УДК 621.3

Ю.А. Абрамов, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной и технологической автоматики УГЗУ,
А.Е. Басманов, канд. техн. наук, докторант УГЗУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА СУХОЙ СТЕНКИ ГОРЯЩЕГО РЕЗЕРВУАРА С НЕФТЕПРОДУКТОМ

Предложена математическая модель для расчета температуры сухой стенки горящего резервуара. Модель предназначена для расчета теплового излучения от горящего резервуара и оценки времени огнестойкости сухой стенки при отсутствии охлаждения.

Постановка проблемы. Нагрев сухой стенки горящего резервуара с нефтепродуктом приводит, во-первых, к тому, что она сама становится источником теплового излучения для окружающих объектов, а, во-вторых, к потере ею прочности и деформации. В результате деформации образуются изолированные зоны горения, подача пены в которые существенно затруднена. Поэтому динамика изменения температуры сухой стенки важна как для расчета теплового излучения от горящего резервуара, так и для оценки времени ее деформации.

Анализ публикаций. В работе [2] построена математическая модель нагрева сухой стенки и крыши негорящего резервуара под действием излучения пожара. В [3, 4] рассмотрен прогрев нефтепродукта в горящем резервуаре в глубину. Но нагрев сухой стенки при этом не рассматривается.

Постановка задачи и ее решение. Найдем распределение температур по сухой стенке резервуара. При этом будем исходить из следующих предположений.

1. Передача тепла от факела к жидкости и стенкам происходит только излучением.
2. Температура поверхности нефтепродукта равна температуре ее кипения.
3. Сухая стенка резервуара участвует в теплообмене излучением (с факелом, поверхностью нефтепродукта, окружающей средой) и конвективном (с окружающим воздухом, газовым пространством).
4. Температура газового пространства резервуара равна температуре кипения нефтепродукта.
5. Теплопроводность стенки не влияет на распределение температуры в ней.

Предположение 1 основано на том, что разогретые продукты горения и воздух поднимаются вверх от зоны горения, не оказывая существенного воздействия на стальные конструкции резервуара. Это подтверждают экспериментальные исследования [4]. Допущение 2 связано с экспериментальным изучением распределения температуры в горящем нефтепродукте [3, 4]. Поднимающиеся с поверхности нефтепродукта пары имеют ту же температуру, что и сама поверхность. Поднимаясь в зону горения, они не успевают нагреться: это подтверждается исследованием распределения температур внутри пламени [4]. На этом и основывается предположение 4. Пятое допущение опирается на опытный факт [3], говорящий о том, что области стенки резервуара, отстоящие друг от друга на 30 см, являются практически теплоизолированными.

Под действием теплового потока от факела испаряющиеся с поверхности пары нефтепродукта поднимаются в зону горения. При этом горение будет происходить только над резервуаром, в самом резервуаре горение не происходит, ввиду отсутствия доступа туда кислорода. Пусть R – радиус резервуара, h – высота факела над резервуаром, h_0 – высота сухой стенки (рис. 1).

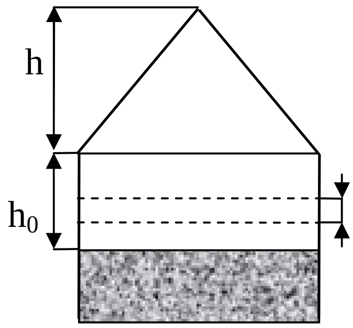

Рисунок 1 – Факел над горящим неполным резервуаром с нефтепродуктом

Для того чтобы учесть возможный неравномерный нагрев сухой стенки, разобьем ее на n равных колец высотой Δh (рис. 1). Занумеруем их так, чтобы нижнее кольцо имело номер 1, а верхнее – n. Количество тепла dQ_k, получаемое каждой из таких областей за промежуток времени dt, может быть представлено в виде:

$$dQ_k = \varepsilon_c c_0 \left[\varepsilon_ф H_k^+ \left(\left(\frac{T_ф}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_k}{100}\right)^4 \right) + \varepsilon_c \sum_{i \neq k} H_{ik} \left(\left(\frac{T_i}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_k}{100}\right)^4 \right) + \right.$$

$$\left. + \left(\left(\frac{T_0}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_k}{100}\right)^4 \right) S + \varepsilon_н H_k^- \left(\left(\frac{T_{кип}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_k}{100}\right)^4 \right) \right] dt +$$

$$+\alpha_г\left(T_{кип}-T_k\right)Sdt+\alpha_в\left(T_0-T_k\right)Sdt,\ k=1,2,...,n, \qquad (1)$$

где $\varepsilon_ф$, $\varepsilon_с$, $\varepsilon_н$ – степени черноты факела, стальной стенки, нефтепродукта; $T_ф$, T_k, T_0 – температуры факела, области k стенки, окружающей среды; $T_{кип}$ – температура кипения нефтепродукта; $S=2\pi R\Delta h$ – площадь поверхности области разбиения; H_k^+, H_k^- – площади взаимного облучения между областью k стенки резервуара и факелом или поверхностью нефтепродукта соответственно; H_{ki} – площади взаимного облучения между областями i и k стенки резервуара.

Первое слагаемое в уравнении (1) соответствует лучистому теплообмену стенки с факелом, второе – лучистому теплообмену между различными частями, третье – лучистому теплообмену стенки с окружающей средой; четвертое – лучистому теплообмену стенки с нефтепродуктом; пятое и шестое – конвективному теплообмену с газовым пространством резервуара и окружающим воздухом. При этом коэффициенты конвективного теплообмена $\alpha_г$ и $\alpha_в$ вычисляются с использованием теории подобия [1].

Учтем, что $dQ_k=S\delta\rho_c c_c dT$, где δ, ρ_c, c_c – толщина, плотность, теплоемкость стальной стенки резервуара. Тогда система дифференциальных уравнений, описывающих температуру сухой стенки горящего резервуара, примет вид:

$$\frac{dT_k}{dt}=\frac{\varepsilon_c c_0}{S\delta\rho_c c_c}\left[\varepsilon_ф H_k^+\left(\left(\frac{T_ф}{100}\right)^4-\left(\frac{T_k}{100}\right)^4\right)+\varepsilon_c\sum_{i\neq k}H_{ik}\left(\left(\frac{T_i}{100}\right)^4-\left(\frac{T_k}{100}\right)^4\right)+\right.$$

$$\left.+\left(\left(\frac{T_0}{100}\right)^4-\left(\frac{T_k}{100}\right)^4\right)S+\varepsilon_н H_k^-\left(\left(\frac{T_{кип}}{100}\right)^4-\left(\frac{T_k}{100}\right)^4\right)\right]+$$

$$+\frac{\alpha_г\left(T_{кип}-T_k\right)+\alpha_в\left(T_0-T_k\right)}{\delta\rho_c c_c},\ k=1,2,...,n. \qquad (2)$$

Вычислим площади взаимного облучения, входящие в (2):

$$H_{ik}=\frac{2R^4}{\pi}\int_0^{2\pi}(2\pi-t)(1-\cos t)^2dt\int_0^{\Delta h}(\Delta h-x)\times$$

$$\times\left(\frac{1}{\left[2R^2(1-\cos t)+\left(x+h_1-h_2\right)^2\right]^2}+\frac{1}{\left[2R^2(1-\cos t)+\left(x-h_1+h_2\right)^2\right]^2}\right)dx,$$

где $h_1 = (i-1)\Delta h$, $h_2 = (k-1)\Delta h$. Интегрируя по x, получим

$$H_{ik} = \frac{2R}{\pi}\int_0^{\pi} t\sin t\,\left(F(a(t),b) + F(a(t),-b)\right)dt,\ i,k = 1,2,\ldots n, \tag{3}$$

где $F(a,b) = (\Delta h + b)\operatorname{arctg}\left(\frac{\Delta h + b}{a}\right) - b\operatorname{arctg}\frac{b}{a}$, $a(t) = 2R\sin t$, $b = h_1 - h_2$.

Таким образом, площади взаимного облучения между областями сухой стенки могут быть найдены по формуле (3), позволяющей перейти от четырехкратного интеграла общего вида к однократному интегралу. Площади взаимного облучения области k с факелом H_k^+ и нефтепродуктом H_k^- могут быть найдены через площади H_{ik}. Площадь взаимного облучения между внутренней поверхностью кольца и одним из его оснований:

$$H_{осн} = (2\pi R\Delta h - H_{kk})/2.$$

где $H_{осн}$ – площадь взаимного облучения между внутренней поверхностью кольца и его верхним (или нижним) основанием. Тогда

$$H_k^+ = (2\pi R\Delta h - H_{kk})/2 - \sum_{i=k+1}^{n} H_{ik}, \tag{4}$$

$$H_k^- = (2\pi R\Delta h - H_{kk})/2 - \sum_{i=1}^{k-1} H_{ik}. \tag{5}$$

Решая систему уравнений (2) с коэффициентами (3)-(5) и начальным условием $T_k(0) = T_0$ каким-либо из численных методов, получим распределение температур по стенке резервуара в произвольный момент времени.

В качестве примера на рисунке 2 приведено изменение температуры сухой стенки горящего резервуара РВС-10000 (диаметр 28,5 м, высота 18 м) с уровнем взлива бензина 12 метров. Из рисунка видно, что температура достигает своего максимума в течение 3-4 минут после начала горения. По мере удаления от края и приближению к нефтепродукту температура сухой стенки падает, что объясняется меньшим тепловым потоком, приходящимся на нее. При этом распределение температуры по высоте стенки близко к линейному (рис. 3).

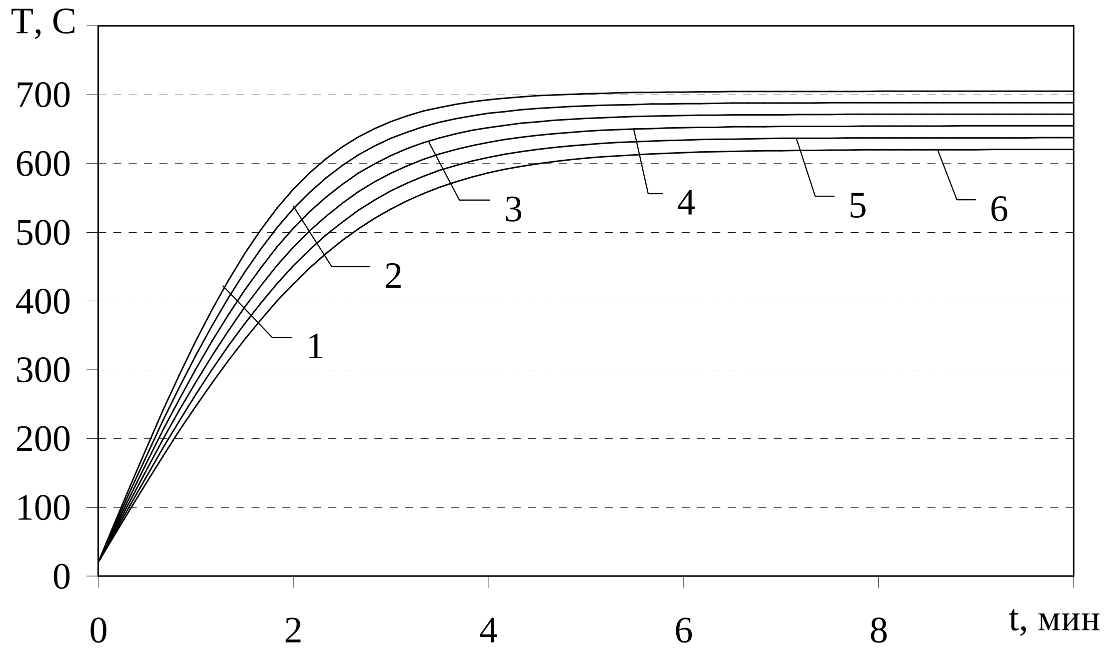

Рисунок 2 – Изменение температуры сухой стенки горящего резервуара с течением времени в точках с различными расстояниями s **от края стенки: 1 –** $s=0$**; 2 –** $s=1$ **м; 3 –** $s=2$ **м; 4 –** $s=3$ **м; 5 –** $s=4$ **м; 6 –** $s=5$ **м**

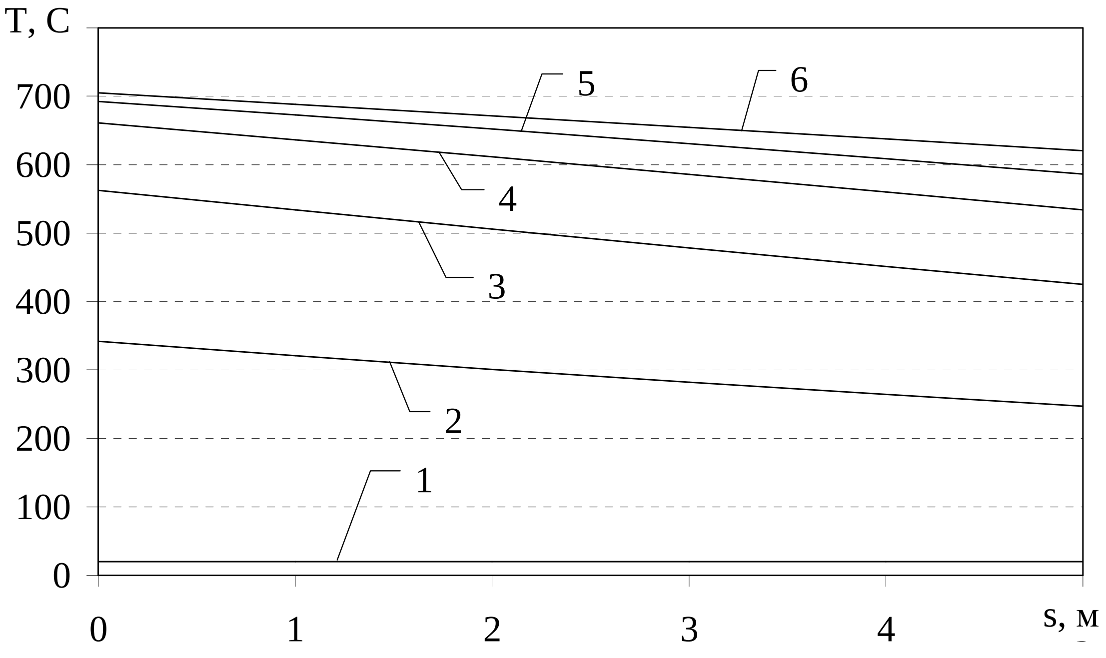

Рисунок 3 – Распределение температуры по сухой стенке горящего резервуара в зависимости от расстояния s **до края стенки в различные моменты времени: 1 –** $t=0$**; 2 –** $t=1$ **мин; 3 –** 2 **мин; 4 –** $t=3$ **мин; 5 –** $t=4$ **мин; 6 –** $t=10$ **мин**

Выводы. Построена математическая модель нагрева сухой стенки горящего резервуара с нефтепродуктом. Особенностью модели является учет лучистого и конвективного теплообмена. Модель позволяет найти распределение температур по высоте стенки в произвольный момент времени. Модель может быть использована для расчета теплового потока от горящего резервуара и для оценки времени огнестойкости сухой стенки.

Перспективы дальнейших исследований связаны с оценкой влияния сухой стенки на высоту факела над резервуаром.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Оценка коэффициента конвективной теплоотдачи резервуара с нефтепродуктом // Науковий вісник будівництва. Збірник наукових праць. – Харків: ХДТУБА, 2005, вип. 31. – С. 206-210.
2. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Тепловые процессы в нагревающемся резервуаре // Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник. – Киев: Техника, 2006, вып. 67. – С. 357-362.
3. Волков О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. – М.: Недра, 1984. – 151 с.
4. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. – М.: Стройиздат, 1990. – 420 с.