УДК 621.3

ФОРМА ФАКЕЛА КАК СЛУЧАЙНЫЙ ПРОЦЕСС

Абрамов Ю.А., Басманов А.Е.

Академия гражданской защиты Украины

Постановка проблемы. Резервуарные парки являются основным местом хранения нефти и нефтепродуктов. Скопление большого количество горючих и легковоспламеняющихся жидкостей на небольшой площади приводит к высокой пожарной опасности. Ликвидация пожара в резервуарном парке осложняется угрозой каскадного распространения пожара, связанной с нагревом соседних резервуаров от пламени горящего резервуара. Поэтому, с практической точки зрения, важной является оценка времени, через которое соседние резервуары могут достичь взрывоопасной температуры.

Анализ публикаций. Эксперименты с горением нефтепродуктов в горелках и уменьшенных моделях резервуаров [4] показывают, что форма и размеры пламени существенно меняются при изменении диаметра горелки и резервуара. При горении жидкостей в горелках диаметром до 10 мм пламя имеет резко очерченную коническую форму, которая не меняется с течением времени. С увеличением диаметра возникают продольные пульсации, высота периодически меняется. Увеличение диаметра до 30 см приводит к переходу от ламинарного режима горения к турбулентному. Факел меняется во времени и имеет форму, трудно поддающуюся описанию.

На практике приближенно полагают форму пламени конической [2, 3], являющуюся «средней» формой пламени, и не учитывают ее случайные изменения.

Постановка задачи и ее решение. Рассматривая пульсации пламени как случайный процесс, построим методы нахождения оценок основных параметров этого случайного процесса.

Согласно закона Стефана-Больцмана тепловой поток $\frac{dQ_{12}}{dt}$ от факела с температурой T_1 к резервуару с температурой стенки T_2 равен:

$$\frac{dQ_{12}}{dt} = c_0 \varepsilon_{12} \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) H_{12},$$

где $c_0 = 5{,}67 \frac{Вт}{м^2 К^4}$; ε_{12} – приведенный коэффициент черноты факела и стенки; H_{12} – площадь взаимного облучения между стенкой и факелом:

$$H_{12} = \frac{1}{\pi} \int\limits_{S_1} \int\limits_{S_2} \frac{(\vec{r}, \vec{n}_1)(\vec{r}, \vec{n}_2)}{r^4} dS_1 dS_2, \tag{1}$$

где интегралы берутся по поверхностям областей S_1 и S_2; $\vec{n}_1$ и $\vec{n}_2$ – нормальные единичные вектора к поверхностям; $\vec{r}$ – расстояние между двумя точками поверхностей; $(\vec{r}, \vec{n}_k)$ – скалярное произведение.

Пульсации пламени приводят к постоянному изменению площади взаимного облучения H_{12} между факелом и поверхностью резервуара. Таким образом, эта площадь является случайной функцией времени $\eta(t)$. Естественно полагать, что среднее значение площади облучения должно совпадать с детерминированным случаем: $M\eta(t) = H_{12}$. Если пренебречь начальной стадией возникновения пламени, то процесс $\eta(t)$ можно считать стационарным.

Непосредственное наблюдение за изменением площади взаимного облучения практически невозможно ввиду необходимости точного описания поверхности факела для вычисления интеграла (1). Единственным легко наблюдаемым параметром факела является площадь его поперечного сечения $\xi(t)$, также являющаяся стационарной случайной функцией с математическим ожиданием $M\xi(t) = S$.

Некоторые виды пульсаций, например, изменение высоты пламени, приводят к одновременному уменьшению или увеличению взаимной площади облучения и площади поперечного сечения. Колебания пламени в стороны под действием ветра также приводят к изменению указанных площадей. Поэтому случайные функции $\eta(t)$ и $\xi(t)$, хотя и не изменяются синхронно, тем не менее, хорошо коррелируют между собой. С целью упрощения будем полагать, что они линейно зависимы:

$$\eta(t) = \frac{H_{12}}{S} \xi(t),$$

При сделанных предположениях достаточно оценить основные параметры случайного процесса $\xi(t)$, описывающего изменение площади поперечного сечения факела.

Важной характеристикой стационарного случайного процесса является корреляционная функция, характеризующая силу корреляционной связи между моментами времени, отстоящих друг на друга на τ:

$$K_{\xi}(t) = M[\xi(t_0) - a][\xi(t_0 + \tau) - a], \; a = M\xi(t).$$

В [1] показано, что факторы, имеющие малое время корреляции оказывают незначительное влияние на процессы в нагревающемся резервуаре. Факторы с большим временем корреляции, напротив, могут оказывать существенное влияние. Корреляционная функция может быть легко оценена экспериментальным путем по непрерывной или дискретной реализации $x(t)$ случайного процесса $\xi(t)$ на отрезке времени $[0, T]$

В качестве экспериментальных данных может быть использована видеозапись процесса горения. В то время как форму пламени трудно описать аналитически, площадь поперечного сечения измерить довольно легко. Для этого достаточно подсчитать количество точек на каждом кадре, лежащих в пределах пламени. После этого, зная линейные размеры объекта, попавшего в кадр (резервуара, бассейна и т.д.), можно перейти от точек к единицам площади.

Остановимся более подробно на методике подсчета количества точек, соответствующих пламени. Такие подсчеты требуется проводить для каждого кадра – около 25 раз для одной секунды видеозаписи. Поэтому возникает необходимость в автоматизации такой процедуры. Идентифицировать точки по их принадлежности к пламени можно исходя из их цвета. Цвет каждой точки может быть представлен вектором $c = (r, g, b)$, каждая компонента которого является целым числом от 0 до 255 и соответствует интенсивности красного (r), зеленого (g) и голубого (b) цветов, их которых составляется цвет данной точки (формат RGB). Так (255, 0, 0) соответствует красному цвету, (0, 255, 0) – зеленому, (0, 0, 255) – голубому, (0, 0, 0) – черному, (255, 255, 255) – белому.

Поскольку цвет пламени близок к красному, то можно утверждать, что, если $c_1 = (r_1, g_1, b_1)$ имеет цвет пламени и $r_2 \ge r_1$, $g_2 \le g_1$, $b_2 \le b_1$, то $c_2 = (r_2, g_2, b_2)$ также имеет цвет пламени. На множестве Ω векторов (r, g, b) введем отношение порядка "$\prec$". Будем обозначать, что $(r_1, g_1, b_1) \prec (r_2, g_2, b_2)$, если $r_1 \le r_2$, $g_1 \ge g_2$, $b_1 \ge b_2$. Легко видеть, что такое отношение является транзитивным.

Задача сводится к тому, чтобы разделить множество Ω на два непересекающиеся подмножества Ω_r и Ω_{gb} такие, что если цвет $c = (r, g, b)$ некоторой точки A принадлежит множеству Ω_r, то мы считаем, что точка A принадлежит пламени. Если же $c \in \Omega_{bg}$, то точка A не относится к пламени.

Тогда алгоритм подсчета количества точек, относящихся к пламени, может быть представлен следующим образом.

1. Задаемся множествами Ω_r и Ω_{gb}. Если априорная информация об этих множествах отсутствует, то полагаем $\Omega_r = \Omega_{gb} = \varnothing$.
2. Пусть рассматриваемая точка A_k имеет цвет c_k.
3. Если существует такое $c^r \in \Omega_r$, что $c^r \prec c_k$, то точка A_k принадлежит пламени.
4. Если существует такое $c^{bg} \in \Omega_{bg}$, что $c_k \prec c^{bg}$, то точка A_k не принадлежит пламени.
5. Если не выполнены пункты 3-4, то эксперт (человек) определяет к какому множеству отнести данный цвет.
6. Рассматриваем следующую точку A_{k+1} и переходим к пункту 2.

На первых порах такой алгоритм будет запрашивать нас об отнесении цвета к тому или иному множеству, но с пополнением исходными данными он уже будет работать без нашего участия. Указанный алгоритм будет работать, если на рисунке не будет других объектов, похожих по цвету на пламя. Если же такие есть, то необходимо вырезать их из рисунка, а затем применять алгоритм.

Выводы. В предположении о случайности пульсаций пламени горящего резервуара разработана методика оценки основных параметров случайного процесса, описывающего площадь взаимного облучения между факелом горящего резервуара и стенкой соседнего резервуара. Учет случайных пульсаций позволяет точнее оценить время достижения стенкой соседнего резервуара взрывоопасной температуры.

Перспективы дальнейших исследований связаны с оценкой случайных пульсаций температуры пламени и их влияния на тепловые процессы в нагревающемся резервуаре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басманов А.Е., Говаленков С.В., Горбенко М.О. Влияние случайных факторов на воспламенение соседних резервуаров при пожаре в резервуарном парке. – Харьков: Фолио, 2003. – Вып. 15. – С. 59-64.

2. Сознік О.П., Говаленков С.В., Андрієнко В.М. Геометричне моделювання випромінювання полум'я при пожежі нафти в резервуарі. – Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. – Вип. 4, т. 27. – Мелітополь: ТДАТА, 2004. – С. 20-25.

3. Андриенко В.Н., Говаленков С.В., Созник А.П. Математическая модель теплового излучения от факелов, имеющих форму конуса. – Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: Фолио, 2003. – Вып. 14. – С.24-28.