

*А.Е. Басманов, д.т.н, проф., главн. научн. сотр., НУГЗУ,  
А.А. Михайлюк, к.т.н., ст. научн. сотр., нач. адъюнктуры, НУГЗУ,  
Я.С. Кулик, магистр, НУГЗУ*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРЕВА ТЕМПЕРАТУРНОГО ДАТЧИКА ПОД ТЕПЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОЖАРА РАЗЛИВА НЕФТЕПРОДУКТА**

Построена математическая модель теплового воздействия пожара нефтепродукта в обваловании на температурный датчик на резервуаре, позволяющая определить характеристики очага горения на основании данных об изменении температуры датчика.

**Ключевые слова:** очаг горения, резервуар, тепловой поток излучением, конвекция.

**Постановка проблемы.** Разлив и воспламенение нефтепродукта в обваловании резервуара является одной из опаснейших чрезвычайных ситуаций, способных привести как к серьезному материальному ущербу, так и человеческим жертвам.

Время, необходимое подразделениям МЧС для прибытия и развертывания сопоставимо со временем, в течение которого под тепловым воздействием пожара разлива происходит разгерметизация наземных продуктопроводов, заходящих в резервуар. Использование систем автоматического пожаротушения, обеспечивающих подачу пены для тушения очага горения, сдерживается неопределенностью расположения разлива, а также большой площадью внутри обвалования, что не позволяет полностью покрыть его пеной.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Тепловое воздействие пожара нефтепродукта в обваловании на резервуар и определение необходимого охлаждения рассмотрено в ряде работ и, в частности, в [1], но задача выявления и ликвидации очага горения в обваловании не рассматривается. В [1] также рассмотрена задача обнаружения и ликвидации пожара горючей жидкости, но только применительно к пожарам в помещениях.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является построение математической модели нагрева температурного датчика на резервуаре под тепловым воздействием пожара нефтепродукта в обваловании и определение на ее основе характеристик очага горения.

Тепловой поток от очага горения к резервуару состоит из теплового потока излучением и конвективного теплового потока. Таким образом, датчик, закрепленный на резервуаре, участвует в теплообмене излучением с пламенем и окружающим пространством, а также в конвективном теплообмене с окружающим воздухом.

Тепловой поток, который датчик получает излучением, согласно

закону Стефана-Больцмана [3], равен

$$q_{\text{изл}} = c_0 \varepsilon_{\phi} \varepsilon_{\text{д}} \left[ \left( \frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] H_{\phi} + c_0 \varepsilon_{\text{д}} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] H_0, \quad (1)$$

где  $c_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ ;  $\varepsilon_{\phi}$ ,  $\varepsilon_{\text{д}}$  – степени черноты поверхностей пламени и датчика;  $T_{\phi}$  – температура излучающей поверхности пламени;  $T$  – температура датчика;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $H_{\phi}$ ,  $H_0$  – площади взаимного облучения датчика с пламенем и окружающей средой, определяемые как поверхностные интегралы:

$$H_{\phi} = \iint_{S_{\phi}} \iint_S \frac{(\vec{r}, \vec{n}_{\phi})(\vec{r}, \vec{n})}{r^4} dS_{\phi} dS, \quad H_0 = S - H_{\phi}; \quad (2)$$

$S$  – площадь поверхности датчика;  $S_{\phi}$  – поверхность факела;  $\vec{r}$  – радиус-вектор, соединяющий точки на поверхностях факела и датчика;  $\vec{n}_{\phi}$ ,  $\vec{n}$  – нормальные вектора к поверхностям факела и датчика соответственно.

По закону Ньютона [3], тепловой поток, получаемый датчиком за счет конвективного теплообмена равен

$$q_{\text{конв}} = \alpha S (T_{\text{в}} - T), \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена;  $T_{\text{в}}$  – температура воздушной среды в месте соприкосновения с датчиком. Эта температура может отличаться от температуры окружающей среды  $T_0$  за счет влияния разогретых продуктов горения и воздуха, поднимающихся над очагом горения.

Суммарное количество тепла, получаемое датчиком за промежуток времени  $dt$ , идет на его нагрев на температуру  $dT$ :

$$(q_{\text{изл}} + q_{\text{конв}}) dt = mcdT = \rho VcdT, \quad (4)$$

где  $m$  – масса датчика;  $\rho$ ,  $c$  – плотность и теплоемкость материала датчика. Тогда динамика изменения температуры датчика описывается нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка

$$\frac{dT}{dt} = \frac{c_0 \varepsilon_{\phi} \varepsilon_{\text{д}}}{\rho Vc} \left[ \left( \frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] H_{\phi} + \frac{c_0 \varepsilon_{\text{д}}}{\rho Vc} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] H_0 + \frac{\alpha S (T_{\text{в}} - T)}{\rho Vc} \quad (5)$$

с начальным условием  $T(0) = T_0$ .

Для датчика, имеющего форму пластины площадью  $S$  и толщиной  $\delta$ , уравнение (5) примет вид

$$\frac{dT}{dt} = \frac{c_0 \varepsilon_\phi \varepsilon_d}{\rho \delta c} \left[ \left( \frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] \frac{H_\phi}{S} + \frac{c_0 \varepsilon_d}{\rho \delta c} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] \frac{H_0}{S} + \frac{\alpha(T_B - T)}{\rho \delta c}. \quad (6)$$

С учетом малости размеров датчика по сравнению с размерами факела и расстоянием до него

$$\frac{H_\phi}{S} \approx \psi_\phi = \frac{1}{\pi S_\phi} \iint \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{r^2} dS_\phi, \quad (7)$$

$$\frac{H_0}{S} = 1 - \frac{S_\phi}{S} \approx 1 - \psi_\phi, \quad (8)$$

где  $\psi_\phi$  – локальный коэффициент облучения факелом, рассчитанный для центра датчика:  $\varphi_1, \varphi_2$  – углы между радиус-вектором  $\vec{r}$  и нормальными векторами к поверхности факела и поверхности датчика соответственно. Подставляя (7) и (8) в (6), получим

$$\frac{dT}{dt} = \frac{c_0 \varepsilon_\phi \varepsilon_d}{\rho \delta c} \left[ \left( \frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] \psi_\phi + \frac{c_0 \varepsilon_d}{\rho \delta c} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] (1 - \psi_\phi) + \frac{\alpha(T_B - T)}{\rho \delta c}. \quad (9)$$

Значение коэффициента конвективного теплообмена  $\alpha$  может быть определено из выражения

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{L}, \quad (10)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха;  $L$  – характерный размер, равный диаметру резервуара;  $Nu$  – число Нуссельта, которое может быть оценено из соотношения [3]

$$Nu = 0,0364 Re^{0,8} Pr^{0,4} \varepsilon_t, \quad (11)$$

где  $Re = wL/\nu$  – число Рейнольдса;  $w$  – скорость движения воздушного потока, соприкасающегося с пластиной (обусловленного как ветром, так и восходящими потоками от очага горения);  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха;  $Pr \approx 0,7$  – число Прандтля воздуха;  $\varepsilon_t$  – поправочный коэффициент:

$$\varepsilon_t = \begin{cases} (\mu_f/\mu_w)^{0,11}, & T < T_B \\ (\mu_f/\mu_w)^{0,25}, & T > T_B, \end{cases} \quad (12)$$

$\mu_f$ ,  $\mu_w$  – динамическая вязкость воздуха при температурах  $T_B$  и  $T$  соответственно. Объединяя (10)-(11), получим оценку коэффициента конвективного теплообмена:

$$\alpha = \lambda \frac{0,0364(wL)^{0,8} Pr^{0,4} \varepsilon_t}{Lv^{0,8}} = \frac{0,0364\lambda w^{0,8} Pr^{0,4} \varepsilon_t}{L^{0,2}v^{0,8}}. \quad (13)$$

Анализ зависимостей (9), (12), (13) показывает, что динамика изменения температуры датчика определяется двумя группами параметров:

- параметры, значения которых известны (вид нефтепродукта –  $\varepsilon_\phi$ ,  $T_\phi$ ; геометрические характеристики и материал пластины) или могут быть измерены (температура окружающего воздуха, направление и скорость ветра);
- параметры, значения которых неизвестны (коэффициент облученности  $\psi_\phi$ , скорость  $w$  и температура  $T_B$  восходящих потоков в области контакта с пластиной).

Если температура пластины измеряется термопарой или сама пластина является термопарой, то информация о динамике изменения ее температуры позволяет определить неизвестные параметры  $\psi_\phi$ ,  $w$ ,  $T_B$  как решение оптимизационной задачи

$$\sum_{i=1}^n (T_p(t_i, \psi_\phi, w, T_B) - T_n(t_i))^2 \rightarrow \min_{\psi_\phi, w, T_B}, \quad (14)$$

где  $T_p(t_i, \psi_\phi, w, T_B)$  – расчетное значение температуры пластины в момент времени  $t_i$ , вычисленное для данных значений  $\psi_\phi$ ,  $w$ ,  $T_B$ ;  $T_n(t_i)$  – измеренное значение температуры в тот же момент времени. Значения параметров  $\psi_\phi$ ,  $w$ ,  $T_B$  ограничены неравенствами

$$0 \leq \psi_{\phi} \leq 1, 0 \leq w \leq \sqrt{w_0^2 + w_{\max}^2}, T_0 \leq T_B \leq T_{\phi}, \quad (15)$$

где  $w_0$  – скорость ветра;  $w_{\max}$  – скорость восходящих потоков в пламени пожара [2]. Применение к задаче (14)-(15) классических методов оптимизации, например, метода покоординатного спуска, позволяет оценить параметры очага горения  $\psi_{\phi}$ ,  $w$ ,  $T_B$ .

**Выводы.** Построена математическая модель нагрева температурного датчика, закрепленного на резервуаре, под тепловым воздействием пожара, позволяющая определить параметры очага горения нефтепродукта в обваловании резервуара как решение задачи оптимизации. Полученные параметры (коэффициент облучения, температура и скорость потока воздуха, контактирующего с датчиком) являются исходной информацией для определения местоположения и формы горящего разлива.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А. Моделирование пожаров, их обнаружения, локализации и тушения / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов, А.А. Тарасенко. – Харьков: НУГЗУ, 2011. – 927 с.
2. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Д. Драйздейл. – М.: Стройиздат, 1990. – 420 с.
3. Луканин В.Н. Теплотехника / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др. – М.: Высш. шк., – 2002. – 671 с.

О.Є. Басманов, А.О. Михайлюк, Я.С. Кулик

**Математична модель нагріву температурного датчика під тепловим впливом пожежі розливу нафтопродукту**

Побудовано математичну модель теплового впливу пожежі нафтопродукту в обвалуванні на температурний датчик на резервуарі, яка дозволяє визначити характеристики осередку горіння на підставі даних про зміну температури датчика.

**Ключові слова:** осередок горіння, резервуар, тепловий потік випромінювання, конвекція.

A.E. Basmanov, A.O. Mykhailiuk, Y.S. Kulik

**Mathematical model for temperature sensor heating under thermal impact of fire of the spill**

Mathematical model of thermal impact of fire of the spill to the temperature sensor on reservoir is constructed. It allows estimate the characteristics of combustion source by using sensor temperature data.

**Keywords:** combustion source, fuel tank, radiation, convection.