

УДК 621.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ РЕЗЕРВУАРА С НЕФТЕПРОДУКТОМ, НАГРЕВАЮЩЕГОСЯ ВО ВРЕМЯ ПОЖАРА

Абрамов Ю.А., Басманов А.Е.

Постановка проблемы. Резервуарные парки являются основным местом хранения нефти и нефтепродуктов. Скопление горючих и легковоспламеняющихся жидкостей на небольшой территории в случае возгорания создает опасность каскадного распространения пожара. Важной задачей пожарных подразделений является охлаждение соседних резервуаров, производимое с помощью лафетных стволов или стволов типа А. При недостатке сил и средств, испытываемом при начале пожара важно оценить возможности имеющихся сил и средств и выбрать первостепенные задачи.

Анализ публикаций. В работе [1, с. 131] была построена модель нагрева резервуара с нефтепродуктом. Модель учитывает как теплопередачу излучением, так и конвективную теплопередачу. В [2, с. 207] построена оценка конвективной теплоотдачи от стенки или крыши резервуара в газовое пространство резервуара и окружающий воздух. В [3, с. 191] приведены рекомендации о необходимом количестве стволов для охлаждения резервуара. При этом остается нерешенным вопрос о поведении резервуара, если для охлаждения будет задействовано меньшее количество стволов.

Постановка задачи и ее решение. Определим температуру сухой стенки резервуара (не соприкасающейся с нефтепродуктом), нагреваемой от факела другого горящего резервуара и охлаждаемой водой.

Для того чтобы учесть неравномерный нагрев резервуара с нефтепродуктом от факела пожара, в [1, с. 131] резервуар разбивался вертикальными секущими плоскостями, проходящими через ось z , на n одинаковых сегментов. Тем самым задача сводится к рассмотрению температуры $3n$ областей (по 3 области для каждого сегмента: сектор поверхности нефтепродукта, полоса боковой стенки, сегмент крыши). В пределах каждой области температура предполагается одинаковой.

Количество тепла dQ_k , получаемое областью k за малый промежуток времени dt , согласно [1, с. 132], есть

$$dQ_k = \varepsilon_k c_0 \left[\varepsilon_\Phi H_k^+ \left(\left(\frac{T_\Phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \sum_{i \neq k} \varepsilon_i H_{ik} \left(\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) \right] +$$

$$+ \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right] \left(\tilde{S}_k - H_k^+ - \sum_{i \neq k} H_{ik} \right) dt + \\ + \alpha_{\Gamma} (T_{\Gamma} - T_k) S_k dt + \alpha_{\text{В}} (T_0 - T_k) (\tilde{S}_k - S_k) dt, \quad k = 1, 2, \dots, 3n, \quad (1)$$

где $c_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$; ε_k – чернота области k ; $\varepsilon_{\text{ф}}$ – чернота факела; H_k^+ – взаимная площадь облучения между областью k и факелом; H_{ik} – площадь взаимного облучения между областями i и k ; $T_{\text{ф}}$ – температура факела; T_k – температура области k ; T_0 – температура окружающей среды; S_k – полная площадь поверхности области (например, для стенки это внутренняя поверхность и внешняя); \tilde{S}_k – площадь односторонней поверхности области; α_{Γ} , $\alpha_{\text{В}}$ – коэффициенты конвективной теплоотдачи в газовое пространство резервуара и окружающий воздух.

Рассмотрим воздействие водяной струи на стенку резервуара. При ударе воды о стенку часть воды отскакивает, другая стекает вниз, охлаждая стенку резервуара. С точки зрения модели (1) это означает, что в месте контакта воды со стенкой изменяется коэффициент теплоотдачи стенки во внешнюю среду. Приближенно будем полагать, что стекающая по стенке вода образует полосу шириной $a_{\text{ох}}$. Если высота резервуара H , а уровень налива нефтепродукта h , то охлаждение стенки происходит на полосе площадью $S_{\text{ох}} = (H - h)a_{\text{ох}}$. В соответствии с требованиями [3, с. 191], резервуар охлаждается вдоль полупериметра, обращенного к факелу. Тогда общая площадь боковой поверхности, не соприкасающаяся с нефтепродуктом и подлежащая охлаждению, равна $S = \pi(H - h)d/2$, где d – диаметр резервуара.

Поскольку $S > S_{\text{ох}}$, то полоса охлаждения перемещается по стенке резервуара, и в момент времени t часть поверхности S_{k1} сегмента k окажется охлаждаемой водой, а другая $S_{k2}(t)$ – нет. В первом случае количество тепла, отдаваемое стенкой в воду, будет составлять

$$dQ_k^{\text{охл}} = \alpha_{\text{охл}} (T_{\text{охл}} - T_k) S_{k1} dt, \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{охл}}$ – коэффициент теплоотдачи от стенки к воде; $T_{\text{охл}}$ – температура воды. Таким образом, задача сводится к оценке коэффициента теплоотдачи от стенки в воду. Воспользуемся теорией подобия: характер движения воды по стенке определяется числами Рейнольдса $Re = wL/\nu_f$ и Прандтля $Pr = \nu_f \rho c_p / \lambda_f$. Здесь w – скорость движения воды по стенке, м/с; $L = H - h$ – характерный размер – длина полосы охлаждения, м; ν_f – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$, взятая при температуре внутри водяного

потока; ρ – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$, c_p – теплоемкость воды, $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$; λ_f – теплопроводность воды, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$. Подстановка числовых значений дает число Рейнольдса порядка 10^6 , что говорит о турбулентном характере движения воды по стенке [4, с. 488]. В этом случае зависимость числа Нуссельта Nu от чисел Рейнольдса и Прандтля принимает вид [4, с. 488]:

$$Nu = 0,0364 Re^{0,8} Pr^{0,4} \varepsilon_t,$$

где $Nu = \alpha_{\text{охл}} L / \lambda_f$; ε_t – поправочный множитель, учитывающий направление теплового потока: $\varepsilon_t = (v_f / v_w)^{0,11}$, где v_w – кинематическая вязкость воды, взятая при температуре стенки. Тогда выражение для коэффициента конвективной теплоотдачи примет вид

$$\alpha = 0,0364 \frac{w^{0,8} \rho^{0,4} c_p^{0,4} \lambda_f^{0,6}}{v_f^{0,4} (H-h)^{0,2}} \left(\frac{v_f}{v_w} \right)^{0,11}. \quad (4)$$

Будем предполагать, что после удара о стенку вода имеет нулевую начальную скорость, и течение осуществляется под действием силы тяжести с ускорением g . Тогда ее средняя скорость составит:

$$w = \frac{1}{t} \int_0^t g t dt = \sqrt{\frac{g(H-h)}{2}}. \quad (5)$$

Объединяя (4) и (5), окончательно получим оценку:

$$\alpha = 0,0687 \frac{(H-h)^{0,2} \rho^{0,4} c_p^{0,4} \lambda_f^{0,6}}{v_f^{0,4}} \left(\frac{v_f}{v_w} \right)^{0,11}. \quad (6)$$

Последний множитель в (6) содержит v_w – вязкость воды, взятую при температуре стенки. С повышением температуры вязкость уменьшается с $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при 20°C до $3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ при 100°C . Выражение (6) также зависит от высоты сухой стенки $H-h$. Однако сильнее всего нагревается верхняя часть стенки, т.к. она расположена ближе к факелу пожара. Лучшее охлаждение нижней части стенки не оказывает существенного влияния на верхнюю ее часть. Поэтому в (6) можно полагать $(H-h)^{0,2} \approx 1$. Учитывая вышесказанное, (6) дает оценку теплоотдачи от стенки в воду $\alpha \approx 5500 \div 6300 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{К}$ в зависимости от

температуры стенки. Указанная зависимость близка к линейной и для практических расчетов может быть аппроксимирована выражением $\alpha = 9,7T + 5357$, где T – температура стенки, выраженная в градусах Цельсия.

Выводы. Построена модель охлаждения резервуара с нефтепродуктом, нагревающегося от факела горящего резервуара. Модель позволяет найти распределение температуры вдоль сухой стенки резервуара в произвольный момент времени. С практической точки зрения это означает возможность определить влияние охлаждения на резервуар, и оценить время достижения стенкой взрывоопасной температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Влияние пожара на резервуар с нефтепродуктом. – Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Сб. научных трудов. – Харьков, 2005. – Вып. 29. – С. 131-133.
2. 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.
3. Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.
4. Теплотехника / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; Под. Ред. В.Н. Луканина. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2002. – 671 с.