УДК 621.3

А.Е. Басманов, канд. техн. наук, докторант, АГЗУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА, СОПРИКАСАЮЩЕЙСЯ С НЕФТЕПРОДУКТОМ

Построена модель нагрева смоченной стенки стального резервуара, учитывающая теплообмен, как излучением, так и конвекцией. Модель предназначена для оценки температурных напряжений между сильно нагретой сухой стенкой и слабо нагретой смоченной стенкой.

Постановка проблемы. Тушение пожаров в резервуарных парках осложняется угрозой каскадного развития пожара. Это связано с тем, что сильное тепловое излучение от факела горящего резервуара приводит к нагреву стальных стенок резервуара и дыхательных конструкций на его крыше. Их нагрев до критической температуры может привести к взрыву резервуара или к горению на дыхательной аппаратуре. Другая угроза состоит в потере прочности нагревшейся конструкции.

Анализ публикаций. В работе [1] предложена модель нагрева сухой части стенки (не соприкасающейся с нефтепродуктом) и крыши резервуара типа РВС. Предполагается, что, как и в [2], пламя горящего резервуара имеет форму конуса. При этом процессы нагрева смоченной стенки (соприкасающейся с нефтепродуктом) остаются нерассмотренными. Невыясненным также является влияние типа залитого нефтепродукта на нагрев резервуара.

Постановка задачи и ее решение. Предполагая, что передача тепла от факела горящего резервуара происходит только излучением, необходимо построить модель нагрева стенки резервуара типа РВС, обращенной к факелу и соприкасающейся с нефтепродуктом.

Согласно закону Стефана-Больцмана, за малый промежуток времени dt стенка получает от факела количество тепла dQ^+:

$$dQ^+ = \varepsilon\varepsilon_ф c_0 \left[\left(\frac{T_ф}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] H^+ dt, \qquad (1)$$

где ε – коэффициент черноты стенки; $\varepsilon_ф$ – коэффициент черноты факела; $T_ф$ – температура факела; T – температура стенки; H^+ – взаимная площадь облучения между стенкой и факелом.

По тому же закону нагретая стенка излучает в окружающее пространство тепло dQ^-:

$$dQ^- = \varepsilon c_0 \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \left(S - H^+ \right) dt, \qquad (2)$$

где T_0 – температура окружающего пространства; S – площадь поверхности стенки. Кроме того, стенка участвует в конвективной теплоотдаче в окружающий воздух и в нефтепродукт (закон Ньютона):

$$dQ_c = \left(\alpha_1 + \alpha_2 \right) \left(T_0 - T \right) S dt, \qquad (3)$$

где α_1 – коэффициент конвективной теплоотдачи в воздух; α_2 – коэффициент конвективной теплоотдачи в нефтепродукт. Здесь мы предполагаем, что нефтепродукт в глубине имеет ту же температуру, что и окружающий воздух – T_0.

Оценить коэффициенты α_1 и α_2 можно, воспользовавшись теорией подобия [3, 4]. В соответствии с ней, решение дифференциального уравнения теплопередачи может быть дано в виде соотношения между критериями подобия.

Критерий свободного движения среды – число Грасгофа: $Gr = \frac{\beta \Delta T L^3 g}{\nu^2}$, где L – характерный линейный размер обтекаемого тела, выбираемый в зависимости от конкретных условий; ν – вязкость жидкости (газа); $\Delta T = |T - T_0|$ – разница температур на обтекаемой поверхности и в среде вдали от этой поверхности; $\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$ – температурный коэффициент объемного расширения; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность среды. Характеризует режим движения при свободной конвекции, являясь отношением подъемной силы, возникающей вследствие разности плотностей среды, и сил вязкости в неизотермическом потоке.

Тепловое число Прандтля: $Pr = \frac{\nu c_p \rho}{\lambda}$, где c_p – теплоемкость при постоянном давлении, λ – коэффициент теплопроводности среды. Характеризует подобие скоростных и температурных полей.

Безразмерный коэффициент теплоотдачи – число Нуссельта:

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha L}{\lambda}. \tag{3}$$

Характеризует увеличение теплообмена за счет конвекции по сравнению с чисто молекулярным переносом.

Опытные данные по теплообмену в условиях естественной конвекции газов и жидкостей на вертикальных и горизонтальных плитах и трубах дают приближенную зависимость для среднего значения числа Нуссельта [4]:

$$\overline{\mathrm{Nu}} = C(\mathrm{Gr}\,\mathrm{Pr})^n\ \overline{\mathrm{Nu}} = C(\mathrm{Gr}\,\mathrm{Pr})^n, \tag{4}$$

где коэффициенты C, n зависят от диапазона значений произведения $\mathrm{Gr}\,\mathrm{Pr}$, определяющего характер движения.

Формула (4) применима для газовых и капельных жидкостей при $\mathrm{Pr} \geq 0{,}7$ и для тел разной формы. За определяющую температуру (при которой вычисляются числа Грасгофа и Прандтля) берется средняя температура обтекаемой поверхности и среды: $T_m = 0{,}5(T + T_0)$. В качестве определяющего размера L для вертикальных труб выбирается их высота.

Известно, что тепловое число Прандтля для газов практически не зависит от температуры и давления, а определяется только атомностью газов. Для одноатомных газов $\mathrm{Pr} \approx 0{,}67$, двухатомных $\mathrm{Pr} \approx 0{,}7$, многоатомных $\mathrm{Pr} \approx 1$.

Оценим число Нуссельта для воздуха, окружающего резервуар. Считая воздух идеальным газом, воспользуемся соотношением $\beta_m = 1/T_m$. Тогда

$$\overline{\mathrm{Nu}} = C\left(\frac{\Delta T L^3 g}{T_m \nu^2}\mathrm{Pr}\right)^n = C\left(\frac{|T - T_0| L^3 g}{\nu^2 (T + T_0)/2}\mathrm{Pr}\right)^n. \tag{5}$$

Выражение в скобках имеет порядок $10^9 L^3$. Это означает, что вдоль стенки будет происходить турбулентное движение воздуха. Такому режиму соответствуют $C = 0{,}135$, $n = 1/3$. Теплопроводность воздуха является функцией температуры и описывается зависимостью:

$$\lambda = \lambda_0 \left(\frac{T_m}{273{,}15} \right)^n, \tag{6}$$

где $\lambda_0 = 2{,}44 \cdot 10^{-2}$ Вт/м·К, $n = 0{,}82$. Объединяя соотношения (3), (5), (6) и подставляя в них $\nu = 1{,}3 \cdot 10^{-5}$ м^2/с, $g = 9{,}8$ м/с^2, $\Pr = 0{,}7$, окончательно получим

$$\alpha_1 = 0{,}0812 (T + T_0)^{0{,}49} |T - T_0|^{1/3}. \tag{7}$$

Воспользуемся теперь выражением (4) для оценки коэффициента теплоотдачи от стенки резервуара в нефтепродукт. Выражение в скобках имеет порядок $\Pr \mathrm{Gr} \approx 10^{10} \Delta T L^3$, что свидетельствует о турбулентном характере движения жидкости вдоль стенки. Объединяя выражения (3), (5) и пренебрегая зависимостью теплопроводности нефтепродукта от температуры (порядка 10% на 100 градусов), получим оценку коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_2 = 0{,}289 \left(\frac{c_н \rho_н \beta_н \lambda_н^2 |T - T_0|}{\nu_н} \right)^{1/3}, \tag{8}$$

где $c_н$, $\rho_н$, $\beta_н$, $\lambda_н$, $\nu_н$ – теплоемкость, плотность, коэффициент температурного расширения, теплопроводность и вязкость нефтепродукта.

Полное количества тепла $dQ = dQ^+ + dQ^- + dQ_C$, получаемое стенкой, идет на ее нагрев на температуру dT: $dQ = m_C c_C dT = \rho_C S \delta c_C dT$, где $m_с$, $\rho_с$, δ – масса, плотность и толщина стальной стенки, $c_с$ – ее теплоемкость. Объединяя соотношения (1)-(3), (7)-(8), получим дифференциальное уравнение для температуры стенки:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\varepsilon c_0}{\rho_C S \delta c_C} \left[\varepsilon_ф H^+ \left(\left(\frac{T_ф}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right) + \left(S - H^+ \right) \left(\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right) \right] +$$

$$+ \left[0{,}0812 (T + T_0)^{0{,}49} + 0{,}289 \left(\frac{c_н \rho_н \beta_н \lambda_н^2}{\nu_н} \right)^{1/3} \right] |T - T_0|^{1/3} \frac{T_0 - T}{\rho_C \delta c_C},$$

с начальным условием $T(0)=T_0$. Очевидно, что первое слагаемое, соответствующее теплообмену излучением, будет всегда неотрицательным, а второе, соответствующее конвективной теплоотдаче, будет неположительным. При этом влияние вида нефтепродукта, содержащегося в резервуаре, будет заключаться в величине $\gamma=\dfrac{c_н\rho_н\beta_н\lambda_н^2}{\nu_н}$. С ростом γ будет увеличиваться коэффициент конвективной теплоотдачи и, следовательно, уменьшаться температура смоченной стенки. Поскольку теплоемкости, плотности, теплопроводности различных нефтепродуктов близки, а вязкость может отличаться на два порядка (от $7\cdot10^{-7}$ для бензинов до $7\cdot10^{-5}$ для топочных мазутов), то определяющее влияние на нагрев смоченной стенки оказывает именно вязкость. Более вязкие жидкости будут приводить к более сильному нагреву стенки (рис. 1).

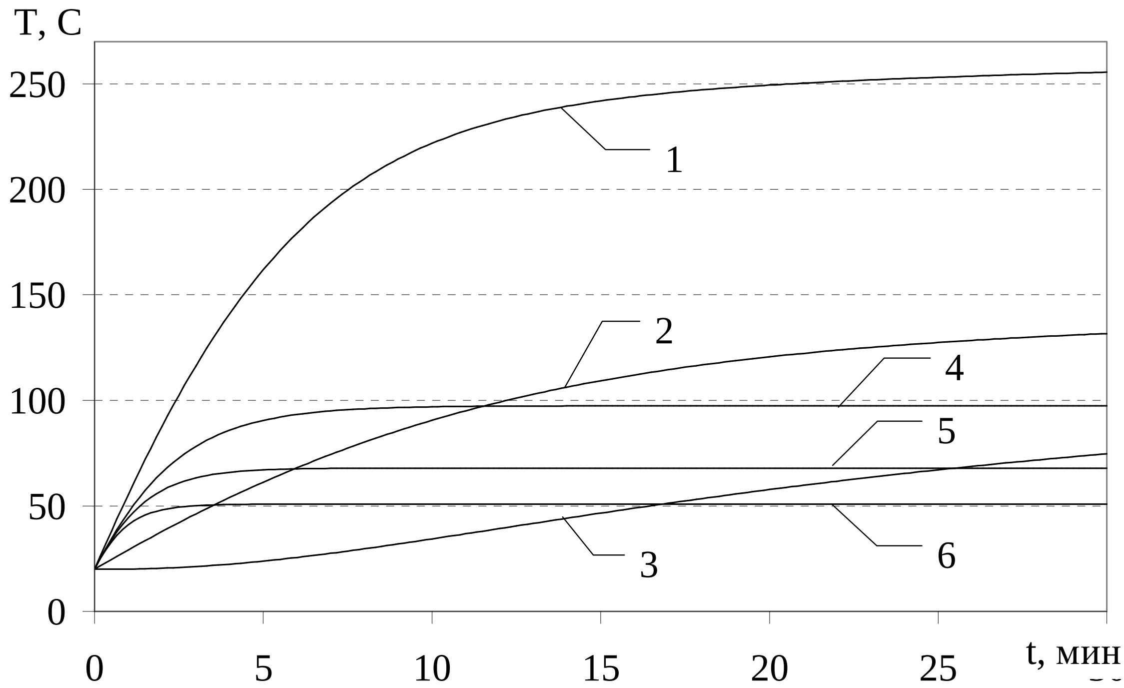

Рисунок 1 – Влияние вида нефтепродукта на температуру стороны резервуара, обращенной в сторону факела: 1 – сухая стенка; 2 – крыша; 3 – паровоздушная смесь; 4 – стенка, смоченная мазутом; 5 – стенка, смоченная нефтью; 6 – стенка, смоченная бензином.

Здесь проиллюстрирована ситуация, когда на расстоянии 30 м от рассматриваемого резервуара РВС-10000 находится такой же горящий резервуар с факелом высотой 48 м в форме конуса, коэффициентом черноты $\varepsilon_ф = 0{,}85$, температурой $T_ф = 1400$ К, коэффициент черноты резервуара $\varepsilon = 0{,}85$, начальная температура резервуара и окружающего воздуха $T_0 = 293$ К. Из рисунка видно, что температура нефтепродукта быстро достигает своего максимума и остается на этом уровне, в то время как температура сухой стенки продолжает расти.

Выводы. Построена математическая модель нагрева стенки резервуара, соприкасающейся с нефтепродуктом. Показано, что температура смоченной стенки быстро достигает своего максимума, после чего рост прекращается. При этом решающее воздействие на максимальную температуру оказывает вязкость жидкости. Резервуар с более вязким нефтепродуктом нагревается сильнее.

Перспективы дальнейших исследований связаны с оценкой прочности стальных конструкций и влияния температурных напряжений между сухой и смоченной стенкой.

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. 55-60.

2. 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.

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

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