

УДК 621.3

*Ю.А. Абрамов, д-р техн. наук, профессор, проректор, АГЗУ,
А.Е. Басманов, канд. техн. наук, докторант, АГЗУ*

ВЛИЯНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ПЛАМЕНИ НА НАГРЕВ РЕЗЕРВУАРА ПРИ ПОЖАРЕ

Рассмотрены случайные пульсации пламени горящего резервуара и их влияние на нагрев соседних резервуаров с нефтепродуктами. Для случая, когда пульсации представляют собой нормальный стационарный случайный процесс, построены оценки математического ожидания и дисперсии температур стенки и крыши резервуара, обращенного в сторону факела.

Постановка проблемы. Тушение пожара в резервуарных парках существенно осложняется угрозой воспламенения или взрыва соседних резервуаров. По своей сути процесс горения является случайным процессом, поэтому с практической точки зрения важно не только построить детерминированную модель нагрева резервуара, но и учесть влияние случайных факторов. Ими могут быть, например, пульсации пламени, случайные порывы ветра. Поскольку само пламя представляет собой раскаленные продукты горения, то колебания температуры внутри него приводят к их большему или меньшему нагреву, что в свою очередь определяет форму и размеры пламени.

Анализ публикаций. В [1] была построена модель, описывающая процесс нагрева резервуара под действием теплового излучения от пламени соседнего горящего резервуара. При этом предполагалось, что факел имеет форму конуса. В [2] 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 существенно нелинейный характер [1].

Постановка задачи и ее решение. В предположении, что форма факела претерпевает случайные изменения, построим модель нагрева соседнего резервуара.

В [1] была построена модель, в которой нагревающийся резервуар разбивался вертикальными плоскостями на сегменты, в пределах которых температуру можно считать постоянной. Указанная модель учитывает теплообмен, как излучением, так и конвекцией. Было показано, что за малый промежуток времени dt каждая область получает количество тепла dQ_k :

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

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 окружающий воздух.

Случайные пульсации пламени приводят к постоянному изменению площадей взаимного облучения H_k^+ между факелом и стенкой и крышей резервуара. Изменения взаимных площадей облучения для разных областей, вообще говоря, не происходят синхронно, но для упрощения будем полагать, что указанные площади описываются случайными процессами вида

$$H_k^+(t) = H_k^+ \xi(t), \quad (2)$$

где $\xi(t)$ – нормальный стационарный случайный процесс с математическим ожиданием $a = 1$ и корреляционной функцией $K_\xi(t)$;

H_k^+ – как ранее, площадь взаимного облучения между рассматриваемой областью и идеализированной формой факела в виде конуса.

Ввиду случайности взаимных площадей облучения, количество тепла dQ_k из (1) также будет случайным. Однако распределение уже не будет нормальным ввиду четвертых степеней от случайных

температур T_k . Кроме того, коэффициенты конвективной теплоотдачи, вообще говоря, зависят от температур.

Процесс нагрева представляет собой многомерный марковский процесс. Действительно, прирост температуры dT_k определяется только вектором текущих температур (T_1, T_2, \dots, T_m) и нормальной случайной величиной $\xi(t)$:

$$\frac{dT_k}{dt} = F_k(T_1, T_2, \dots, T_m, \xi), \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

Согласно [3], случайный процесс $\xi(t)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\frac{d\xi}{dt} + \alpha(\xi(t) - a) = \sigma\sqrt{2\alpha}\zeta(t), \quad (4)$$

где $\zeta(t)$ – белый шум.

Поведение многомерного марковского процесса $\eta(t)$ определяется условной плотностью распределения $f(t, x_1, \dots, x_n, \tau, y_1, \dots, y_n)$, описывающей совместную плотность распределения $\eta(t)$, при условии, что $\eta(t) = (x_1, \dots, x_n)$, $t \leq \tau$. Эта функция удовлетворяет прямой и обратной системам Колмогорова:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^n a_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} = 0,$$

$$\frac{\partial f}{\partial \tau} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial y_i} (a_i f) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2}{\partial y_i \partial y_j} (b_{ij} f) = 0,$$

где в первом уравнении коэффициенты a_i , b_i являются функциями t , x_1, \dots, x_n , а во втором – функциями τ , y_1, \dots, y_n . В [3] показано, что если случайные функции $U_1(t), \dots, U_n(t)$ удовлетворяют системе дифференциальных уравнений

$$\frac{dU_k}{dt} = \psi(t, U_1, \dots, U_n) + \sum_{i=1}^n g_{ki}(t, U_1, \dots, U_n) \zeta_i(t), \quad k = 1, 2, \dots, n,$$

где $\zeta_i(t)$ – взаимно независимые белые шумы, то $U_1(t), \dots, U_n(t)$ являются компонентами многомерного марковского процесса, описываемого уравнениями Колмогорова с коэффициентами:

$$a_i = \psi_i(t, x_1, \dots, x_n), \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

$$b_{ij} = \sum_{k=1}^n g_{ik}(t, x_1, \dots, x_n) g_{jk}(t, x_1, \dots, x_n), \quad i, j = 1, 2, \dots, n.$$

Из (3)-(4) следует, что для рассматриваемого процесса:

$$a_i = F_i(x_1, \dots, x_m, z), \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad a_{m+1} = -\alpha(z - a);$$

$$b_{ij} = 0, \quad \text{для } i \leq m \text{ или } j \leq m; \quad b_{m+1, m+1} = 2\sigma^2\alpha.$$

Тогда прямое уравнение Колмогорова примет вид:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^m F_i \frac{\partial f}{\partial x_i} - \alpha(z - a) \frac{\partial f}{\partial z} + \sigma^2 \alpha \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = 0.$$

Решение данного уравнения очень трудоемко ввиду большого количества переменных x_1, \dots, x_n . Например, при разбиении нагреваемого резервуара на 16 сегментов мы получим 48 переменных (по 3 на каждый сегмент: стена, крыша, поверхностный слой нефтепродукта). При использовании сеточных методов это потребует сетки с q^{48} узлами, где q – количество узлов по каждой переменной. Поэтому имеет смысл воспользоваться более простыми приближенными методами.

Проведем серию численных экспериментов и оценим математическое ожидание и дисперсию случайного процесса по его реализациям. Разобьем ось времени точками t_1, t_2, \dots, t_r . В каждой из точек будем генерировать нормально распределенную случайную величину $\xi(t_i)$. Распределение $\xi(t_i)$ зависит, от реализации x_{i-1} , в предыдущий момент времени t_{i-1} . В [3] показано, что для стационарного нормального случайного процесса:

$$M(\xi(t_i) / \xi(t_{i-1}) = x_{i-1}) = a + r(\tau)(x_{i-1} - a),$$

$$D(\xi(t_i) / \xi(t_{i-1}) = x_{i-1}) = \sigma^2(1 - r^2(\tau)),$$

где $a = M\xi(t)$ – математическое ожидание процесса; σ^2 – его дисперсия; $\tau = t_i - t_{i-1}$; $r(\tau) = K_\xi(\tau) / \sigma^2$.

В качестве примера рассмотрим резервуар РВС-10000, заполненный нефтью, расположенный на расстоянии 20 м от такого же горящего резервуара. Будем полагать, что факел имеет форму конуса, на который накладываются случайные пульсации пламени, такие что площадь поперечного сечения пламени и взаимные площади облучения с соседним резервуаром изменяются по закону $S(t) = S\xi(t)$, где S – площадь, рассчитанная в предположении, что факел имеет форму идеального конуса; $\xi(t)$ – нормальный стационарный случайный процесс: $M\xi(t) = 1$, $K_\xi(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha\tau}$. Для параметров $\sigma = 0,3$ $\alpha = 1$ была проведена серия из 100 экспериментов. Такой выбор параметров гарантирует, что с вероятностью 0,997 значения $\xi(t)$ будут лежать от 0,1 до 1,9. Значения процесса в моменты времени, отстоящие более чем на 2 секунды, будут практически некоррелированными.

На рисунке 1 приведены, как усредненные по этим реализациям температуры части стены и крыши, обращенных к факелу, так и их минимальные и максимальные значения, характеризующие возможный диапазон колебания температуры.

Сравнение результата с детерминированной моделью (1) показывает совпадение с ней математического ожидания. Из рисунка видно, что, например, температура сухой стенки через 20 минут после начала пожара может лежать в диапазоне 280 °С до 300 °С. Учитывая, что температура воспламенения нефти лежит в этом диапазоне, можно сделать вывод, что случайные изменения пламени могут оказать существенное влияние на пожарную опасность соседних резервуаров.

Из рисунка также видно, что в первые минуты после начала пожара, когда температура растет быстро, влияние случайных факторов минимально. Напротив, когда температура приближается к своему максимуму, влияние случайных факторов усиливается: температура сухой стенки в 280 °С может быть достигнута и через 10 минут, и через 20 минут.

Проведение серии из 100 экспериментов позволяет утверждать, что с вероятностью 0,99 любая реализация будет лежать внутри построенного коридора (рис. 1).

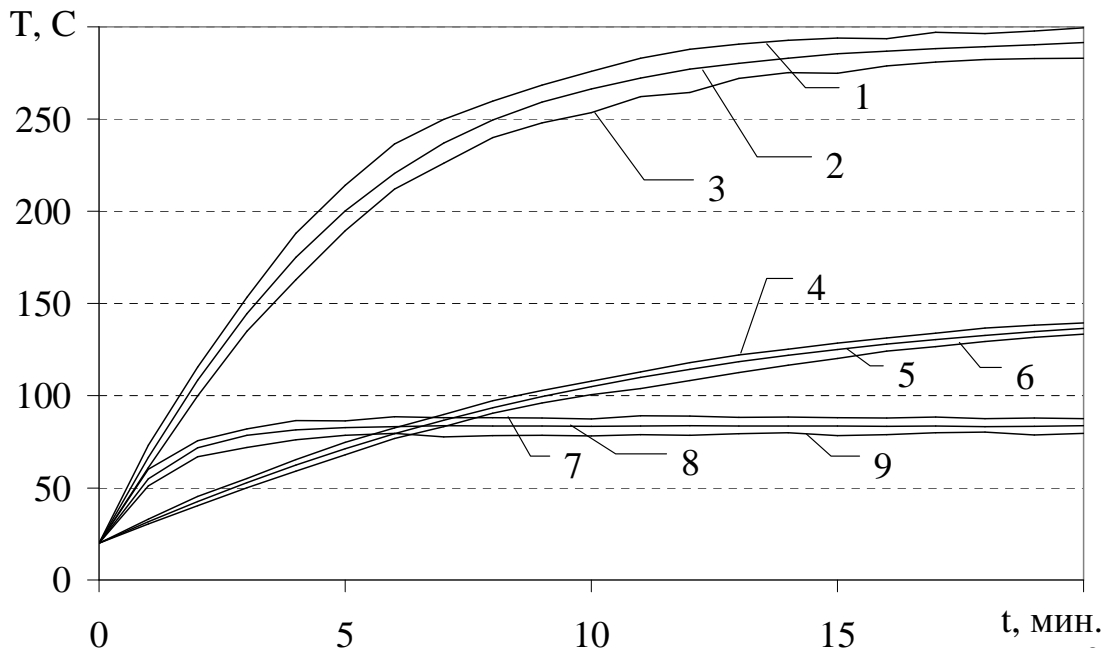


Рисунок 1 – Зависимость температуры обращенной к факелу части резервуара: 1, 2, 3 – максимальное, среднее и минимальное значение для сухой стенки; 4, 5, 6 – максимальное, среднее и минимальное значение для крыши; 7, 8, 9 – максимальное, среднее и минимальное значение для смоченной стенки.

Дисперсия температуры вначале растет вместе с ее математическим ожиданием, но затем стабилизируется по мере замедления роста температуры.

Выводы. В предположении о том, что пульсации пламени описываются нормальным стационарным случайным процессом, показано, что процесс нагрева резервуара описывается марковским процессом, и построено уравнение Колмогорова. Экспериментальным путем найдены оценки математического ожидания температуры и ее дисперсии для стенки и крыши, обращенной в сторону горящего резервуара. Расчеты показывают, что математические ожидания практически совпадают с детерминированной моделью (1). В отличие от [2] пульсации оказывают заметное влияние на процесс нагрева. Это связано с тем, что в [2] использовалась очень упрощенная модель нагрева (линейная зависимость).

Корреляционная функция процесса пульсаций оказывает существенное влияние на дисперсию температур. Поэтому перспективы дальнейших исследований связаны с экспериментальной оценкой указанной корреляционной функции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Моделирование нагрева резервуара под действием излучения пожара // Вестник международного славянского университета. – Харьков: Яна, 2004, т. 7, № 2. – С. 7-9.

2. Горбенко Н.А., Говаленков С.В., Басманов А.Е. Влияние случайных факторов на воспламенение соседних резервуаров при пожаре в резервуарном парке. Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: Фолио, 2004. – Вып. 15. – С. 59-64.

3. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: 1968. – 463 с.