

УДК 621.3

УЧЕТ ПУЛЬСАЦИЙ ПЛАМЕНИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОЖАРА В РЕЗЕРВУАРНОМ ПАРКЕ

*Абрамов Ю.А., д.т.н., профессор,

*Басманов А.Е., к.т.н.

*Академия гражданской защиты Украины

Рассмотрены случайные пульсации температуры и размеров факела, подчиняющиеся нормальному закону. Построена математическая модель, описывающая нагрев резервуара от пламени как случайный процесс. Модель позволяет определить математическое ожидание и дисперсию температуры нагревающегося резервуара.

Постановка проблемы. Резервуарные парки являются основным местом хранения нефти и нефтепродуктов. Скопление горючих и легковоспламеняющихся жидкостей на относительно небольшой площади приводит к высокой пожарной опасности объекта. Угроза каскадного распространения пожара существенно затрудняет действия пожарных подразделений и представляет серьезную опасность как для людей, так и для материальных ценностей. При этом на развитие пожара действует ряд случайных факторов: пульсации пламени, вызванные его турбулентным характером, порывы ветра и др. При построении моделей обычно пренебрегают такими факторами, описывая поведение процесса в среднем. Однако в ряде случаев полученная модель может оказаться слишком грубой.

Анализ публикаций. Эксперименты с горением нефтепродуктов в горелках и уменьшенных моделях резервуаров [1] 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. В [4] 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 [5].

Постановка задачи и ее решение. Построим модель нагрева резервуара с нефтепродуктом от факела другого горящего резервуара, предполагая наличие случайных пульсаций пламени.

Пусть на некотором расстоянии от горящего резервуара находится другой резервуар, заполненный нефтепродуктом до уровня h_1 (рис. 1). Под действием теплового излучения нагреваются крыша резервуара, сухая стенка и стенка, смоченная нефтепродуктом. Наибольшую опасность представляет нагрев сухой стенки, т.к. ее нагрев до температуры самовоспламенения нефтепродукта может привести к взрыву паровоздушной смеси или к горению на дыхательной арматуре. Поэтому в дальнейшем основное внимание мы будем уделять именно температуре сухой стенки. В [5] была построена модель, в которой нагревающийся резервуар разбивался вертикальными плоскостями, проходящими через ось OZ так, чтобы они образовывали с осью OX углы, равные $0, \Delta\varphi, 2\Delta\varphi$ (рис. 1). В этом случае боковая поверхность окажется разбитой на n равных вертикальных полос с шагом $\Delta\varphi$, поверхность нефтепродукта – на сектора, крыша конуса – на сегменты с тем же шагом $\Delta\varphi$. В пределах каждой из $3n$ полученных областей температура предполагается постоянной.

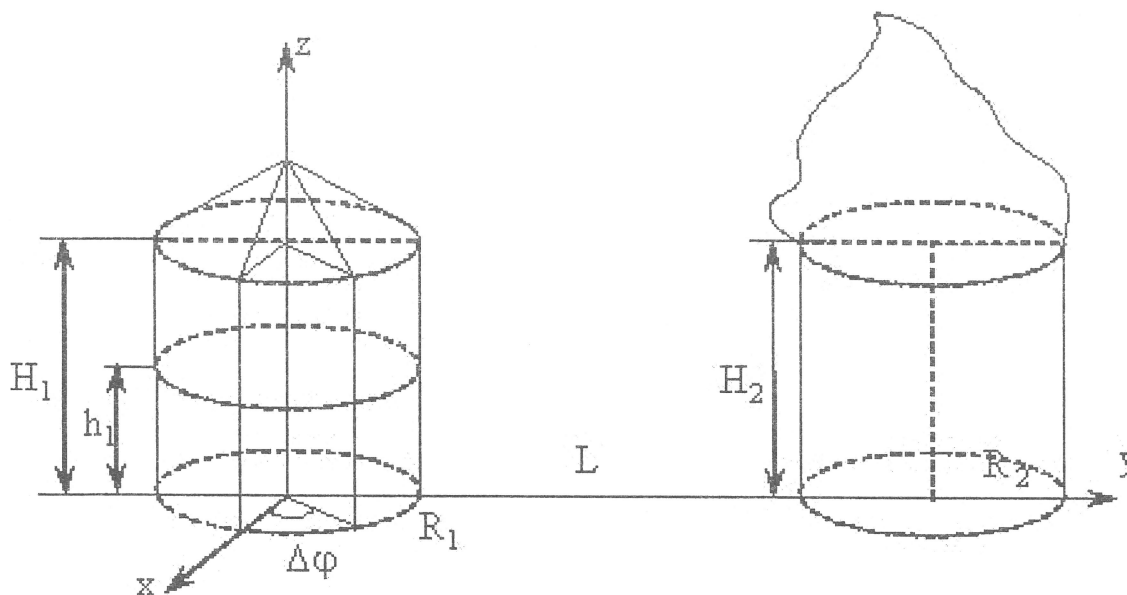


Рис. 1. Разбиение нагреваемого резервуара на сегменты

Будем полагать, что тепло от факела к стенкам и крыше резервуара передается только излучением в соответствии с законом Стефана-Больцмана. В свою очередь стенки и крыша участвуют в теплообмене как излучением, так и благодаря конвекции паровоздушной смеси внутри резервуара и окружающего воздуха снаружи. Тогда за малый промежуток времени dt каждая область получает количество тепла dQ_k :

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

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 соответственно. Слагаемое в квадратных скобках соответствует теплообмену излучением с факелом, окружающей средой, другими областями резервуара. Второе и третье слагаемые определяют конвективный теплообмен с паровоздушной смесью внутри резервуара и окружающим воздухом.

Случайные пульсации пламени приводят к тому, что площади взаимного облучения H_k^+ между факелом и стенкой и крышей резервуара яв-

ляются случайными функциями времени. При этом изменение высоты или ширины пламени приводит к одновременному увеличению всех площадей, в то время как его наклон в сторону увеличивает одни площади, уменьшая другие. Поэтому изменение взаимных площадей облучения для разных областей, вообще говоря, не происходит синхронно, но для упрощения будем полагать, что указанные площади описываются случайными процессами вида

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

где $\xi(t)$ – нормальный стационарный случайный процесс с математическим ожиданием $\bar{\xi} = 1$, дисперсией σ_ξ^2 и корреляционной функцией $K_\xi(\tau)$;

H_k^+ – как и ранее, площадь взаимного облучения между рассматриваемой областью и идеализированной факелом в форме конуса.

Средняя по поверхности факела температура $\theta(t)$ меняется со временем случайным образом. Будем предполагать закон распределения температуры нормальным с математическим ожиданием \bar{T}_θ , дисперсией σ_θ^2 и корреляционной функцией $K_\theta(\tau)$.

С учетом случайных пульсаций пламени уравнение (1) примет вид

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

где m_k, c_k – масса и теплоемкость области k .

В силу случайности функций $\theta(t)$ и $\xi(t)$, температуры нагреваемых поверхностей резервуара $T_k(t)$ также будут случайными функциями.

Определить закон распределения температур $T_k(t)$ и их приращений $\frac{dT_k}{dt}$ затруднительно ввиду произведений и четвертых степеней случайных величин в правой части (2). Незнание закона распределения в свою очередь не позволяет найти математические ожидания температур $T_k(t)$. Для выяснения закона распределения случайных функций $T_k(t)$ была проведена серия численных экспериментов, в которых генерировались случайные величины ξ и θ . Эксперимент показал, что закон распределения $T_k(t)$ очень близок к нормальному закону. Статистическая проверка подтвердила эту гипотезу.

Предполагая, что ξ , θ , T_k распределены нормально, найдем математические ожидания левой и правой части (2):

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{T}_k}{dt} = \frac{\varepsilon_k c_0}{m_k c_k} & \left[\varepsilon_\phi H_k^+ \left(\frac{M(\xi\theta^4)}{100^4} - \frac{M(\xi T_k^4)}{100^4} \right) + \sum_{i \neq k} \varepsilon_i H_{ik} \left(\frac{MT_i^4}{100^4} - \frac{MT_k^4}{100^4} \right) + \right. \\ & \left. + M \left(\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) \left(\tilde{S}_k - \xi H_k^+ - \sum_{i \neq k} H_{ik} \right) \right] + \\ & + \frac{1}{m_k c_k} \left[\alpha_r (\bar{T}_r - \bar{T}_k) S_k + \alpha_b (T_0 - \bar{T}_k) (\tilde{S}_k - S_k) \right], \quad k = 1, 2, \dots, 3n. \end{aligned} \quad (3)$$

Вычислим математические ожидания, входящие в правую часть (3):

$$M(\xi\theta^4) = \bar{T}_\phi^4 + 4r\bar{T}_\phi^3 \sigma_\xi \sigma_\theta + 6\bar{T}_\phi^2 \sigma_\xi^2 + 12r\bar{T}_\phi \sigma_\xi \sigma_\theta^3 + 3\sigma_\theta^4,$$

где r – коэффициент корреляции между случайными величинами ξ и θ .

Далее для упрощения будем полагать, что случайные величины ξ и T_k не коррелируют. Тогда

$$M(\xi T_k^4) = M\xi M T_k^4 = \bar{T}_k^4 + 6\bar{T}_k^2 \sigma_k^2 + 3\sigma_k^4,$$

где $\sigma_k^2(t)$ – дисперсия случайной функции $T_k(t)$.

Имитационное моделирование показывает, что среднеквадратическое отклонение $\sigma_k(t)$ по своей величине существенно меньше $T_k(t)$: $\sigma_k(t) < 0,05T_k(t)$. Это позволяет упростить последнее математическое ожидание:

$$\bar{T}_k^4 + 6\bar{T}_k^2\sigma_k^2 + 3\sigma_k^4 < \bar{T}_k^4(1 + 0,015 + 0,00002) \approx \bar{T}_k^4.$$

Подставляя найденные значения в (3), получим систему дифференциальных уравнений для математических ожиданий температур:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{T}_k}{dt} = & \frac{\varepsilon_k c_0}{m_k c_k} \left[\varepsilon_\phi H_k^+ \left(\frac{\bar{T}_\phi^4 + 4r\bar{T}_\phi^3\sigma_\xi\sigma_\theta + 6\bar{T}_\phi^2\sigma_\theta^2 + 12r\bar{T}_\phi\sigma_\xi\sigma_\theta^3 + 3\sigma_\theta^4}{100^4} - \frac{\bar{T}_k^4}{100^4} \right) + \right. \\ & + \sum_{i \neq k} \varepsilon_i H_{ik} \left(\frac{\bar{T}_i^4}{100^4} - \frac{\bar{T}_k^4}{100^4} \right) + \left. \left(\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_k}{100} \right)^4 \right) \left(\tilde{S}_k - H_k^+ - \sum_{i \neq k} H_{ik} \right) \right] + \\ & + \frac{1}{m_k c_k} \left[\alpha_\Gamma (\bar{T}_\Gamma - \bar{T}_k) S_k + \alpha_B (T_0 - \bar{T}_k) (\tilde{S}_k - S_k) \right], \quad k = 1, 2, \dots, 3n. \quad (4) \end{aligned}$$

Сравнение уравнения для математического ожидания (4) с детерминированным случаем (2) показывает, что они совпадут по форме, если ввести эффективную температуру:

$$\tilde{T}_\phi = \sqrt[4]{\bar{T}_\phi^4 + 4r\bar{T}_\phi^3\sigma_\xi\sigma_\theta + 6\bar{T}_\phi^2\sigma_\theta^2 + 12r\bar{T}_\phi\sigma_\xi\sigma_\theta^3 + 3\sigma_\theta^4}. \quad (5)$$

Другими словами, наличие пульсаций эквивалентно (в смысле среднего) изменению температуры факела до температуры (5).

Рассмотрим вопрос о значении коэффициента корреляции r . Видимое нами пламя – это раскаленные частицы углерода. Увеличение видимых размеров пламени говорит о большем выделении энергии и, следовательно, о большей температуре, т.е. связь между размерами факела и его температурой положительна. Это дает основание полагать коэффициент корреляции r неотрицательным. Проведенные нами наблюдения во время учений по тушению резервуара указывают на коэффициент корреляции порядка $0,4 \div 0,7$. Все это позволяет утверждать, что $\tilde{T}_\phi > \bar{T}_\phi$. Таким образом, с увеличением дисперсии пульсаций факела средняя температура нагревающегося резервуара растет. Соотношение (5) показывает также, что увеличение средней температуры будет тем существеннее, чем сильнее

корреляционная связь между пульсациями размеров и температуры факела. В качестве примера на рисунке 2 показана зависимость увеличения температуры $\Delta T = \tilde{T}_\phi - \bar{T}_\phi$ от отношения $\sigma_\theta / \bar{T}_\phi$ и произведения $r\sigma_\xi$ для $\bar{T}_\phi = 1100$ °С (температура пламени горячей нефти).

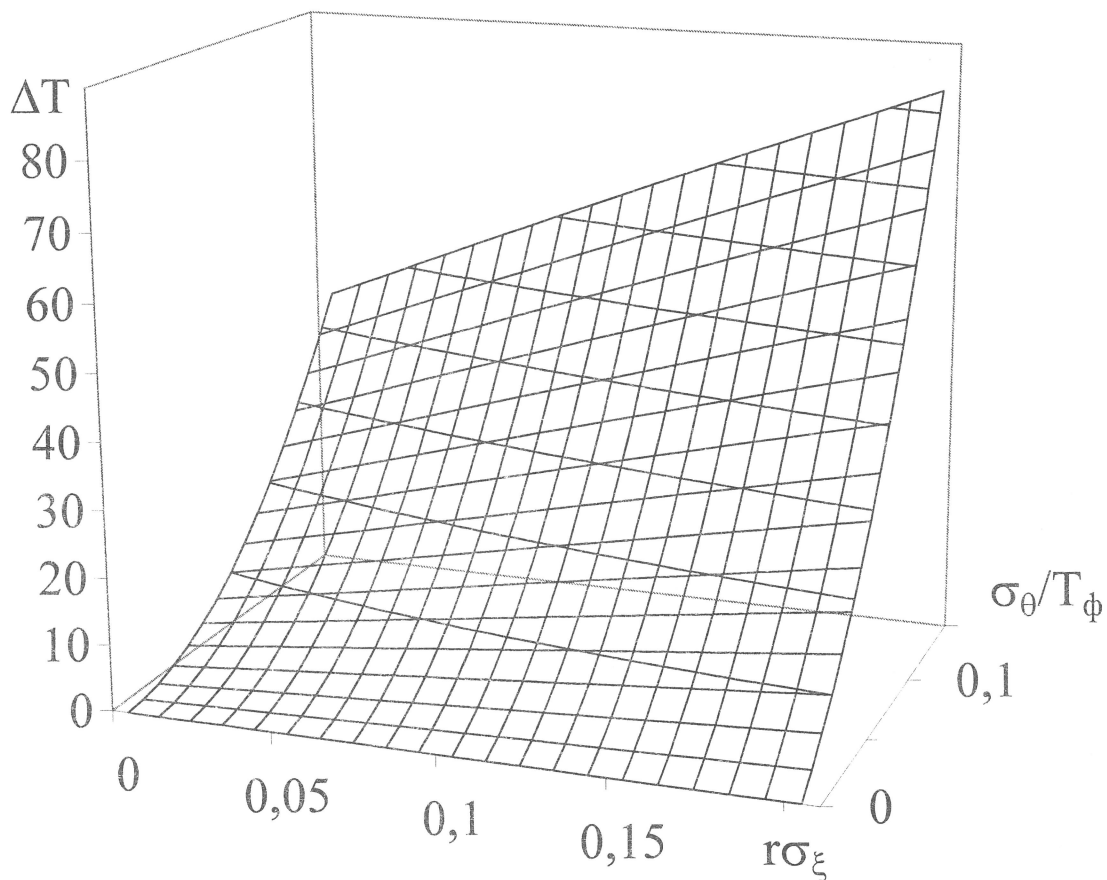


Рис. 2. Увеличение эффективной температуры ΔT в зависимости дисперсии пульсаций факела

Из рисунка видно, что рост эффективной температуры $\tilde{T}_\phi = \bar{T}_\phi + \Delta T$ оказывается достаточно заметным и может повлечь увеличение температуры стенки резервуара на несколько десятков градусов по сравнению с детерминированным случаем. Соотношение (5) показывает, что на эффективную температуру влияет в основном дисперсия температуры факела. Влияние пульсаций размеров факела проявляется лишь благодаря корреляционной связи между размерами и температурой. При нулевой корреляции эффективная температура и, следовательно, средняя температура резервуара не зависят от дисперсии размеров факела.

Отметим, что подход, примененный к выводу уравнений для математических ожиданий, может быть использован и для определения дисперсии температур нагреваемых поверхностей резервуара.

Выводы. Построена математическая модель нагрева резервуара с нефтепродуктом от факела, подверженного случайным пульсациям размеров и температуры. Посредством имитационного моделирования показано, что при нормальных законах распределения температуры факела и его размеров, температура нагреваемого резервуара имеет распределение близкое к нормальному. Построена система дифференциальных уравнений, решением которой является математическое ожидание температур различных частей нагреваемого резервуара. Показано, что появление пульсаций пламени приводит к росту математического ожидания температуры резервуара. Математическое ожидание растет с увеличением дисперсии этих пульсаций.

Дальнейшие исследования связаны с аналитическим определением дисперсии температуры резервуара. Найденные математические ожидания и дисперсии в совокупности с нормальным законом дают полное вероятностное описание системы «факел-резервуар».

ЛИТЕРАТУРА

1. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. – М.: Изд. АН СССР, 1961.
2. Рябова І.Б., Сайгук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. – Харків: АПБУ, 2002. – 352 с.
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.
4. 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.
5. 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.