УДК 614.84

А.Е. Любаков
(Омский государственный университет путей сообщения, e-mail: lubakov@mail.ru)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛА ПОЖАРА НА ОБЪЕКТАХ С ПОВЫШЕННОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТЬЮ

Предложен алгоритм описания температурного поля, основанный на использовании квазиполевой модели для слабоконвективного теплообмена, позволивший учесть граничные и начальные условия и получить численное решение уравнений модели возгорания.

Ключевые слова: пожар, локальное возгорание, модель, места хранения и утилизации военной техники и вооружения.

A.E. Lyubakov

MATHEMATICAL MODELLING BEGINNING OF FIRE AT OBJECTS HAVING A HIGH RISK OF A FIRE INCIDENT

An algorithm describing the temperature field based on quasi-field model for low-convective heat exchange that permitted to formulate boundary and initial conditions and to obtain numerical solution in ignition model equation.

Key words: fire, local ignition, model, storage location and disposal of military weapons and equipment.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 22 мая 2015 г.

Трагические события последних лет, произошедшие в России на объектах различного назначения [1], особенно в местах хранения и утилизации военной техники [2], наносят значительный ущерб, что заставляет серьёзно задуматься о необходимости решений [3] по предотвращению и своевременному выявлению очагов возгораний. Поэтому создание систем предупреждения возгораний на объектах [4] с повышенной пожарной опасностью, к которым относятся цеха химических и нефтеперерабатывающих организаций, складские помещения и другие сооружения, в которых обращаются и хранятся значительные количества горючих материалов, является особенно актуальной проблемой.

Поскольку места хранения и утилизации военной техники, особенно ракетного оружия и боеприпасов, имеют как открытые площадки с различными формами складирования, так и закрытые складские помещения, то перспективным направлением модернизации мест хранения ракет и боеприпасов является создание складов без единой площадки открытого хранения, которые необходимо оборудовать надёжными системами пожарной безопасности с применением нового периметрового видеонаблюдения с датчиками движения и локального изменения температуры при интеллектуальном управлении из единого центра.

Создание таких объектов с индивидуальной системой пожарной безопасности позволит не только укрыть практически все запасы ракет, боеприпасов и взрывчатых материалов, но и обеспечить безопасное функционирование системы их хранения в соответствии с установленными требованиями.

Наиболее перспективным инструментом проектирования и комплектования систем противопожарной защиты объектов является получивший широкое развитие как в нашей стране [6, 7], так и за рубежом метод математического моделирования, являющийся в настоящее время основой для создания систем автоматизации процесса проектирования. В работах [6-8] показано, что применяемые при математическом моделировании допущения, связанные с уровнем детализации процесса развития пожара, приводят к трём основным типам детерминированных моделей [6]: интегральным, зонным и полевым.

Наиболее полными и точными являются полевые модели [5], базирующиеся на фундаментальных законах тепломассопереноса. Однако, учитывая неопределенности процесса при корректной формулировке как граничных, так и начальных условий, при отсутствии эффективных численных процедур, полевые модели в настоящее время остаются весьма трудоёмкими.

В работе [9] предлагается более простая математическая структура так называемой квазиполевой модели, которая также базируются на законах переноса, при физически оправданных допущениях, касающихся гидротермической обстановки в зоне пожара.

Предлагается методика оценки теплопереноса в начальной стадии возгорания в замкнутом помещении складского типа с учётом перемешивания среды при отсутствии проточности наружного воздуха. Геометрическое описание помещения объекта представляется в виде параллелепипеда длинной h_1, шириной h_2 и высотой h_3, без вентиляционных трактов.

Теплообмен вертикальных поверхностей может быть представлен законом Ньютона-Рихмана [6] с коэффициентом теплоотдачи от внешней поверхности и определяется по известными эмпирическими зависимостям [8], в основу которых положен механизм свободной конвекции. Аналогично представляется механизм теплообмена у верхней горизонтальной поверхности. Нижняя горизонтальная поверхность считается теплоизолированной. Пренебрегая толщиной несущих конструкций и теплопотерями в них, допущено, что источник избыточного тепла, имитирующий очаг возгорания, расположен на нижней стенке параллелепипеда, тепловая мощность которого определяется нестационарной характеристикой вида

$$t^* = t_0^*[1 - \exp(-a\tau)], \qquad (1)$$

где t_0^* – предельная температура тепловыделения, характеризующая физические процессы особенностей горения конкретного материала;

a – кинетическая константа.

Тогда, пренебрегая конвективной составляющей теплообмена, можно принять $t^*(\tau) << t_0^*$ при описании начальной стадии возгорания

На основании принятых допущений при формировании физической модели, математическая модель строится на основе закона Фурье [12] переноса теплоты с модификацией коэффициента теплопроводности:

$$\lambda = \varepsilon\lambda_0\,, \tag{2}$$

где λ_0 – теплопроводность воздуха – продукты горения;

ε – коэффициент конвекции, учитывающий движение макромасс газообразной среды в помещении.

Такая модификация необходима для того, чтобы при небольших локальных градиентах температур учесть течение воздушных масс. При этом следует иметь в виду, что $\varepsilon > 1$.

Выберем декартову систему координат *OXYZ*, расположив её начало в одной из вершин нижней грани параллелепипеда, причём

$$0 \le x \le h_1;\ 0 \le y \le h_2;\ 0 \le z \le h_3.$$

Кроме того, пусть источник возгорания имеет координаты (a, b, 0). Тогда уравнение модели в 3D-формулировке примет вид:

$$\rho C_P \frac{\partial t(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} = \lambda\left[\frac{\partial^2 t(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t(x,y,z,\tau)}{\partial z^2}\right], \tag{3}$$

где ρ, C_p – плотность и теплоёмкость окружающего воздуха, то есть продуктов горения;

$t(x, y, z, \tau)$ – температура локальной области внутри помещения;

τ – текущее время.

Начальное значение температуры локальной области внутри помещения принимается равным температуре окружающей среды

$$t(x,y,z,\tau) = t_c. \tag{4}$$

На вертикальных поверхностях помещения задаются граничные условия третьего рода:

$$-\lambda \frac{\partial t(h_1,y,z,t)}{\partial x} = \alpha_\delta\left[t(h_1,y,z,t) - t_c\right]; \tag{5}$$

$$\lambda \frac{\partial t(0,y,z,t)}{\partial x} = \alpha_\delta\left[t(0,y,z,t) - t_c\right]; \tag{6}$$

$$-\lambda \frac{\partial t(x,h_2,z,t)}{\partial y} = \alpha_\delta\left[t(x,h_2,z,t) - t_c\right]; \tag{7}$$

$$\lambda \frac{\partial t(x,0,z,t)}{\partial y} = \alpha_\delta\left[t(x,0,z,t) - t_c\right]; \tag{8}$$

$$-\lambda\frac{\partial t(x,y,h_3,t)}{\partial z}=\alpha_n\left[t(x,y,h_3,t)-t_c\right];\qquad(9)$$

$$\frac{\partial t(x,y,0,t)}{\partial z}=0,x,y\notin D;\qquad(10)$$

$$t(x,y,z,\tau)=t^*(\tau),x,y\in D,\qquad(11)$$

где a_δ, a_n – коэффициенты теплоотдачи вертикальных и верхней горизонтальной поверхности в окружающую среду;

D – прямоугольник с центром (a, b):

$$D=\{a_1\le x\le a_2; b_1\le y\le b_2\}.$$

В безразмерном виде уравнения модели (3)-(11) таковы:

$$\frac{\partial T(X,Y,Z,\theta)}{\partial\theta}=\frac{\partial^2 T(X,Y,Z,\theta)}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 T(X,Y,Z,\theta)}{\partial Y^2}+\frac{\partial^2 T(X,Y,Z,\theta)}{\partial Z^2};\qquad(12)$$

$$T(X,Y,Z,0)=0;\qquad(13)$$

$$\frac{\partial T(H_1,Y,Z,\theta)}{\partial X}=-Nu_\delta T(H_1,Y,Z,\theta);\qquad(14)$$

$$\frac{\partial T(0,Y,Z,\theta)}{\partial X}=Nu_\delta T(0,Y,Z,\theta);\qquad(15)$$

$$\frac{\partial T(X,H_2,Z,\theta)}{\partial Y}=-Nu_\delta T(X,H_2,Z,\theta);\qquad(16)$$

$$\frac{\partial T(X,0,Z,\theta)}{\partial Y}=Nu_\delta T(X,0,Z,\theta);\qquad(17)$$

$$\frac{\partial T(X,0,Z,\theta)}{\partial Y}=Nu_\delta T(X,0,Z,\theta);\qquad(18)$$

$$\frac{\partial T(X,Y,0,\theta)}{\partial Z}=0,X,Y\notin\overline{D};\qquad(19)$$

$$T(X,Y,Z,\theta)=T^*(\theta),X,Y\in\overline{D},\qquad(20)$$

где $\theta=\tau a_{эф}/h$;

$X=x/h;\quad Y=y/h;\quad Z=z/h;$

$h=\sqrt[3]{h_1h_2h_3}$;

$a_{эф}=\lambda/(\rho C_p)$;

$Nu_\delta=a_\delta h/\lambda$;

Nu_n – числа Нуссельта:

$$Nu_n=\frac{a_n}{\lambda};$$

$$T(X,Y,Z,\theta)=t(x,y,z,\tau)-t_c;$$
$$T^*(\theta)=t^*(\tau)-t_c;$$
$$H_{1,2,3}=\frac{h_{1,2,3}}{h};$$
$$D=\{A_1\le X\le A_2;\,B_1\le Y\le B_2\};$$
$$A_{1,2}=a_{1,2}/h;\quad B_{1,2}=b_{1,2}/h.$$

Несмотря на линейный характер уравнения (12) и большинства краевых условий (13) – (18), особенностью её является разрыв первого рода по границе D, что делает маловероятным получение нестационарного поля температур классическими аналитическими методами.

Численное интегрирование модели (12)-(20) проводилось методом сеток по маршевой схеме относительно θ по шаблону "объёмный крест" с аппроксимацией второго порядка по геометрическим координатам и первого по безразмерному времени [8].

Дискретным аналогом системы $T(X,Y,Z,\theta)$ принимается $T^m_{i,j,k}T(X,Y,Z,\theta)$ на сетке $\Omega=\{X_i=i\Delta X,Y_j=j\Delta Z,\theta_m=m\Delta\theta\}$, где $i=\overline{0,I}$; $j=\overline{0,J}$; $k=\overline{0,K}$; $m=\overline{0,M}$, соотношение шагов сетки $\Delta X=\dfrac{H_1}{I}$; $\Delta Z=\dfrac{H_2}{J}$; $\Delta Z=\dfrac{H_3}{K}$ и $\Delta\theta$ выбирается по условию Куранта [9].

В зависимости от расположения соответствие с принимаемыми граничными условиями [10], получаем для уравнений аппроксимацию конечными разностями по трём точкам:

$$T^{m+1}_{i,j,k}=T^m_{i,j,k}+\left[\frac{T^m_{i+1,j,k}-2T^m_{i,j,k}+T^m_{i-1,j,k}}{\Delta X^2}+\frac{T^m_{i,j+1,k}-2T^m_{i,j,k}+T^m_{i,j-1,k}}{\Delta Y^2}+\right.$$
$$\left.+\frac{T^m_{i,j,k+1}-2T^m_{i,j,k}+T^m_{i,j,k-1}}{\Delta Z^2}\right]\Delta\theta; \tag{21}$$

$$T^0_{i,j,k}=0; \tag{22}$$

$$T^m_{I,j,k}=\frac{T^m_{I-2,j,k}-4T^m_{I-1,j,k}}{3+Nu_\delta\Delta X^2};\quad T^m_{0,j,k}=\frac{4T^m_{1,j,k}-T^m_{2,j,k}}{3+Nu_\delta\Delta X^2};\quad T^m_{i,J,k}=\frac{T^m_{i,J-2,k}-4T^m_{i,J-1,k}}{3+Nu_\delta\Delta Y^2}; \tag{23}$$

$$T^m_{i,0,k}=\frac{4T^m_{i,1,k}-T^m_{i,2,k}}{3+Nu_\delta\Delta Y^2}; \tag{24}$$

$$T^m_{i,j,0}=\frac{1}{3}(4T^m_{i,j,1}-T^m_{i,j,2})\notin\overline{D}; \tag{25}$$

$$T^m_{i,j,k}=T^{*m}\in\overline{D}. \tag{26}$$

Предварительные расчёты для конкретных объектов показали устойчивость и сходимость предложенной модели (21)-(26).

Окончательная оценка соответствия математической модели реальной картине начальной стадии пожара возможна при оценке коэффициента теплопроводности λ, который необходимо определить по эмпирическим зависимостям (3)-(11) температурного поля, что и является описанием локального возгорания.

Предлагаемый подход позволяет при минимальной информации получить возможность идентификации динамики пожара на начальной стадии при произвольной локализации возгорания по объёму помещения.

Литература

1. ***Пожарная*** статистика // Проектирование противопожарных систем. http://pozhproekt.ru/pozharnaya-statistika.
2. ***Взрывы*** и пожары на складах боеприпасов в России в 2002-2012 гг. // РИА Новости. http://ria.ru/spravka/20120611/671014188.html#ixzz2rQbrZOL3.
3. ***Ахтулов А.Л., Ахтулова Л.Н., Любаков А.Е., Иванова Л.А.*** Особенности построения при автоматизации проектирования систем пожаротушения на распределённых объектах // Омский научный вестник. Омск: изд-во ОмГТУ, 2013. № 3 (119). С. 58-62.
4. ***Ахтулов А.Л., Ахтулова Л.Н., Леонова А.В.*** Методика оценки качества процессов проектирования сложных технических устройств // Омский научный вестник. Омск: изд-во ОмГТУ, 2013. № 3 (123). С. 87-92.
5. ***Кошмаров Ю.А., Рубцов В.В.*** Процессы нарастания опасных факторов пожара в производственных помещениях и расчёт критической продолжительности пожара. М.: МИПБ МВД России, 1999. 90 с.
6. ***Пузач С.В.*** Математическое моделирование газодинамики и теплообмена при решении задач пожаровзрывоопасности. М.: Академия ГПС МЧС России, 2002. 150 с.
7. ***Снегирев А.Ю., Танклевский Я.Т.*** Численное моделирование турбулентной конвекции газа в помещении при наличии очага загорания // Теплофизика высших температур. 1998. № 6. С. 973-983.
8. ***Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П.*** Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. М: ВИПТШ МВД СССР, 1987. 444 с.
9. ***Ряжских В.И., Сумин В.А., Богер А.А., Слюсарев М.И.*** Стационарное температурное поле в квадратной области при комбинированных граничных условиях первого рода // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. 2011. Т. 7. № 1. С. 100-102.
10. ***Костыков С.В., Ряжских В.И.*** Алгоритм оценки продолжительности начальной стадии локального возгорания по температурному полю в невентилируемых крупногабаритных складских помещениях // Вестник ВИ ГПС МЧС России. 2014. № 1 (10). С. 11-14.