УДК 621.3

ВЛИЯНИЕ ПОЖАРА НА РЕЗЕРВУАР С НЕФТЕПРОДУКТОМ

Ю.А. Абрамов, профессор, д.т.н., ХНАДУ, А.Е. Басманов, к.т.н., Академия гражданской защиты Украины

Аннотация. *Построена математическая модель нагрева резервуара с нефтепродуктом под действием излучения от пламени горящего соседнего резервуара. Модель позволяет определить время достижения взрывоопасной температуры.*

Ключевые слова: *вертикальный стальной резервуар, резервуарный парк, теплопередача излучением, конвективная теплопередача, закон Стефана-Больцмана, система дифференциальных уравнений.*

Введение

Резервуарные парки являются основным местом хранения нефти и нефтепродуктов. В случае возникновения пожара в одном из резервуаров возникает опасность нагрева и взрыва соседних резервуаров. Это существенно осложняет работу пожарных подразделений. Поэтому для практики важной является оценка времени, через которое резервуар может нагреться до взрывоопасной температуры. Наиболее широко распространены вертикальные стальные резервуары (РВС) со стационарной крышей.

Анализ публикаций

В работе [1] была построена модель нагрева стенок, крыши резервуара и поверхностного слоя нефтепродукта. При этом предполагалось, что равномерно нагревается обращенная к факелу сторона резервуара. Однако такое предположение является слишком сильным. В действительности она нагревается неравномерно, а ввиду больших размеров резервуара, теплопроводности стали недостаточно для того, чтобы выровнять температуру [2].

Цель и постановка задачи

Цель работы – найти распределение температуры вдоль сухой стенки (не соприкасающейся с нефтепродуктом) цилиндрического резервуара типа РВС.

Достижение указанной цели требует решения следующих задач: построение модели передачи тепла от пламени к соседнему резервуару; учет передачи тепла от нагревшейся стенки внутри резервуара.

Математическая модель нагрева резервуара

При пожаре основным путем передачи тепла является излучение [3]. Поэтому будем предполагать, что передача тепла от пламени горящего резервуара к соседнему резервуару осуществляется только излучением, пренебрегая другими видами теплопередачи. Внутри нагреваемого резервуара имеет место передача тепла как излучением, так и конвективным теплопереносом, благодаря циркуляции смеси паров нефтепродукта и воздуха [2].

Пусть нагревающийся резервуар находится на расстоянии L от горящего (рис. 1). Для того чтобы учесть неравномерный нагрев резервуара, разобьем его вертикальными секущими плоскостями, проходящими через ось z, на n одинаковых сегментов. Тем самым мы получим $3n$ областей (по 3 области для каждого сегмента: сектор поверхности нефтепродукта, полоса боковой стенки, сегмент крыши).

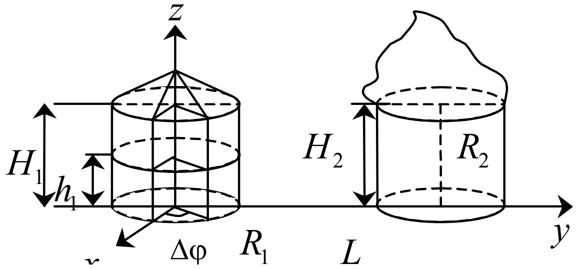

Рис. 1. Горящий резервуар (справа) и нагревающийся от него (слева), h_1 – уровень нефтепродукта

В пределах одной области будем считать температуру одинаковой. Количество тепла dQ_{ij}, передаваемое от области i к области j за малое время dt, определяется законом Стефана-Больцмана

$$dQ_{ij} = c_0 \varepsilon_i \varepsilon_j \left(\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_j}{100} \right)^4 \right) H_{ij} dt,$$

где $c_0 = 5{,}67 \ \frac{Вт}{м^2 K^4}$; ε_i, ε_j – коэффициенты черноты областей i, j; T_i, T_j – температуры областей i, j; H_{ij} – взаимная площадь облучения между областями [1, 3].

В [1] показано, что количество тепла dQ_k^r, получаемое областью k за малый промежуток времени dt путем теплопередачи излучением равно

$$dQ_k^r = \varepsilon_k c_0 \left[\varepsilon_\phi H_k^+ \left(\left(\frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \right.$$
$$+ \sum_{i \neq k} \varepsilon_i H_{ik} \left(\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) +$$
$$\left. + \left(\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) \left(\tilde{S}_k - H_k^+ - \sum_{i \neq k} H_{ik} \right) \right] dt,$$

$$k = 1,\ 2,\ ...,\ 3n, \qquad (1)$$

где $T_ф$ – средняя температура факела пламени; $\varepsilon_ф$ – коэффициент черноты пламени; H_k^+ – взаимная площадь облучения между областью k и факелом; T_0 – температура окружающей среды; $\tilde{S}_k$ – площадь полной поверхности области k. Если обозначить через S_k площадь поверхности, соприкасающейся с газовым пространством внутри резервуара, то для стенки и крыши $\tilde{S}_k = 2S_k$, а для поверхности нефтепродукта $\tilde{S}_k = S_k$.

Каждая из областей участвует в теплообмене с паровоздушной смесью внутри резервуара. Полагая температуру по всему объему одинаковой и равной $T_г(t)$, запишем количество тепла, получаемое областью из газового пространства (закон Ньютона)

$$dQ_k^г = \alpha \left(T_г - T_k \right) S_k,\ k = 1,\ 2,\ ...,\ 3n, \qquad (2)$$

где α – коэффициент конвективной теплопередачи. Здесь мы предполагаем, что паровоздушная смесь внутри резервуара нагрета равномерно. Это предположение справедливо благодаря интенсивному перемешиванию смеси, вызванному циркуляцией вдоль нагретой стенки, обращенной к факелу [3]. Стенка и крыша также участвуют в теплообмене с окружающим воздухом:

$$dQ_k^0 = \alpha \left(T_0 - T_k \right) \left(\tilde{S}_k - S_k \right). \qquad (3)$$

Объединяя выражения (1)–(3), получим полное количество тепла, получаемое областью k за промежуток время dt:

$$dQ_k = dQ_k^r + dQ_k^г + dQ_k^0. \qquad (4)$$

Для газовой среды внутри резервуара

$$dQ_г = \alpha \sum_{k=1}^{3n} \left(T_k - T_г \right) S_k dt. \qquad (5)$$

Тепло, полученное паровоздушной смесью, приводит к увеличению ее температуры на $dT_г$: $dQ_г = \rho_г V_г c_v dT_г$, где $\rho_г$, $V_г$ – плотность и объем паровоздушной смеси; c_v – ее теплоемкость при постоянном объеме.

Ввиду небольшой толщины стальной стенки (5 мм) и хорошей теплопроводности стали, будем предполагать, что стенка и крыша нагреваются равномерно по всей толщине. Тогда количество тепла dQ_k приведет к изменению температуры на dT_k: $dQ_k = S_k \delta \rho_c c_c dT_k$, где m_k, ρ_c, δ – масса, плотность и толщина стали; c_c – ее теплоемкость.

Прогрев нефтепродукта в глубину будем рассматривать как нагрев стержня, один конец которого теплоизолирован (дно), а другой (поверхность) – участвует в теплообмене с окружающей средой:

$$\frac{\partial T_k}{\partial t} = \frac{\lambda_н}{c_н \rho_н} \frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2}, \qquad (6)$$

$$\left. \frac{\partial T_k}{\partial x} \right|_{x=0} = 0,\ \left. \frac{\partial T_k}{\partial x} \right|_{x=h_1} = \frac{1}{\lambda_н S_k} \frac{dQ_k}{dt},$$

$$\left. T_k \right|_{t=0} = T_0, \qquad (7)$$

где $\lambda_н$ – коэффициент теплопроводности нефтепродукта; $c_н$, $\rho_н$ – его теплоемкость и плотность. Множитель dQ_k / dt в краевых условиях определяется из выражения (4).

Таким образом, нагрев резервуара описывается системой дифференциальных уравнений (4)–(7). Для ее решения разобьем весь временной интервал на отрезки длиной Δt. Зная распределение температур в момент времени t, по формулам (4)–(5) вычислим количество тепла ΔQ_k, полученное каждой из областей за время Δt. После этого для стенки, крыши и газовой смеси изменение температуры ΔT определяется непосредственно, а для нефтепродукта – путем решения дифференциального уравнения (6)–(7). Тем самым мы определим распределение температур в резервуаре в момент времени $t + \Delta t$.

Проиллюстрируем полученную модель следующим примером. Рассмотрим резервуар РВС-10000 (радиусом $R = 17{,}1$ м и высотой $H = 11{,}9$ м), наполненной нефтью до уровня 6 м, находящийся на расстоянии 30 м от такого же горящего резервуара. Пламя имеет форму конуса высотой $1{,}4R$ [3] и среднюю температуру 1100 ºС. Коэффициент черноты стальных стенок резервуара примем $\varepsilon = 0{,}8$, черноту нефти – $\varepsilon = 0{,}5$, черноту факела – $\varepsilon_ф = 0{,}85$. Начальную температуру и температуру окружающей среды будем считать равной 20 ºС. Коэффициент конвективного теплообмена α не является справочной величиной и зависит от ряда параметров системы. Практически его определяют экспериментально. В [4] приведена следующая оценка: $5 \le \alpha \le 50$ ($Вт/м^2 \cdot К$).

На рис. 2 показано распределение температуры вдоль стенки резервуара через 60 минут после начала пожара в зависимости от конвективного коэффициента α .

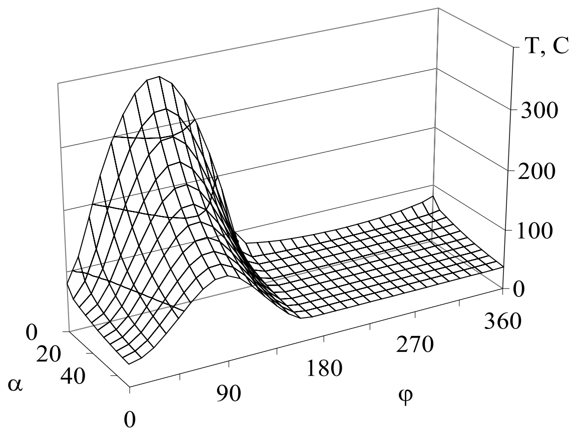

Рис. 2. Влияние коэффициента конвективного теплообмена α на распределение температуры вдоль стенки резервуара

Из рис. 2 видно существенное влияние коэффициента α: например, при $\alpha \le 10$ стенка будет достигать температуры самовоспламенения паров нефти (около 270 ºС в зависимости от сорта) и может служить источником зажигания для них. Процесс нагрева сегмента, обращенного в сторону горящего резервуара, изображен на рис. 3.

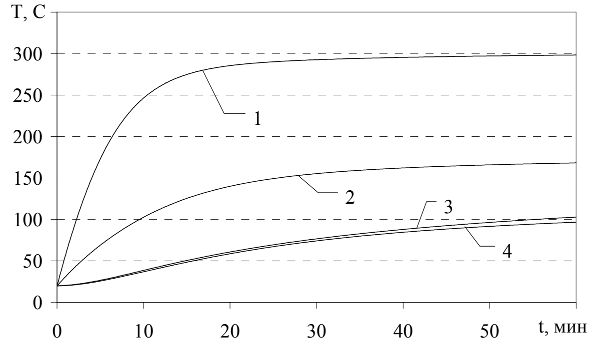

Рис. 3. Зависимость температуры сегмента, обращенного в сторону факела, от времени при $\alpha = 10$ $Вт/м^2К$: 1 – стенка; 2 – крыша; 3 – поверхность нефтепродукта; 4 – паровоздушная смесь

Выводы

Построена модель нагрева резервуара с нефтепродуктом под действием излучения пожара. С ее помощью можно найти распределение температуры внутри резервуара в произвольный момент времени. С практической точки зрения это означает возможность определить, может ли данный резервуар оказаться взрывоопасным, и через какое время.

Литература

1. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Нагрев поверхностного слоя нефтепродукта в резервуаре от факела горящего резервуара / Проблемы пожарной безопасности – Харьков: Фолио, 2004. – Вып. 16. – С. 5–10.
2. Волков О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. – М.: Недра, 1984. – 151 с.
3. Рябова І.Б., Сайгук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. – Харків: АПБУ, 2002. – 352 с.
4. Теплотехника / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; Под. ред. В.Н. Луканина. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2002. – 671 с.

Рецензент: О.П. Алексеев, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 22 февраля 2005 г.