ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗЕРВУАРА

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

Академия гражданской защиты Украины

Постановка проблемы. Тушение пожара в резервуарном парке осложняется угрозой воспламенения и взрыва резервуаров с нефтепродуктами, соседними с горящим. Это вызвано нагревом стенок соседних резервуаров. Поэтому важной задачей является моделирование нагрева резервуара с нефтепродуктом от пламени горящего резервуара. Решение такой задачи позволило бы оценить критическое время, через которое соседний резервуар нуждается в охлаждении.

Анализ публикаций. В работе [1] построена математическая модель нагрева резервуара от факела соседнего горящего резервуара, учитывающая теплопередачу как излучением, так и конвекцией. Модель позволяет найти распределение температуры вдоль стенки резервуара, температуру паровоздушной смеси и нефтепродукта. Это распределение определяется путем решения системы дифференциальных уравнений, содержащих ряд параметров. Некоторые параметры являются справочными и могут быть легко определены из литературы: плотность стали, теплоемкость стали, воздуха, нефтепродукта и т.д. Другие, например, коэффициент конвективной теплоотдачи, является функцией большого числа различных факторов (формы и размеров тела, давления и температуры среды) [3] и, практически, может быть определен только экспериментально.

Цель работы. Пусть имеются наблюдения температуры T_k, $k = 1,2,...,m$, произведенные, возможно, в разные моменты времени и в разных точках резервуара. Необходимо построить оценки $\hat{p}_1, \hat{p}_2,..., \hat{p}_n$ неизвестных параметров $p_1, p_2,..., p_n$ модели.

Основная часть. Будем говорить, что наблюдение T_k проведено в точке

x_k, понимая под x_k точку фазового пространства, описывающего как пространственные координаты точки, в которой измерялась температура, так и время измерения.

Достаточно очевидным выглядит непосредственное применение метода наименьших квадратов:

$$\sum_{k=1}^{m}\left(T\left(x_k, p_1, \ldots p_n\right) - T_k\right)^2 \to \min_{p_1, p_2, \ldots p_n},$$

где $T\left(x_k, p_1, p_2, \ldots p_n\right)$ – значение температуры найденное по модели [1] путем решения системы дифференциальных уравнений. Однако такой подход связан с рядом сложностей. Так, например, вычисление градиента возможно только численно. Функция цели не является, вообще говоря, выпуклой, и, как следствие, минимум, найденный каким-либо градиентным методом, может не быть глобальным.

Для каждого из наблюдений T_k построим линейную модель зависимости температуры от неизвестных параметров p_i:

$$\hat{T}_k = \sum_{i=1}^{n} a_{ki} p_i, \tag{1}$$

где a_{ki} – неизвестные пока коэффициенты. В матричном виде модель может быть записана:

$$T = Ap + \varepsilon, \tag{2}$$

где $T = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \ldots \\ T_m \end{pmatrix}$, $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \ldots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \ldots & a_{2n} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{m1} & a_{m2} & \ldots & a_{mn} \end{pmatrix}$, $p = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \ldots \\ p_n \end{pmatrix}$.

Зависимость температуры от таких параметров как теплоемкость, теплопроводность, коэффициент черноты и коэффициент конвективной теплопередачи будем аппроксимировать линейным выражением вида (1).

Неизвестные коэффициенты a_{ki} можно оценить, проведя q вычислительных экспериментов при различных наборах параметров и применив метод наименьших квадратов. Обозначим через $p_j^{(i)}$ значение j-го параметра в i-ом вычислительном эксперименте; $\tilde{T}_k^{(i)}$ –результат вычислительного эксперимента в точке x_k для набора параметров $p_1^{(i)}, p_2^{(i)},\ldots,p_n^{(i)}$. Введем следующие матрицы:

$$P=\begin{pmatrix} p_1^{(1)} & p_2^{(1)} & \ldots & p_n^{(1)} \\ p_1^{(2)} & p_2^{(2)} & \ldots & p_n^{(2)} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ p_1^{(q)} & p_2^{(q)} & \ldots & p_n^{(q)} \end{pmatrix},\ \tilde{T}=\begin{pmatrix} \tilde{T}_1^{(1)} & \tilde{T}_2^{(1)} & \ldots & \tilde{T}_m^{(1)} \\ \tilde{T}_1^{(2)} & \tilde{T}_2^{(2)} & \ldots & \tilde{T}_m^{(2)} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \tilde{T}_1^{(q)} & \tilde{T}_2^{(q)} & \ldots & T_m^{(q)} \end{pmatrix}.$$

Тогда рассматриваемая линейная модель может быть представлена в матричной форме:

$$\tilde{T}=PA^T+\varepsilon.$$

Применение метода наименьших квадратов для определения матрицы A^T дает следующую оценку [2]:

$$\hat{A}^T=\left(\tilde{P}^T\tilde{P}\right)^{-1}P^T\tilde{T}. \tag{3}$$

После нахождения коэффициентов a_{ki} можно оценить p_i из модели (2). Пользуясь соотношением, аналогичным (3), получим:

$$p = \left(\hat{A}^T \hat{A}\right)^{-1} \hat{A}^T T . \tag{4}$$

Рассмотрим следующий пример. Эксперимент проводился на цилиндре из оцинкованной стали, толщиной 0,5 мм, высотой 28 см и радиусом 12,5 см.

Следующие параметры были взяты из справочной литературы: плотность стали 7800 $кг/м^3$; коэффициент черноты блестящей оцинкованной стали 0,23; теплоемкость стали 0,452 $кДж/кг \cdot К$; плотность воздуха 1,3 $кг/м^3$; теплоемкость воздуха 0,72 $кДж/кг \cdot К$.

Цилиндр был вначале охлажден до температуры 9 ºС, а потом занесен в помещение с температурой воздуха 21 ºС. Измерение температуры проводилось с помощью мультиметра, имеющего точность 1º. Проведение вычислений по формулам (3)-(4), дает оценку коэффициента конвективной теплоотдачи $\alpha = 3{,}2\ Вт/К \cdot м^2$.

На рисунке 1 приведено сравнение экспериментальных данных с моделью из [1], при указанном значении коэффициента конвективной теплоотдачи.

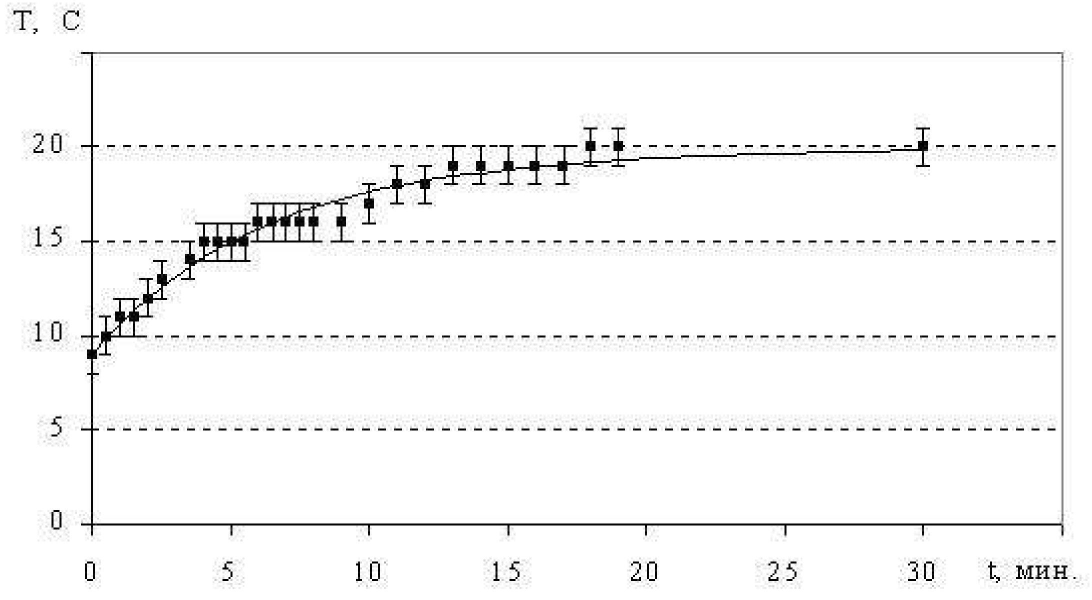

Рис. 1. Сравнение температуры, рассчитанной по модели, с экспериментальными данными.

Из рисунка 1 видно, что значения, полученные по модели, находятся в хорошем соответствии с опытными данными.

Выводы. Предложен метод оценки неизвестных тепловых параметров резервуара нефтепродукта, основанный на линейном приближении зависимости температуры от этих параметров. На примере рассмотрено экспериментальное определение коэффициента конвективной теплоотдачи и проведено сравнение результатов моделирования с экспериментом.

Перспективы исследований. Дальнейшие перспективы исследований связаны с использованием теории подобия для построения оценки коэффициента конвективного теплообмена.

Литература

1. *Абрамов Ю.А., Басманов А.Е.* Моделирование нагрева резервуара под действием излучения пожара // Вестник международного славянского университета. – Харьков: Яна, 2004, т. 7, №2. – С. 55-60.

2. *Асатурян В.И.* Теория планирования эксперимента. – М.: Радио и связь, 1983. – 248 с.

3. *Луканин В.Н., Шатров М.Г., Камфер Г.М.* Теплотехника – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2002. – 671 с.