6.Градштейн И.М., Рыжик И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Физматгиз, 1962. – 1100 с.

7.Абрамовиц А., Стиган И. Справочник по специальным функциям (с формулами, графиками и математическими таблицами). – М.: Наука, 1979. – 832 с.

8.Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. – М.: Наука, 1977. – 344 с.

9.Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. К расчету предельной дальности подачи испаряющихся тонкораспыленных огнетушащих веществ установками импульсного пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. – 2005. – №4. – С.67-70.

Получено 20.12.2005

УДК 621.3

Ю.А.АБРАМОВ, д-р техн. наук, А.Е.БАСМАНОВ, канд. техн. наук
Академия гражданской защиты Украины, г.Харьков

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В НАГРЕВАЮЩЕМСЯ РЕЗЕРВУАРЕ

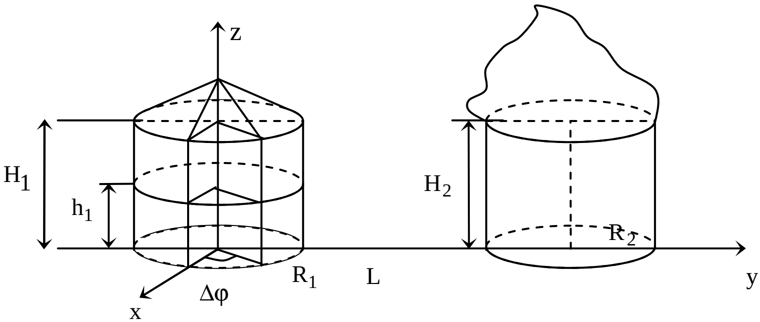
Предлагается математическая модель, описывающая процессы, происходящие в резервуаре с нефтепродуктом под действием излучения от горящего соседнего резервуара. Модель предназначена для определения температуры стенок резервуара, нефтепродукта и паровоздушной смеси.

При возникновении пожара в резервуарном парке возникает опасность каскадного распространения пожара. Это связано с тем, что при загорании одного из резервуаров под действием излучения нагреваются соседние, вследствие чего может произойти их взрыв или воспламенение. Поэтому практически важным является построение математической модели нагрева резервуара с нефтепродуктом.

В работе [1] был рассмотрен нагрев стены стального резервуара под действием теплового потока от горящего резервуара. При построении модели предполагалось, что теплопередача осуществляется исключительно излучением. Такой подход связан с тем, что основная часть тепла при пожаре передается именно излучением [2]. Однако внутри нагреваемого резервуара конвективный перенос может оказать существенное влияние на распределение температур.

Допустим, что передача тепла от факела происходит только излучением, а внутри резервуара – как излучением, так и конвективным переносом. Для этого случая построим метод расчета температуры стенок резервуара, нефтепродукта и паровоздушной смеси в вертикальном стальном резервуаре (РВС).

Под действием излучения от факела нагревается крыша резервуара и обращенная к нему часть стены. Нагревающаяся стена и крыша излучают тепло как в окружающее пространство, так и внутрь резервуара, нагревая тем самым поверхностный слой нефтепродукта и противоположную часть стены. Чтобы учесть неравномерный нагрев стены резервуара, разобьем его вертикальными секущими плоскостями, проходящими через ось z и отстоящими друг от друга на одинаковый угол φ. Тем самым получим n равных сегментов (рисунок). Каждый сегмент состоит из трех областей (сектор крыши, сектор поверхностного слоя нефтепродукта, полоса стены). Будем считать, что в пределах одной области температура остается постоянной.



Разбиение нагревающегося резервуара на сегменты

Количество тепла, передаваемое излучением 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 $c_0 = 5{,}67$ Вт/(м^2·К^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, 2].

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

$$dQ_k^r = \varepsilon_k c_0 \left[\varepsilon_\phi H_k^+ \left(\left(\frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \right.$$

$$\left. + \sum_{i \neq k} \varepsilon_i H_{ik} \left(\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \right.$$

$$+\left(\left(\frac{T_0}{100}\right)^4-\left(\frac{T_k}{100}\right)^4\right)\left(\tilde{S}_k-H_k^+-\sum_{i\neq k}H_{ik}\right)\Bigg]dt\,,\ k=1,2,...,3n\,, \qquad (1)$$

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. Заметим, что для стенки и крыши резервуара – это как внешняя, так и внутренняя поверхности. Если обозначить через S_k площадь поверхности, соприкасающейся с газовым пространством, 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, находящейся внутри резервуара. Как показывают наблюдения, вскоре после начала пожара по всему объему газового пространства нагреваемого резервуара устанавливаются одинаковые температура и концентрация паров нефтепродукта. Это происходит благодаря интенсивному перемешиванию конвективными потоками у нагревающейся стенки. Поэтому будем считать температуру паровоздушной смеси одинаковой по всему объему и равной $T_г(t)$. Согласно закону Ньютона, количество тепла, получаемое областью из газового пространства, равно

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

где α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м^2·К). Кроме того, стенка и крыша участвуют в теплообмене с окружающим воздухом:

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

Объединяя выражения (1)-(3), получим общее количество тепла dQ_k, получаемое областью k за промежуток времени dt:

$$dQ_k=\varepsilon_k c_0\left[\varepsilon_ф H_k^+\left(\left(\frac{T_ф}{100}\right)^4-\left(\frac{T_k}{100}\right)^4\right)+\right.$$

$$+\sum_{i\neq k}\varepsilon_i H_{ik}\left(\left(\frac{T_i}{100}\right)^4-\left(\frac{T_k}{100}\right)^4\right)+$$

$$+\left[\left(\left(\frac{T_0}{100}\right)^4-\left(\frac{T_k}{100}\right)^4\right)\left(\tilde{S}_k-H_k^+-\sum_{i\neq k}H_{ik}\right)\right]dt+$$

$$+\alpha(T_г-T_k)S_k dt+\alpha(T_0-T_k)(\tilde{S}_k-S_k)dt,\quad k=1,2,...,3n. \tag{4}$$

Для паровоздушной смеси:

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

Тепло, полученное паровоздушной смесью, идет на увеличение ее температуры на $dT_г$: $dQ_г=m_г c_v dT_г=\rho_г V_г c_v dT_г$. Здесь $m_г$, $\rho_г$, $V_г$ – масса, плотность и объем паровоздушной смеси; c_v – теплоемкость при постоянном объеме.

Ввиду хорошей теплопроводности стали и незначительной толщины стенок (до 5 мм) будем полагать, что она равномерно прогревается по всей толщине. Тогда количество тепла dQ_k приведет к изменению температуры на dT_k: $dQ_k=m_k c_c dT_k=S_k\delta\rho_c c_c dT_k$, где m_k, ρ_c, δ – масса, плотность и толщина стали; c_c – теплоемкость стали.

Прогрев нефтепродукта в глубину будем приближенно рассматривать как нагрев стержня, один конец которого теплоизолирован (дно), а на другом (поверхность) заданы условия теплообмена с окружающей средой:

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

$$\left.\frac{\partial T_k}{\partial x}\right|_{x=0}=0,\ \left.\frac{\partial T_k}{\partial x}\right|_{x=h_1}=\frac{1}{\lambda_н S_k}\frac{dQ_k}{dt},\ T_k\big|_{t=0}=T_0, \tag{7}$$

где $\lambda_н$ – коэффициент теплопроводности нефтепродукта, Вт/(м·К); $c_н$ – его теплоемкость; $\rho_н$ – плотность; величина $\dfrac{dQ_k}{dt}$ определяется выражением (4).

Разбивая стержень на m отрезков длиной Δh и задаваясь шагом Δt по оси времени, перейдем к конечно-разностной системе уравнений, из которой следует, что

$$T_k^i(t+\Delta t)=T_k^i(t)+\frac{\lambda_н}{\rho_н c_н}\frac{T_k^{i+1}(t)-2T_k^i(t)+T_k^{i-1}(t)}{\Delta h^2}\Delta t\,,\ i=1,2,...m-1\,, \quad (8)$$

$$T_k^0(t+\Delta t)=T_k^1(t+\Delta t)\,, \quad (9)$$

$$T_k^m(t+\Delta t)=T_k^{m-1}(t+\Delta t)+\frac{\Delta h}{\lambda_н S_k}\frac{dQ_k}{dt}\,, \quad (10)$$

где $T_k^i(t)$ – температура в узле i области k в момент времени t; узел 0 соответствует дну, а узел m – поверхности нефтепродукта.

Тогда алгоритм расчета температур можно записать следующим образом:

1. В начальный момент времени $t=0$ все температуры $T_k=T_o$.

2. Если задано распределение температур в момент времени t, то вычисляем количество тепла ΔQ_k, пришедшее к каждой из областей за время Δt по формуле (4).

3. Вычисляем количество тепла $\Delta Q_г$, полученное паровоздушной смесью за тот же промежуток времени по формуле (5).

4. Определяем температуры стенок и крыши в момент времени $t+\Delta t$:

$$T_k(t+\Delta t)=T_k(t)+\frac{\Delta Q_k}{S_k\delta\rho_c c_c}\,.$$

5. Определяем температуру паровоздушной смеси:

$$T_г(t+\Delta t)=T_г(t)+\frac{\Delta Q_г}{V_г\rho_г c_v}\,.$$

6. По формулам (8)-(10) определяем распределение температуры внутри нефтепродукта.

7. Для определения температур в следующий момент времени переходим к п.2.

Предложенная математическая модель и алгоритм расчета распределения температур внутри резервуара с нефтепродуктом типа РВС учитывает не только передачу тепла излучением, но и конвективный перенос. На примере пожара в резервуарном парке показано влияние этого фактора на тепловые процессы в резервуаре.

Перспективы дальнейших исследований связаны с уточнением диапазона численного значения коэффициента конвективного теплопереноса.

1.Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Моделирование нагрева резервуара под действием излучения пожара // Вісник Міжнародного слов’янського університету. Т.7, №2. – Харків: ТОВ ПКФ „Яна”, 2004. – С.7-9.

2.Рябова І.Б., Сайгук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. – Харків: АПБУ, 2002. – 352 с.

3.Теплотехника / В.Н.Луканин, М.Г.Шатров, Г.М.Камфер и др.; Под ред. В.Н.Луканина. – М.: Высш. шк., 2002. – 671 с.

Получено 02.11.2005