УДК 621.3

ВЛИЯНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ФАКТОРОВ НА ВОСПЛАМЕНЕНИЕ СОСЕДНИХ РЕЗЕРВУАРОВ ПРИ ПОЖАРЕ В РЕЗЕРВУАРНОМ ПАРКЕ

Н.А. Горбенко, С.В. Говаленков, А.Е. Басманов

Рассчитана вероятность достижения температурой нефтепродукта критического значения при наличии случайных факторов. Показано, что решающее значение оказывает скорость их изменения. Медленно изменяющиеся случайные факторы существенно сказываются на нагреве нефтепродукта. Напротив, быстро изменяющимися величинами можно пренебречь.

Постановка проблемы. При пожарах в резервуарных парках особую опасность представляет воспламенение или взрыв резервуаров, соседних с горящим. Такая угроза возникает не только при непосредственном контакте с пламенем, но и вследствие теплопередачи излучением. Как показывает практика, даже при охлаждении резервуара наблюдались случаи воспламенения, вскипания, выброса нефтепродукта. В связи с вышесказанным актуальной является задача оценки вероятности возникновения такой ситуации.

Анализ публикаций. Тепловой поток от факела к другим телам определяется законом Стефана-Больцмана:

$$F = \varepsilon c_0 \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) \psi , \qquad (1)$$

где F – тепловой поток, $Вт$;

ε – приведенный показатель черноты;

$c_0 = 5{,}67 \dfrac{Вт}{м^2 К^4}$;

T_1 – средняя температура факела;

T_2 – температура обращенной к факелу стороны резервуара;

ψ – интегральный коэффициент излучения, $м^2$.

В работе [1] было рассмотрено излучение от факелов различных геометрических форм, как объемных (цилиндр, конус, эллипсоид), так и плоских (прямоугольник). Однако, ввиду нестационарности процессов горения факел не имеет постоянной геометрической формы. Температура факела меняется в пространстве и времени. Случайные порывы ветра также вносят дополнительные искажения.

Целью статьи является построение математической модели, позволяющей учесть влияние случайных факторов на температуру соседнего резервуара и оценить вероятность его воспламенения.

Будем рассматривать тепловой поток $\Phi(t)$ как сумму двух компонент: детерминированной (1) и случайной $\xi(t)$:

$$\Phi(t) = F + \xi(t), \qquad (2)$$

предполагая при этом, что случайный процесс $\xi(t)$ является стационарным, имеет нулевое математическое ожидание и корреляционную функцию $K_\xi(t) = M[\xi(t_0)\xi(t_0 + t)]$.

Количество тепла dQ, полученное соседним резервуаром за малый промежуток времени dt, определяется соотношением

$$dQ = \Phi(t)dt = Fdt + \xi(t)dt .$$

Это приведет к увеличению температуры нагрева резервуара на величину $dT = \dfrac{dQ}{mc}$,

где m – масса находящегося в резервуаре нефтепродукта;
c – средняя удельная теплоемкость нефтепродукта, $\dfrac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Тогда

$$dT = \frac{F}{mc}dt + \frac{\xi(t)}{mc}dt,$$

$$T(t) = T_0 + \frac{1}{mc}\int_0^t Fdt + \frac{1}{mc}\int_0^t \xi(t)dt,$$

где T_0 – температура резервуара в начальный момент времени.

Таким образом, температура резервуара может быть представлена суммой детерминированной компоненты

$$\tilde{T}(t) = T_0 + \frac{1}{mc}\int_0^t Fdt$$

и случайной

$$\eta(t) = \frac{1}{mc}\int_0^t \xi(t)dt .$$

Выясним параметры распределения случайного процесса $\eta(t)$:

$$M\eta(t) = M\left[\frac{1}{mc}\int_0^t \xi(t)dt\right] = \frac{1}{mc}\int_0^t M\xi(t)dt = 0 .$$

Согласно [2], корреляционная функция имеет вид

$$K_\eta(t_1, t_2) = \frac{1}{(mc)^2}\left\{\int_0^{t_2}(t_2 - \tau)K_\xi(\tau)d\tau + \int_0^{t_1}(t_1 - \tau)K_\xi(-\tau)d\tau - \right.$$
$$\left. - \int_0^{t_2 - t_1}(t_2 - t_1 - \tau)K_\xi(\tau)d\tau\right\}.$$

В частности, дисперсия будет равна

$$D_\eta(t) = \frac{2}{(mc)^2}\int_0^t (t - \tau)K_\xi(\tau)d\tau . \quad (3)$$

Рассматривая температуру резервуара $T(t)$, как случайный процесс, можно оценить вероятность выхода ее за некоторый критический уровень $T_{кр}$, например, температуру воспламенения. Очевидно, что математическое ожидание случайного процесса $T(t)$ равно $\widetilde{T}(t)$, а дисперсия совпадает с дисперсией $\eta(t)$.

Если случайный процесс $\xi(t)$ распределен нормально, то и температура $T(t)$ также будет распределена нормально.

Предположим, что случайный процесс $\xi(t)$ является нормальным белым шумом с корреляционной функцией $K_\xi(t) = 2\pi C_\xi \delta(t)$, где $\delta(t)$ – дельта-функция, C_ξ – интенсивность белого шума. В этом случае дисперсия температуры зависит линейно от времени:

$$D_\eta(t) = \frac{2\sigma^2}{(mc)^2}\int_0^t (t - \tau)\delta(\tau)d\tau = \frac{2\pi C_\xi}{(mc)^2} t .$$

При температурах резервуара $T(t)$, заметно более низких, чем температура факела T_1, зависимость детерминированной компоненты температуры $\widetilde{T}(t)$ от времени близка к линейной:

$$\tilde{T}(t) \approx T_0 + \frac{F}{mc}t.$$

Проиллюстрируем приведенные рассуждения следующей ситуацией: пусть горит резервуар РВС-10000 (диаметр 34,2 м, высота 11,9 м). Будем считать, что факел имеет форму цилиндра с высотой 58 м и средней температурой $T_1 = 1500\,К$. На расстоянии 40 меторов находится другой резервуар РВС-10000, содержащий 6000 т нефтепродукта с удельной теплоемкостью $c = 2\frac{кДж}{кг \cdot К}$. В начальный момент времени его температура равнялась температуре окружающей среды $T_0 = 300К$.

Тогда интегральный коэффициент излучения составит $\psi \approx 47$. Принимая приведенный показатель черноты $\varepsilon = 0{,}8$, найдем тепловой поток, приходящийся на соседний резервуар: $F \approx 10755\,кВт$.

Очевидно, что нефтепродукт будет прогреваться не по всему объему, а, в первую очередь, вблизи обращенных в сторону факела стенок. Будем полагать, что прогревается слой порядка 0,5 м. Следовательно, нагреваться будет 188 т нефтепродукта.

В отсутствии случайных искажений $\xi(t)$, температура соседнего резервуара возрастала бы со скоростью $\frac{d\tilde{T}}{dt} = 0{,}029\frac{К}{с} = 103\frac{К}{час}$. И достигла бы критического уровня $T_{кр} = 800К$ примерно через 5 часов.

Зависимость математического ожидания и температуры для белого шума с интенсивностью $C_\xi = 10^8\,\frac{Дж^2}{с^2}$ приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость математического ожидания и среднеквадратического отклонения температуры от времени

Момент времени, t, мин.	Математическое ожидание температуры $\tilde{T}(t)$, К	Среднеквадратическое отклонение температуры, $\sqrt{D_\eta(t)}$, К
0	300	0
30	351	2,8
60	403	4,0
90	454	4,9
120	506	5,7
150	557	6,3
180	609	6,9
210	660	7,5
240	712	8,0
270	763	8,5
300	815	9,0

Из приведенной таблицы видно, что даже белый шум с большой интенсивностью не оказывает заметного влияния на процесс нагрева нефтепродукта. Это объясняется нулевым средним и некоррелированностью процесса $\xi(t)$.

Иная ситуация возникает, когда случайный процесс коррелированный. Пусть корреляционная функция имеет вид:

$$K_\xi(t) = \sigma^2 e^{-\alpha|t|}\cos\beta t\,.$$

Тогда после интегрирования (3) получим

$$D_\eta(t) = \frac{2\sigma^2}{(mc)^2}\frac{\alpha\left(\alpha^2+\beta^2\right)t - \alpha^2 + \beta^2 + e^{-\alpha t}\left(\left(\alpha^2-\beta^2\right)\cos\beta t - 2\alpha\beta\sin\beta t\right)}{\left(\alpha^2+\beta^2\right)^2}.$$

Анализ полученного выражения показывает, что первое слагаемое в числителе линейно зависит от времени, а второе экспоненциально затухает со временем (с колебаниями, если $\beta \neq 0$). Поэтому, если α и β близки к нулю, то дисперсия $D_\eta(t)$ может быть существенной. Например, пусть $\alpha = \frac{1}{2400}$ (соответствует времени корреляции 45 мин) и $\beta = 0$, а среднеквадратическое отклонение $\sigma = F/3$ (рис. 1). Таким образом, в 10 % случаев критический уровень будет достигнут быстрее на 1 час по сравнению с детерминированными расчетами.

С ростом α среднеквадратическое отклонение температуры быстро уменьшается (рис. 2). И при больших значениях α (уже при $\alpha \geq 0.01$) мы приходим к ситуации, когда влиянием случайных факторов можно пренебречь.

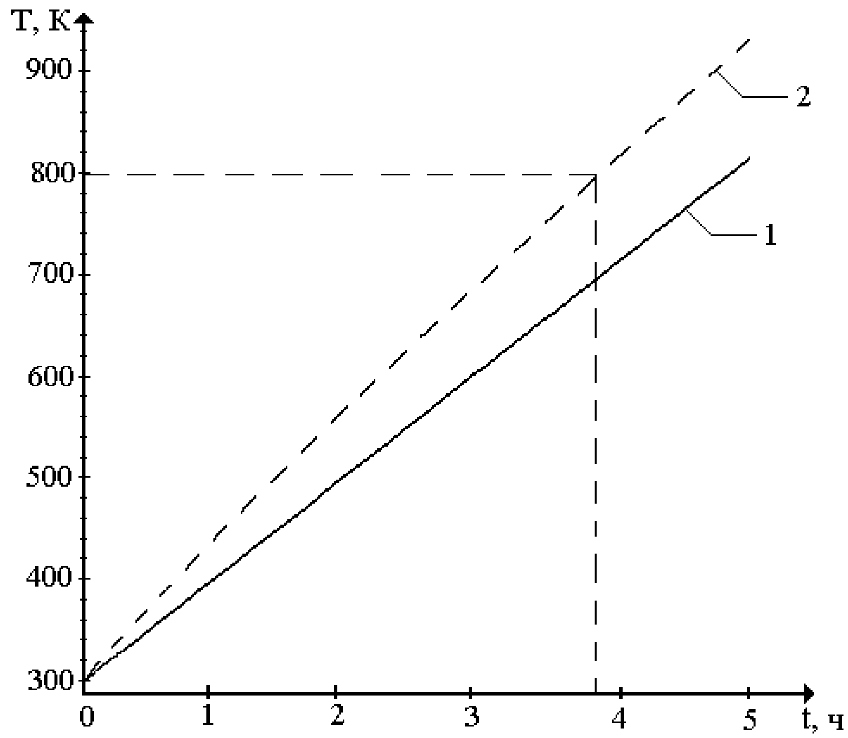

Рис. 1 – Зависимость температуры нефтепродукта от времени: 1 – математическое ожидание; 2 – уровень, достигаемый с вероятностью 0,1.

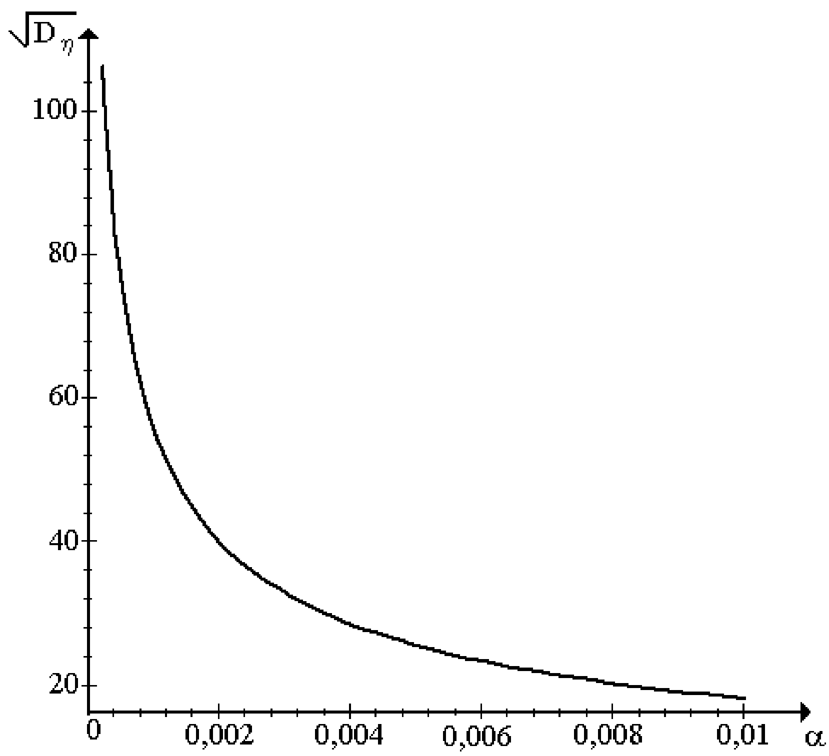

Рис. 2 – Зависимость среднеквадратического отклонения температуры нефтепродукта через 5 часов от параметра α .

Выводы. Таким образом, при изучении влияния горящего резервуара на соседние, необходимо уделять внимание тем случайным компонентам, которые имеют достаточно большие времена корреляции (т.е. медленно изменяются со временем). Такими являются, например, высота факела, его форма, наклон и др. Напротив, быстроизменяющиеся факторы (случайные порывы ветра, колебания языков пламени) не оказывают заметного влияния и при расчетах ими можно пренебречь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андриенко В.Н., Говаленков С.В., Созник А.П. Математическая модель теплового излучения от факелов, имеющих форму конуса. Проблемы пожарной безопасности. – Х.: Фолио, 2003. – Вып.14. – с.24-28.
2. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: 1968. – 463 с.