

ТЕПЛООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В РЕЗЕРВУАРЕ С НЕФТЕПРОДУКТОМ

Ю.А. Абрамов, Академия гражданской защиты Украины
А.Е. Басманов, Академия гражданской защиты Украины

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. Это существенно осложняет действия пожарных подразделений. Поэтому, важной практической задачей является определение температуры, до которой может нагреться резервуар при отсутствии охлаждения (до прибытия пожарных подразделений). Для ее определения необходимо рассчитать теплообмен излучением и конвективный теплообмен.

Количество тепла, передаваемого за малое время dt от тела 1 к телу 2 путем излучения, определяется законом Стефана-Больцмана:

$$dQ_{12} = c_0 \varepsilon_{\text{пр}} \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) H_{12} dt,$$

где $c_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент черноты системы двух тел; T_1 , T_2 – температуры тел; H_{12} – площадь их взаимного облучения.

Передача тепла от факела к соседнему резервуару осуществляется путем теплопередачи. Ввиду малой теплопроводности воздуха, тепловой поток за счет теплопроводности на несколько порядков ниже теплового потока излучения. Конвекция также не оказывает существенного влияния, поскольку горячий воздух и продукты горения поднимаются вверх.

Иная ситуация в нагреваемом резервуаре. Горячая стенка отдает тепло как излучением (к противоположной стенке и в окружающую среду), так и конвекцией (в паровоздушную смесь внутри резервуара и в окружающий воздух). Количество тепла, отдаваемое стенкой в газовую среду, определяется законом Ньютона:

$$dQ = \alpha \Delta T S dt,$$

где α – коэффициент конвективного теплообмена; ΔT – разность между температурами стенки и среды; S – площадь стенки.

Основная сложность при использовании закона Ньютона состоит в том, что коэффициент конвективного теплообмена α не является физической характеристикой тела. Он зависит от множества факторов: формы и размеров тела, температуры, давления, скорости движения среды и др. и, как правило, определяется опытным путем.

Для его оценки коэффициента α воспользуемся теорией подобия. 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:

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

где $Gr = \frac{\beta \Delta T L^3 g}{\nu^2}$, $Pr = \frac{\nu c_p \rho}{\lambda}$ – числа Грасгофа и Прандтля соответственно,

вычисленные для паровоздушной смеси или окружающего воздуха в зависимости от того, рассматривается теплопередача в газовое пространство резервуара или в окружающее пространство; β – температурный коэффициент объемного расширения; ΔT – разность температур на обтекаемой поверхности и в среде вдали от нее; L – характерный линейный размер обтекаемой поверхности; g – ускорение свободно падения; ρ – плотность среды; ν – кинематическая вязкость; c_p – теплоемкость среды при постоянном давлении; λ – коэффициент теплопроводности среды; C , n – константы. Анализ выражения для числа Нуссельта указывает на турбулентный характер движения газовой среды вдоль стенки и крыши резервуара. В этом случае константы принимают значения $C = 0,135$, $n = 1/3$.

Тогда коэффициент теплоотдачи примет вид:

$$\overline{\alpha} = \frac{\overline{Nu} \lambda}{L} = 0,135 \lambda \left(\frac{\Delta T g Pr}{T \nu^2} \right)^{1/3}.$$

Известно, что число Прандтля для двухатомных газов, из которых состоит воздух, равно 0,7, а для многоатомных (паров нефтепродукта) – близко к 1. С учетом этого, расчет коэффициента конвективной теплоотдачи от стенки резервуара дает значения, в основном, от 5 до 15 Вт/м²К в зависимости от температуры стенки и среды.

Объединений уравнений для передачи тепла конвекцией и излучением дает систему дифференциальных уравнений, описывающих нагрев резервуара с нефтепродуктом. Ее решение позволяет найти температуру стенок резервуара и ответить на вопрос о необходимости охлаждения данного резервуара.