МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА РЕЗЕРВУАРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЖАРА

Д.т.н., проф. Ю.А. Абрамов, к.т.н. А.Е. Басманов

Академия гражданской защиты Украины

Постановка проблемы. Резервуарные парки являются основными сооружениями для хранения нефтепродуктов. Скопление нефтепродуктов на относительно небольшой площади создает повышенную пожарную опасность.

При тушении пожаров в резервуарных парках особую опасность представляют резервуары, расположенные рядом с горящим. Их нагрев может привести к воспламенению паров нефтепродукта на дыхательных клапанах на крыше или к взрыву паров внутри резервуара.

Поэтому, важной практической задачей является определение температуры, до которой может нагреться резервуар при отсутствии охлаждения (т.е. до прибытия пожарных подразделений).

Анализ публикаций. В работах [2, 5] был рассмотрен тепловой поток от горящих резервуаров, факелы над которыми имели различную форму (конус, эллипс, цилиндр). В [1] была построена модель нагрева стенок резервуара и поверхностного слоя нефтепродукта. В ней предполагалось, что под действием излучения от факела пламени равномерно нагреваются: боковая стенка резервуара, обращенная к горящему резервуару, крыша резервуара и поверхностный слой нефтепродукта.

Постановка задачи и ее решение. Как и в [1] будем считать, что передача тепла происходит только излучением. Пренебрегая при этом конвективным теплопереносом внутри резервуара и теплопередачей внутри стальной стенки, оценим распределение температур на стенке, крыше и в поверхностном слое нефтепродукта в вертикальных стальных резервуарах (РВС).

Пусть обогреваемый резервуар находится на расстоянии L от горящего. Выберем начало координат в центре основания негорящего резервуара (рис. 1). Под действием излучения факела стенка, обращенная к нему, нагревается неравномерно – фронтальная часть (ближе к оси OY) нагревается сильнее. Неравномерно будет нагреваться и крыша резервуара, имеющая коническую форму. Несмотря на хорошую теплопроводность стали, температура на поверхности резервуара не выравнивается. Опыт показывает, что для стальных резервуаров, участки, расположенные на расстоянии 30 см друг от друга, можно считать теплоизолированными [3].

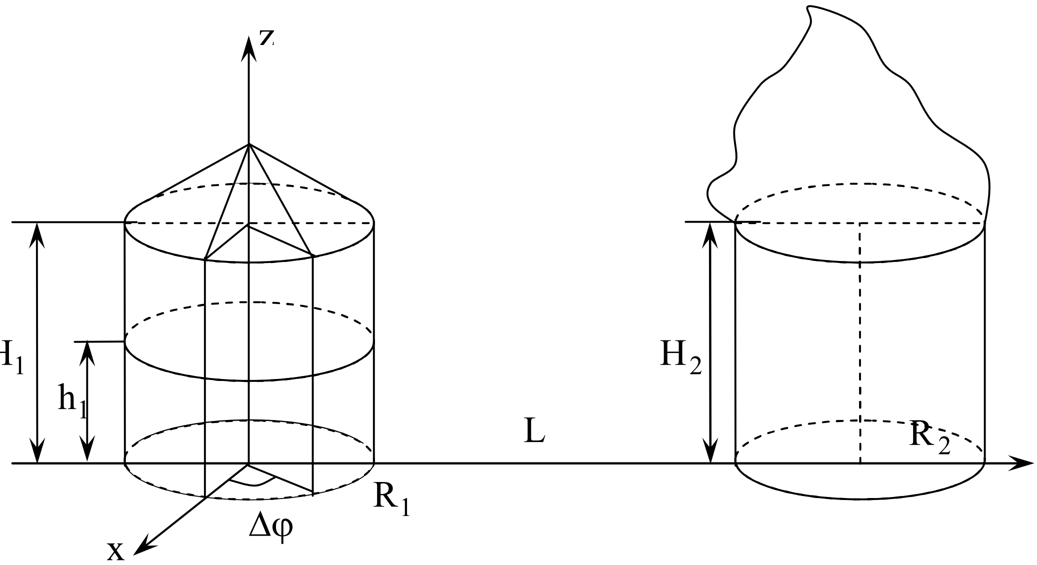

Рисунок 1 – Разбиение нагреваемого резервуара на сегменты.

Чтобы учесть неравномерный нагрев, разобьем резервуар на n сегментов вертикальными секущими плоскостями, проходящими через ось OY так, чтобы они образовывали углы с осью OX равные $0, \Delta\varphi, 2\Delta\varphi, ...$ В этом случае боковая поверхность окажется разбитой на n вертикальных полос с шагом $\Delta\varphi$, поверхность нефтепродукта – на сектора, крыша конуса – на сегменты с тем же шагом $\Delta\varphi$ (рис. 1).

Будем предполагать, что в каждой из $3n$ полученных областей температура остается постоянной, а тепловой поток из области i в область j определяется законом Стефана-Больцмана:

$$\frac{dQ_{ij}}{dt} = c_0 \varepsilon_i \varepsilon_j \left(\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_j}{100} \right)^4 \right) H_{ij}, \qquad (2)$$

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

ε_i, ε_j – коэффициенты черноты областей i, j;

T_i, T_j – температуры областей i, j;

H_{ij} – взаимная площадь облучения между областями [4], определяемая по формуле:

$$H_{ij} = \frac{1}{\pi} \iint\limits_{S_i} \iint\limits_{S_j} \frac{(\vec{r}, \vec{n}_i)(\vec{r}, \vec{n}_j)}{r^4} dS_i dS_j \,, \qquad (3)$$

где интегралы берутся по поверхностям областей S_i и S_j; $\vec{n}_i$, $\vec{n}_j$ – нормальные вектора к поверхностям; $\vec{r}$ расстояние между двумя точками поверхностей (рис. 2); $(\vec{r}, \vec{n}_k)$ – скалярное произведение.

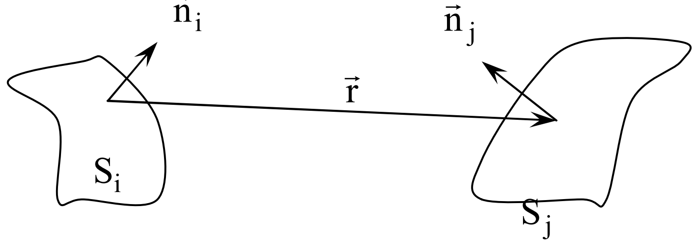

Рисунок 2 – Определение взаимной площади облучения между областями i, j.

В [1] было показано, что количество тепла dQ_k, получаемое областью k за малый промежуток времени dt равно

$$\frac{dQ_k}{dt}=\varepsilon_k c_0\left[\varepsilon_ф H_k^+\left(\left(\frac{T_ф}{100}\right)^4-\left(\frac{T_k}{100}\right)^4\right)+\sum_{i\neq k}\varepsilon_i H_{ik}\left(\left(\frac{T_i}{100}\right)^4-\left(\frac{T_k}{100}\right)^4\right)+\right.$$
$$\left.+\left(\left(\frac{T_0}{100}\right)^4-\left(\frac{T_k}{100}\right)^4\right)\left(S_k-H_k^+-\sum_{i\neq k}H_{ik}\right)\right],\ k=1,2,...,3n, \qquad (4)$$

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.

Таким образом, для определения температуры каждой из областей в момент времени необходимо решить систему дифференциальных уравнений (1) при начальных условиях: $T_k(0)=T_0$.

Практическое значение имеют стационарные температуры, т.е. такие, при которых $\frac{dQ_k}{dt}=0$. Они являются максимально возможными и достигаются за бесконечное время. Их можно найти из системы линейных уравнений [1]:

$$u_k\left(\varepsilon_ф H_k^+ + S_k - H_k^+ - \sum_{i\neq k}H_{ik}+\sum_{i\neq k}\varepsilon_i H_{ik}\right)-\sum_{i\neq k}\varepsilon_i H_{ik}u_i=$$
$$=\varepsilon_ф H_k^+ u_ф+\left(S_k-H_k^+-\sum_{i\neq k}H_{ik}\right)u_0,\ k=\overline{1..3n}, \qquad (5)$$

где $u_k=\left(\frac{T_k}{100}\right)^4$, $u_ф=\left(\frac{T_ф}{100}\right)^4$.

Увеличение количества областей разбиения, с одной стороны, повышает точность модели, а, с другой стороны, увеличивает объем вычислений. Рассмотрим, как влияет число сегментов n на получаемое распределение температур. Пусть горит резервуар РВС-10000 (радиусом $R_2 = 17{,}1$ м, высотой $H_2 = 11{,}92$ м), содержащий бензин. На расстоянии $L = 30$ м от него находится резервуар того же типа (рис. 1). Будем полагать, что факел имеет форму конуса с высотой $2{,}8R_2$ [4] и среднюю температуру пламени 1200 ºC. На рис. 3 приведено распределение температуры боковой стенки для пустого резервуара, где по горизонтальной оси отложен угол в градусах.

Из рисунка видно, что на противоположной факелу стенке резервуара распределение температуры практически не зависит от количества сегментов n. На передней же стенке при малых значениях n модель оказывается слишком грубой. Достаточная точность достигается при $n = 16$ и $n = 32$. Это свидетельствует об очень неравномерном нагреве передней стенки.

Из рисунка видно также, что передняя стенка нагревается выше температуры самовоспламенения бензина, лежащей, в зависимости от сорта, в интервале от 270 до 440 ºC. Если при этом концентрация паров в резервуаре окажется в концентрационных пределах воспламенения (например, после слива нефтепродукта), то стенка окажется источником зажигания, приводящим к взрыву.

На рисунке 4 приведена зависимость температуры крыши резервуара. Из него видно, что часть крыши, обращенная к факелу, достигает температуры самовоспламенения, что может привести к горению на дыхательной аппаратуре.

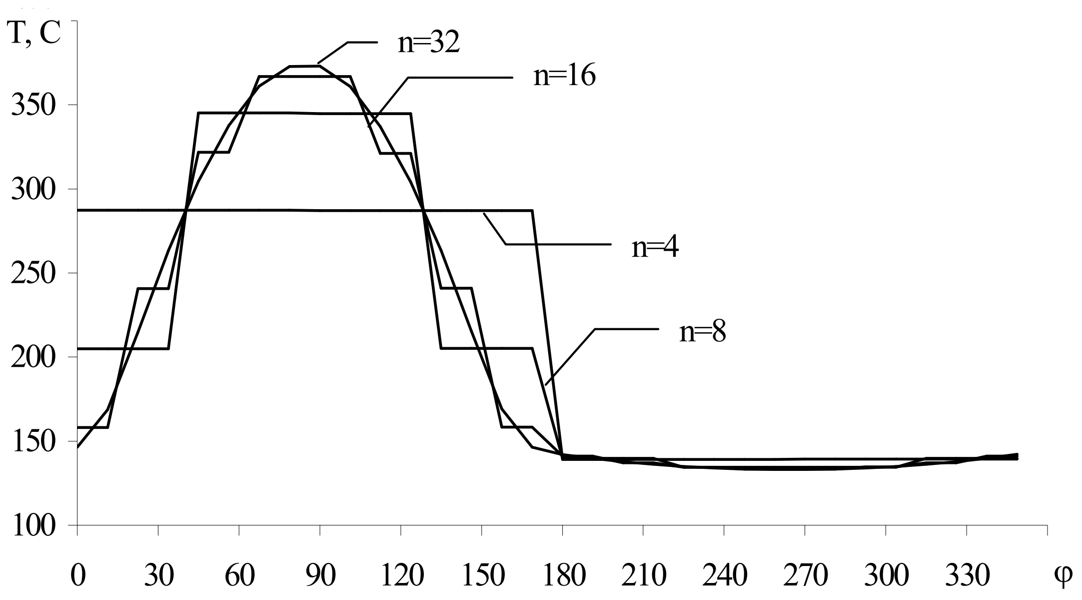

Рисунок 3 – Зависимость температуры стенки резервуара от угла для различного числа сегментов разбиения n**.**

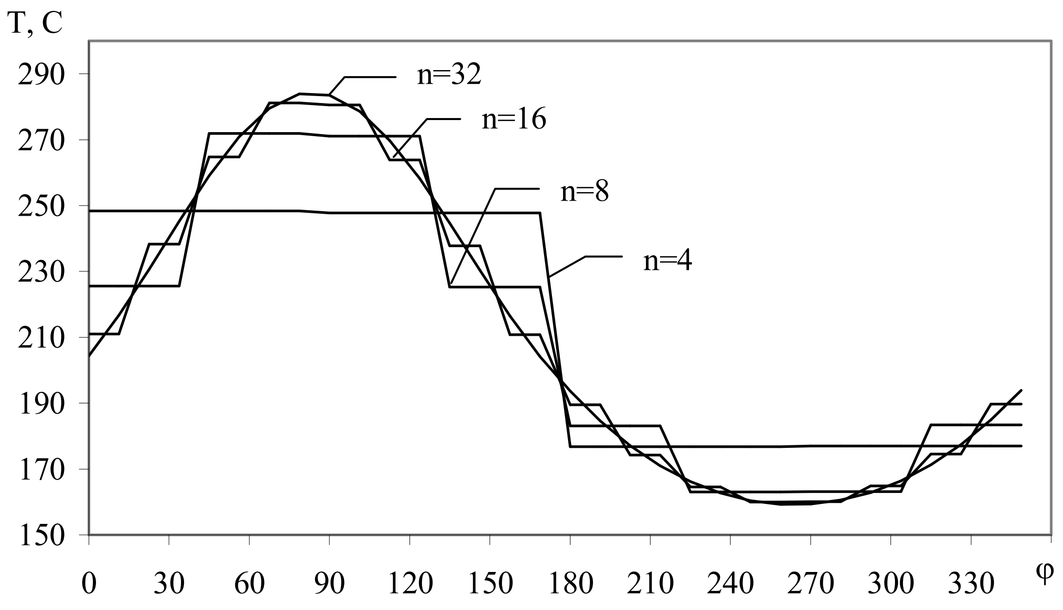

Рисунок 4 – Зависимость температуры крыши резервуара от угла для различного числа сегментов разбиения n**.**

Анализ рисунков показывает, что рассмотрение только двух частей резервуара – обращенной к факелу и обратной – дает слишком усредненные значения температур нагрева. Например, при $n = 4$ (рис. 4) может показаться, что температура самовоспламенения в 270 ºС не достигается, и горение паров на дыхательной аппаратуре невозможно. Однако, при более подробном разбиении ($n \geq 8$) можно увидеть, что необходимая температура может быть достигнута.

Выводы. Построена математическая модель нагрева резервуара с нефтепродуктом, состоящая в его разбиении на сегменты. На примере показано, что крыша резервуара и стенка, обращенная к факелу, нагреваются неравномерно. Для оценки пожарной опасности недостаточно рассматривать только переднюю и заднюю часть стенки – необходимо разбиение на большее число частей.

Дальнейшие перспективы исследований связаны с определением времени, необходимого для достижения опасных температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Нагрев поверхностного слоя нефтепродукта в резервуаре от факела горящего резервуара. – Харьков: Фолио, 2004. – Вып. 16. – С.
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. Волков О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. – М.: Недра, 1984. – 151 с.
4. Рябова І.Б., Сайгук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. – Харків: АПБУ, 2002. – 352 с.
5. 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.