УДК 621.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ НАГРЕВАЮЩЕГОСЯ РЕЗЕРВУАРА С НЕФТЕПРОДУКТОМ

Ю.А. Абрамов, д.т.н., профессор ХНАДУ, А.Е. Басманов, к.т.н., докторант Академии гражданской защиты Украины

Аннотация. *Построена математическая модель охлаждения резервуара с нефтепродуктом водой. Модель позволяет оценить достаточность охлаждения и определить время достижения взрывоопасной температуры.*

Ключевые слова: *вертикальный стальной резервуар, резервуарный парк, теплопередача излучением, конвективная теплопередача.*

Введение

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

Цель и постановка задачи

Цель работы – определить температуру сухой стенки резервуара (не соприкасающейся с нефтепродуктом), нагревающейся от факела другого горящего резервуара и охлаждаемой водой.

Достижение указанной цели требует решения следующих задач: построение модели нагрева резервуара от факела пожара; учет передачи тепла от нагревшейся стенки к воде.

Математическая модель нагрева резервуара

Пусть на расстоянии L от горящего резервуара находится резервуар с нефтепродуктом (рис. 1). Для того чтобы учесть неравномерный нагрев резервуара, разобьем его вертикальными секущими плоскостями, проходящими через ось z, на n одинаковых сегментов. Тем самым мы получим $3n$ областей (по 3 области для каждого сегмента: сектор поверхности нефтепродукта, полоса боковой стенки, сегмент крыши).

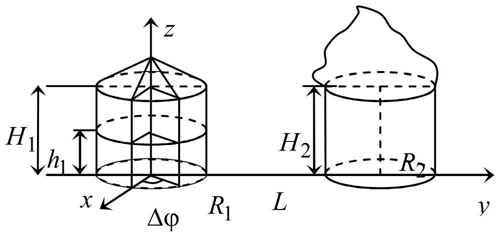

Рис. 1. Горящий резервуар (справа) и нагревающийся от него (слева), h_1 – уровень нефтепродукта

В пределах одной области будем считать температуру одинаковой. Количество тепла dQ_k, получаемое областью k за малый промежуток времени dt, согласно [1], есть

$$dQ_k = \varepsilon_k c_0 \left[\varepsilon_\phi H_k^+ \left(\left(\frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \right.$$

$$+ \sum_{i \neq k} \varepsilon_i H_{ik} \left(\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) +$$

$$+\left(\left(\frac{T_0}{100}\right)^4-\left(\frac{T_k}{100}\right)^4\right)\left(\widetilde{S}_k-H_k^+-\sum_{i\neq k}H_{ik}\right)\Bigg]dt+$$
$$+\alpha_г(T_г-T_k)S_k\,dt+\alpha_в(T_0-T_k)(\widetilde{S}_k-S_k)dt\,,$$
$$k=1,2,...,3n\,, \qquad (1)$$

где $c_0=5{,}67\;Вт/м^2К^4$; ε_k – чернота области k ; $\varepsilon_ф$ – чернота факела; H_k^+ – взаимная площадь облучения между областью k и факелом; H_{ik} – площадь взаимного облучения между областями i и k ; $T_ф$ – 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); $\widetilde{S}_k$ – площадь односторонней поверхности области; $\alpha_г$, $\alpha_в$ – коэффициенты конвективной теплоотдачи в газовое пространство резервуара и окружающий воздух.

Рассмотрим теперь воздействие водяной струи на стенку резервуара. Мы будем рассматривать верхнюю часть стенки, не соприкасающуюся с нефтепродуктом, поскольку именно ее нагрев может привести к взрыву паровоздушной смеси внутри резервуара.

При ударе воды о стенку часть воды отскакивает, другая стекает вниз, охлаждая стенку резервуара. С точки зрения построенной модели 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 $a_{ох}$. Если высота резервуара H , а уровень налива нефтепродукта h , то охлаждение стенки происходит на полосе площадью $S_{ох}=(H-h)a_{ох}$. Согласно требований [3, 4], 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 $S>S_{ох}$, 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

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

где $\alpha_{охл}$ – коэффициент теплоотдачи от стенки к воде; $T_{охл}$ – температура воды.

Во втором случае, как и ранее,

$$dQ_k^0=\alpha_в(T_0-T_k)S_{k2}dt\,. \qquad (3)$$

С учетом (2) и (3) система уравнений (1) примет вид

$$dQ_k=\varepsilon_k c_0\Bigg[\varepsilon_ф H_k^+\left(\left(\frac{T_ф}{100}\right)^4-\left(\frac{T_k}{100}\right)^4\right)+$$
$$+\sum_{i\neq k}\varepsilon_i H_{ik}\left(\left(\frac{T_i}{100}\right)^4-\left(\frac{T_k}{100}\right)^4\right)+$$
$$+\left(\left(\frac{T_0}{100}\right)^4-\left(\frac{T_k}{100}\right)^4\right)\left(\widetilde{S}_k-H_k^+-\sum_{i\neq k}H_{ik}\right)\Bigg]dt+$$
$$+\alpha_г(T_г-T_k)S_k\,dt+\alpha_{охл}(T_{охл}-T_k)S_{k1}dt+$$
$$+\alpha_в(T_0-T_k)S_{k2}dt\,,\; k=1,2,...,3n\,. \qquad (4)$$

Для оценки коэффициента теплоотдачи от стенки в воду воспользуемся теорией подобия. Характер движения воды по стенке определяется числом Рейнольдса:

$$Re=wL/\nu_f\,, \qquad (5)$$

где w – скорость движения воды по стенке, $м/с$; $L=H-h$ – характерный размер – длина полосы охлаждения, $м$; ν_f – кинематическая вязкость, $м^2/с$, взятая при температуре внутри водяного потока.

Критерий теплового подобия (число Прандтля):

$$Pr=\nu_f\rho c_p/\lambda_f\,, \qquad (6)$$

где ρ – плотность воды, $кг/м^3$, c_p – теплоемкость воды, $Дж/кг\cdot К$; λ_f – теплопроводность воды, $Вт/м\cdot К$.

Подстановка числовых значений в (5) дает значение порядка 10^6 , что говорит о турбулентном характере движения воды по стенке [5]. В этом случае зависимость числа Нуссельта Nu от чисел Рейнольдса и Прандтля принимает вид [5]:

$$Nu=0{,}0364\,Re^{0,8}\,Pr^{0,4}\,\varepsilon_t\,, \qquad (7)$$

где $Nu=\alpha_{охл}L/\lambda_f$; ε_t – поправочный множитель, учитывающий направление теплового потока. При нагревании жидкости

$$\varepsilon_t = \left(\nu_f / \nu_w\right)^{0,11}, \qquad (8)$$

где ν_w – кинематическая вязкость воды, взятая при температуре стенки. Объединяя (5)-(8), получим выражение для коэффициента конвективной теплоотдачи:

$$\alpha = 0{,}0364 \frac{w^{0,8}\rho^{0,4}c_p^{0,4}\lambda_f^{0,6}}{\nu_f^{0,4}(H-h)^{0,2}}\left(\frac{\nu_f}{\nu_w}\right)^{0,11}. \qquad (9)$$

Оценим среднюю скорость течения w воды по стенке резервуара. Будем предполагать, что после удара о стенку она имеет нулевую начальную скорость, и течение осуществляется под действием силы тяжести с ускорением g. Отметим, что непосредственно вблизи стенки скорость будет меньше ввиду трения, но остальной поток будет находиться почти в свободном падении. Тогда на прохождение участка длиной $H-h$ будет затрачено время

$$t = \sqrt{\frac{2(H-h)}{g}}. \qquad (10)$$

Средняя скорость воды составит:

$$w = \frac{1}{t}\int_0^t gtdt = \sqrt{\frac{g(H-h)}{2}}. \qquad (11)$$

Объединяя (9) и (11), окончательно получим оценку:

$$\alpha = 0{,}0687 \frac{(H-h)^{0,2}\rho^{0,4}c_p^{0,4}\lambda_f^{0,6}}{\nu_f^{0,4}}\left(\frac{\nu_f}{\nu_w}\right)^{0,11}. \qquad (12)$$

Последний множитель в (12) содержит ν_w – вязкость воды, взятую при температуре стенки. С повышением температуры вязкость уменьшается от 10^{-6} $м^2/с$ при 20ºС до $3\cdot 10^{-7}$ $м^2/с$ при 100ºС. Выражение (12) 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. Опыт показывает [3], что участки, расположенные на расстоянии 30 см, можно считать теплоизолированными. Поэтому в (12) можно полагать $(H-h)^{0,2} \approx 1$. Учитывая вышесказанное, (12) дает оценку теплоотдачи от стенки в воду $\alpha \approx 5500 \div 6300$ $Вт/м^2К$ в зависимости от температуры стенки (рис. 2). Зависимость близка к линейной и для практических расчетов может быть аппроксимирована выражением $\alpha = 9{,}7T + 5357$, где T – температура стенки, выраженная в градусах Цельсия.

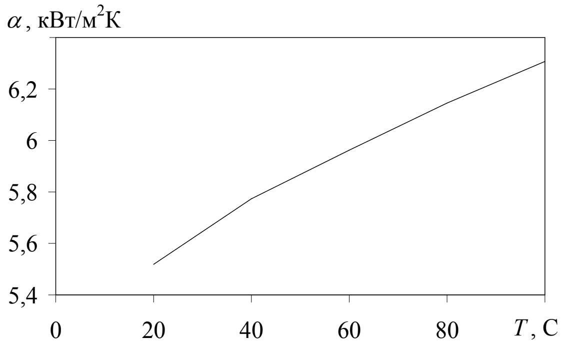

Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры стенки резервуара

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. Волков О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. – М.: Недра, 1984. – 151 с.
4. Иванников В.П., Клюс П.П. Справочник руководителя тушения пожара. – М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.
5. 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.

Рецензент: О.П. Алексеев, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 24 октября 2005 г.