

УДК 621.3

*Ю.А. Абрамов, д-р техн. наук, профессор, проректор АГЗУ,
А.Е. Басманов, канд. техн. наук, докторант АГЗУ,
Туркин И.Б., д-р техн. наук, профессор, ХАИ*

НАГРЕВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НЕФТЕПРОДУКТА В РЕЗЕРВУАРЕ ОТ ФАКЕЛА ГОРЯЩЕГО РЕЗЕРВУАРА

Предложена математическая модель для расчета температуры нагрева поверхностного слоя нефтепродукта от соседнего горящего резервуара при пожаре в резервуарном парке. Модель предназначена для определения максимально достижимой температуры нефтепродукта и опасности воспламенения.

Постановка проблемы. Одной из основных опасностей при пожарах в резервуарных парках является нагрев соседних резервуаров с последующим их воспламенением или взрывом. Поэтому анализ тепловых процессов, происходящих в нагреваемом резервуаре, представляет практический интерес. В общем случае это требует знания формы факела пламени горящего резервуара и его температуры, учета теплопередачи излучением в верхней части резервуара, незаполненной нефтепродуктом, теплопроводности стен резервуара, тепломассопереноса внутри нефтепродукта.

Анализ публикаций. В работах [1, 4] был рассмотрен тепловой поток от горящих резервуаров, факелы над которыми имели различную форму (конус, эллипс, цилиндр). В [2] моделировался нагрев стенки резервуара, соприкасающейся с нефтепродуктом. Но при этом не учитывался нагрев поверхностного слоя за счет излучения от нагретой крыши и стенки.

Постановка задачи и ее решение. В предположении, что передача тепла происходит только излучением, необходимо разработать метод расчета температуры поверхностного слоя нефтепродукта в вертикальном стальном резервуаре (РВС).

В процессе нагрева кроме поверхностного слоя также участвуют (рис. 1): часть стенки резервуара, не касающаяся нефтепродукта и обращенная в сторону факела (АВ), стенка с противоположной стороны (СD), крыша резервуара (АС). При этом мы будем рассматривать только теплообмен излучением и пренебрегать теплопроводностью нефтепродукта и паровоздушной смеси внутри резервуара.

Таким образом, в нагреве участвуют, как минимум, 4 объекта. Если же учесть возможный неравномерный нагрев боковой

поверхности резервуара, крыши, нефтепродукта, то может возникнуть необходимость их разбиения на большее число областей.

Поэтому представляется целесообразным рассмотреть нагрев системы тел от факела пожара. Рассмотрим систему серых тел A_1, A_2, \dots, A_n с коэффициентами черноты $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ и взаимными площадями облучения H_{ij} (площадь облучения между телом A_i и A_j , $i \neq j$; $H_{ij} = H_{ji}$) [2].

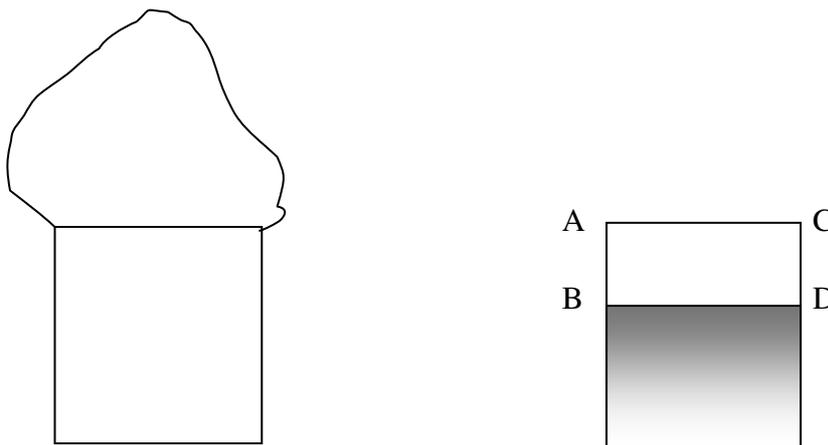


Рисунок 1 – Части резервуара, участвующие в теплообмене излучением: АВ – обращенная в сторону факела стена резервуара; CD – противоположная стена; AC – крыша резервуара; BD – поверхностный слой нефтепродукта.

За малый промежуток времени dt тело A_k получает количество тепла dQ_k :

$$dQ_k = dQ_k^+ + dQ_k^- + \sum_{i \neq k} dQ_{ik}, \quad (1)$$

где dQ_k^+ – количество тепла, приходящее от факела к телу A_k ;

dQ_k^- – количество тепла, излучаемое с поверхности тела A_k в окружающую среду;

dQ_{ik} – количество тепла, приходящее от тела A_i , $i \neq k$.

Согласно [2], количество тепла, полученное телом с температурой T_k от факела температуры T_ϕ за промежуток времени dt , равно

$$dQ_k^+ = \varepsilon_\phi \varepsilon_k c_0 \left(\left(\frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) H_k^+ dt, \quad (2)$$

где ε_ϕ – коэффициент черноты пламени;

ε_k – коэффициент черноты поверхности облучаемого тела;

H_k^+ – взаимная площадь облучения между объектом A_k и факелом;

$$c_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}.$$

Аналогично, количество тепла, приходящее от тела A_i :

$$dQ_{ik} = \varepsilon_i \varepsilon_k c_0 \left(\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) H_{ik} dt. \quad (3)$$

Количество тепла, отдаваемое в окружающую среду:

$$dQ_k^- = \varepsilon_k c_0 \left(\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) \left(S_k - H_k^+ - \sum_{i \neq k} H_{ik} \right) dt, \quad (4)$$

где T_0 – температура окружающей среды.

Объединяя (1)-(4), получим:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_k}{dt} = \varepsilon_k c_0 \left[\varepsilon_\phi H_k^+ \left(\left(\frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \sum_{i \neq k} \varepsilon_i H_{ik} \left(\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \right. \\ \left. + \left(\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) \left(S_k - H_k^+ - \sum_{i \neq k} H_{ik} \right) \right]. \quad (5) \end{aligned}$$

Найдем стационарные температуры тел, т.е. такие, что $\frac{dQ_k}{dt} = 0$,

$k = 1, 2, \dots, n$. Из физических соображений эти температуры являются максимально возможными и достигаются за бесконечное время. Приравнивая к нулю правую часть (5), получим систему уравнений, линейных относительно $\left(\frac{T_k}{100} \right)^4$. Вводя обозначения $u_k = \left(\frac{T_k}{100} \right)^4$,

$u_\phi = \left(\frac{T_\phi}{100}\right)^4$, запишем систему уравнений в виде:

$$u_k \left(\varepsilon_\phi H_k^+ + S_k - H_k^+ - \sum_{i \neq k} H_{ik} + \sum_{i \neq k} \varepsilon_i H_{ik} \right) - \sum_{i \neq k} \varepsilon_i H_{ik} u_i = \\ = \varepsilon_\phi H_k^+ u_\phi + \left(S_k - H_k^+ - \sum_{i \neq k} H_{ik} \right) u_0, k = \overline{1..n}. \quad (6)$$

Применительно к задаче нагрева резервуара, обозначим через A_1 крышу резервуара, A_2 – стенку, обращенную к факелу, A_3 – противоположную стенку, A_4 – поверхность нефтепродукта.

Тогда $H_3^+ = H_4^+ = 0$, т.к. поверхность нефтепродукта и обратная стенка не освещаются факелом пламени. Из геометрических соображений $H_{12} = H_{13} = H_{21} = H_{24} = H_{31} = H_{34} = H_{42} = H_{43}$. Поэтому для решения системы уравнений (6) достаточно найти коэффициенты H_1^+ , H_2^+ , H_{12} , H_{23} , H_{14} .

В качестве примера рассмотрим пожар в резервуарном парке, содержащим вертикальные стальные резервуары. Предположим, что горит резервуар РВС-10000 (диаметр $D = 34,2$ м), и рассмотрим нагрев такого же соседнего резервуара, находящегося на расстоянии 30 метров. При этом будем полагать, что факел имеет форму конуса с высотой $H = 1,4D$, температурой $T_\phi = 1400$ К, коэффициентом черноты $\varepsilon_\phi = 0,8$, коэффициент черноты резервуара $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0,9$, нефтепродукта $\varepsilon_4 = 0,5$. Температуру окружающей среды будем считать равной $T_0 = 300$ К.

График зависимость температуры различных частей резервуара от расстояния h между поверхностью нефтепродукта и крышей резервуара приведен на рисунке 1. Температура боковой поверхности, обращенной к факелу, остается примерно неизменной $T_2 \approx 290^\circ\text{C}$.

Как видно из рисунка, максимально достижимая температура поверхностного слоя нефтепродукта растет почти линейно со снижением его уровня в резервуаре. Это связано с тем, что со снижением уровня поверхность нефтепродукта будет облучаться все большей площадью нагретой передней стенки.

Температура самовоспламенения нефти лежит обычно в интервале $220-300^\circ\text{C}$ (в зависимости от сорта). Поэтому в рассмотренном случае возникает опасность воспламенения нефтепродукта. Кроме того, опасность представляет передняя стенка,

нагревающаяся до 290 °С. С практической точки зрения, это означает необходимость охлаждения резервуара.

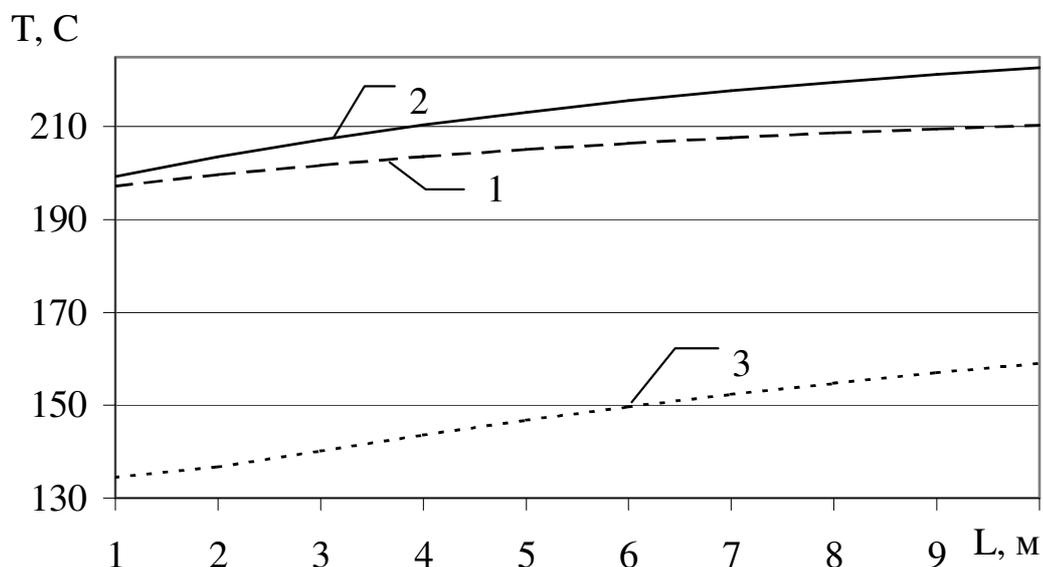


Рисунок 2 – Зависимость температуры крыши резервуара (1), поверхности нефтепродукта (2), и боковой поверхности резервуара, не обращенной к факелу (3), от расстояния между поверхностью нефтепродукта и крышей.

Отметим, что коэффициенты черноты резервуара и нефтепродукта не влияют на найденные максимальные значения температур. Они влияют только на время их достижения.

Выводы. Предложена математическая модель и алгоритм расчета максимально достижимой температуры поверхностного слоя нефтепродукта в вертикальных стальных резервуарах. На примере пожара в резервуарном парке, содержащим РВС-10000, показано, что эта температура может достигать температуры самовоспламенения нефти.

Перспективы дальнейших исследований связаны с оценкой времени, необходимого для достижения температурой нефтепродукта критического значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Басманов А.Е., Говаленков С.В., Горбенко М.О. Влияние случайных факторов на воспламенение соседних резервуаров при пожаре в резервуарном парке. – Харьков: Фолио, 2003. – Вып. 15. – С. 59-64.

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

4. Сознік О.П., Говаленков С.В., Андрієнко В.М. Геометричне моделювання випромінювання полум'я при пожежі нафти в резервуарі. – Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. – Вип. 4, т. 27. – Мелітополь: ТДАТА, 2004. – С. 20-25.