

УДК 621.3

*Абрамов Ю.А., д-р техн. наук, проф., проректор,
Басманов А.Е., канд. техн. наук, докторант
(Академия гражданской защиты Украины)*

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СУХОЙ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА ПРИ ПОЖАРЕ

Построена математическая модель нагрева резервуара с нефтепродуктом от факела горящего резервуара, учитывающая случайные пульсации размеров и температуры пламени. Модель позволяет оценить математическое ожидание и дисперсию температуры резервуара.

Постановка проблемы. Пожары в резервуарных парках нефти и нефтепродуктов характеризуются значительным материальным ущербом и сложностями при их тушении. Нагрев соседних резервуаров может привести к взрыву и дальнейшему распространению пожара. По своей сути пожар – это случайный процесс и пути его развития определяются вероятностными законами. В то же время существующие модели ограничиваются рассмотрением усредненных характеристик. Поэтому представляет интерес построение моделей, учитывающих вероятностное поведение процесса.

Анализ существующих решений. Основным случайным фактором является само пламя. Ввиду турбулентного характера горения оно подвержено случайным пульсациям, как размеров, так и температуры. На практике приближенно полагают форму пламени конической [2], являющуюся «средней» формой пламени, игнорируя ее случайные изменения. В [3] было проанализировано влияние случайных факторов на нагрев соседнего резервуара при условии, что температура линейно зависит от времени. Однако такое допущение справедливо только в первые минуты после начала пожара. Вскоре после этого зависимость приобретает нелинейный характер [1].

Постановка задачи и ее решение. Определим закон и параметры распределения температуры сухой стенки резервуара, предполагая, что пульсации размеров и температуры пламени распределены нормально.

Пусть на некотором расстоянии от горящего резервуара находится другой резервуар, заполненный нефтепродуктом до уровня h_1 (рис. 1). Под действием теплового излучения нагреваются крыша и стенка резервуара, обращенная в сторону факела. При этом наибольшую опасность представляет нагрев верхней части стены, не соприкасающейся с нефтепродуктом. Она нагревается до более высокой температуры, чем крыша, и ее нагрев до температуры самовоспламенения нефтепродукта может привести к взрыву паровоздушной смеси внутри резервуара.

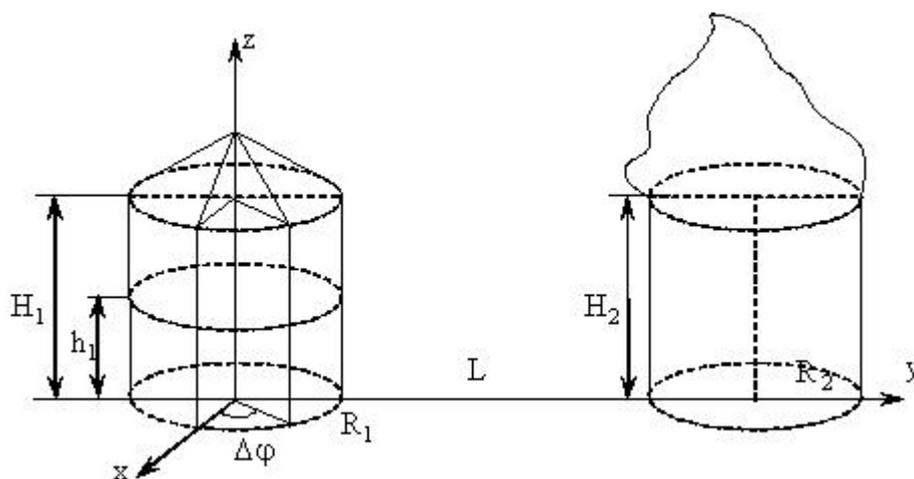


Рис. 1. Горящий резервуар и нагревающийся от него резервуар с нефтепродуктом

В [1] построена модель, в которой нагревающийся резервуар разбивался вертикальными секущими плоскостями, проходящими через ось OZ и образующими с осью OX углы $0, \Delta\phi, 2\Delta\phi$ и т.д. (рис. 1). В этом случае боковая поверхность резервуара оказывается разбитой на n одинаковых полос, крыша и поверхностный слой нефтепродукта – на n одинаковых сегментов. Таким образом, нагревающиеся поверхности резервуара разбиваются на $3n$ областей. В пределах каждой области будем считать температуру постоянной. Каждая из областей участвует в конвективном теплообмене с газовой средой внутри резервуара и с окружающим воздухом, а также в теплообмене излучением друг с другом, с факелом и окружающей средой. Тогда количество тепла, получаемое областью k за малый промежуток времени dt , может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned}
 dQ_k = \varepsilon_k c_0 \left[\varepsilon_\phi H_k^+ \left(\left(\frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \sum_{i \neq k} \varepsilon_i H_{ik} \left(\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \right. \\
 \left. + \left(\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) \left(\tilde{S}_k - H_k^+ - \sum_{i \neq k} H_{ik} \right) \right] dt + \\
 + \alpha_\Gamma (T_\Gamma - T_k) S_k dt + \alpha_B (T_0 - T_k) (\tilde{S}_k - S_k) dt, \quad k = 1, 2, \dots, 3n, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где ε_k – чернота области k ; ε_ϕ – чернота факела; H_k^+ – взаимная площадь облучения между областью k и факелом; H_{ik} – площадь взаимного облучения между областями i и k ; T_ϕ – температура факела; T_k – температура области k ; T_0 – температура окружающей среды; S_k – полная площадь поверхности области (например, для стенки это

внутренняя поверхность и внешняя); \tilde{S}_k – площадь односторонней поверхности области; α_Γ , α_B – коэффициенты конвективной теплоотдачи в газовое пространство резервуара и в окружающий воздух.

Пульсации размеров пламени приводят к тому, что площади взаимного облучения H_k^+ между факелом и областями резервуара изменяются случайным образом. Будем предполагать, что все они имеют вид

$$H_k^+(t) = H_k^+ \xi(t),$$

где H_k^+ – площадь взаимного облучения между областью k и факелом, вычисленная для идеализированного факела, имеющего форму конуса; $\xi(t)$ – стационарный нормальный случайный процесс с математическим ожиданием $\bar{\xi} = 1$ и корреляционной функцией $K_\xi(\tau) = \sigma_\xi^2 e^{-\alpha_\xi |\tau|}$.

Температуру факела также будем рассматривать как стационарный нормальный случайный процесс $\theta(t)$ с математическим ожиданием $\bar{\theta} = \bar{T}_\Phi$ и корреляционной функцией $K_\theta(\tau) = \sigma_\theta^2 e^{-\alpha_\theta |\tau|}$. Тогда (1) примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dT_k}{dt} = & \varepsilon_k c_0 \left[\varepsilon_\Phi H_k^+ \left(\frac{\xi \theta^4}{100^4} - \frac{T_k^4}{100^4} \right) + \sum_{i \neq k} \varepsilon_i H_{ik} \left(\frac{T_i^4}{100^4} - \frac{T_k^4}{100^4} \right) + \right. \\ & \left. + \left(\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \frac{T_k^4}{100^4} \right) \left(\tilde{S}_k - \xi H_k^+ - \sum_{i \neq k} H_{ik} \right) \right] + \\ & + \alpha_\Gamma (T_\Gamma - T_k) S_k dt + \alpha_B (T_0 - T_k) (\tilde{S}_k - S_k), \quad k = 1, 2, \dots, 3n. \end{aligned} \quad (2)$$

Ввиду случайности функций $\xi(t)$ и $\theta(t)$, приращение dT_k/dt также будет случайным. Это означает, что температура $T_k(t)$ k -ой области резервуара является случайной функцией. Непосредственное определение закона распределения температур $T_k(t)$ практически невозможно ввиду произведений и четвертых степеней случайных функций в правой части (2). Для выяснения закона распределения нами была проведена серия численных экспериментов, в которых случайным образом генерировались ξ и θ . Оказалось, что распределение очень близко к нормальному. Статистическая проверка гипотезы о нормальном распределении показала ее непротиворечивость результатам численного моделирования.

Учитывая, что $T_k(t)$ распределены по нормальному закону, для полного вероятностного описания процесса нагрева резервуара необходимо знать математические ожидания $\bar{T}_k(t)$ и дисперсии σ_k^2 температур всех областей резервуара. Проведение серии численных

экспериментов для их оценки достаточно трудоёмко, поэтому представляет интерес аналитическое определение указанных параметров.

Для краткости запишем уравнение (2) в виде

$$\frac{dT_k}{dt} = g_k(\xi, \theta, T_k). \quad (3)$$

Возьмем математические ожидания от левой и правой части. Поскольку законы распределения величин ξ , θ , T_k известны, то вычисление математических ожиданий в правой части не представляет сложности. В итоге получим систему дифференциальных уравнений относительно математических ожиданий:

$$\frac{d\bar{T}_k}{dt} = \bar{g}_k(\bar{\xi}, \bar{\theta}, \bar{T}_k, \sigma_\xi, \sigma_\theta, \sigma_k). \quad (4)$$

В уравнение (4) наряду с математическими ожиданиями входят еще неизвестные дисперсии σ_k^2 . Составим теперь уравнения для их определения. Для этого рассмотрим приращение дисперсии в произвольный момент времени t :

$$\frac{d}{dt} \sigma_k^2(t) = \frac{d}{dt} [M(T_k - \bar{T}_k)^2] = 2M[(T_k - \bar{T}_k)g_k]. \quad (5)$$

При нахождении такого математического ожидания придется вычислять математические ожидания от произведений T_k на ξ и θ , т.е. ковариации $K_{\xi k} = M(\xi - \bar{\xi})(T_k - \bar{T}_k)$ и $K_{\theta k} = M(\theta - \bar{\theta})(T_k - \bar{T}_k)$. Поэтому наряду с уравнением для дисперсии необходимо рассматривать уравнения для ковариаций:

$$\frac{d}{dt} K_{\xi k} = M \left[(T_k - \bar{T}_k) \frac{d}{dt} (\xi - \bar{\xi}) + (\xi - \bar{\xi}) \frac{d}{dt} (T_k - \bar{T}_k) \right].$$

Поскольку $\xi(t)$ – нормальный стационарный случайный процесс с корреляционной функцией $K_\xi(\tau) = \sigma_\xi^2 e^{-\alpha_\xi |\tau|}$, то его производная представима в виде [4]:

$$\frac{d\xi}{dt} = -\alpha_\xi (\xi - \bar{\xi}) + \sigma_\xi \sqrt{2\alpha_\xi} \zeta(t),$$

где $\zeta(t)$ – белый шум с нулевым средним и единичной дисперсией. Тогда уравнение для ковариации примет вид

$$\frac{d}{dt} K_{\xi k} = M[(\xi - \bar{\xi})g_k] - \alpha_\xi K_{\xi k}. \quad (6)$$

Совершенно аналогично строится дифференциальное уравнение для ковариации между температурой факела θ и температурой нагреваемой поверхности T_k :

$$\frac{d}{dt} K_{\theta k} = M[(\theta - \bar{\theta})g_k] - \alpha_\theta K_{\theta k}. \quad (7)$$

Таким образом, для нахождения математических ожиданий и дисперсий температур необходимо решить систему дифференциальных уравнений (4)-(7) с начальными условиями $\sigma_k^2(0) = K_{\xi k}(0) = K_{\theta k}(0) = 0$, $\bar{T}_k(0) = T_0$. Такой выбор начальных условий связан с тем, что в начальный момент времени температура детерминирована: $T_k(0) = T_0$.

Обсуждение результатов. Уравнения (6) и (7) указывают на роль множителя α в показателе корреляционных функций $K_{\xi k}(\tau)$ и $K_{\theta k}(\tau)$. Поскольку ковариации $K_{\xi k}$, $K_{\theta k}$ неотрицательны (большие температура и размер факела влекут больший нагрев резервуара), то с ростом α будет уменьшаться прирост ковариации в момент времени t . Следовательно, сама ковариация будет достигать меньших значений. Наоборот, уменьшение α будет приводить к увеличению этих ковариаций.

Выводы. Построена математическая модель нагрева резервуара с нефтепродуктом от факела, подверженного случайным пульсациям температуры и размеров. Если указанные пульсации распределены нормально, то распределение температур резервуара оказывается практически нормальным. В этом случае удастся построить систему дифференциальных уравнений для определения математических ожиданий и дисперсий температур.

Перспективы дальнейших исследований связаны с построением модели нагрева резервуара, учитывающей найденную зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи от температур стенки и среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Моделирование нагрева резервуара под действием излучения пожара. – Вестник международного славянского университета. – Харьков: ООО ПКФ «Яна», 2004, т. 7, №2. – С. 7-9.
2. 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.
3. Басманов А.Е., Говаленков С.В., Горбенко М.О. Влияние случайных факторов на воспламенение соседних резервуаров при пожаре в резервуарном парке. – Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: Фолио, 2003. – Вып. 15. – С. 59-64.
4. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: 1968. – 463 с.