонение и скорость изменения, при использовании двух слоев температурных сенсоров. Сенсоры верхнего уровня показали высокое стандартное отклонение и скорость изменения температуры по сравнению с сенсорами нижнего слоя, из чего делаем вывод о том, что небольшое отклонение температуры не всегда означает пожар, если оно не подкрепляется данными другого сенсора уровня.

Программа PyroSim используется для моделирования по уравнению Навье-Стокса, тогда как для просмотра результатов моделирования использовалась программа визуализации SmokeView. Для моделирования использовался суперкомпьютерный центр «Политехнический».

Планы на дальнейшее исследование. Проведенное исследование представляет полезную информацию для моделирования пожара. Координаты сенсоров, огня и данных температуры могут быть использованы для обучения нейронной сети, на основе

которой планируется разработать систему поддержки принятия решения для отслеживания изменений температуры, дыма, углекислого и угарного газа и прогнозирования возможного возгорания.

Литература

1. FGU VNIPO of EMERCOM of Russia – Application field method of mathematical modeling of fires in the buildings: Guidelines, Moscow (2003).
2. **Jones W. W.** A Review of Compartment Fire Models. National Bureau of Standards, <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire83/PDF/f83001.pdf>.
3. **Quintieri J.** A Perspective on Compartment Fire Growth. National Bureau of Standards, (1984).
4. **Forney G. P., Moss W. F.** Analyzing and Exploiting Numerical Characteristics of Zone Fire Models, Fire Science and Technology, Vol. 14. 1/2 (1994), pp 49–60.
5. Алгоритмы раннего предупреждения о возгорании в помещениях судна Гусева А.И., Малыхина Г.Ф., Милицын А.В. Комплексная защита объектов информатизации - 2016 Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2016. С. 39–43.