

*А.Е. Басманов, д.т.н., профессор, гл. науч. сотр., НУГЗУ,  
Я.С. Кулик, адъюнкт, НУГЗУ*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЖАРА В ОБВАЛОВАНИИ НА РЕЗЕРВУАР С НЕФТЕПРОДУКТОМ

Построена математическая модель теплового воздействия пожара нефтепродукта в обваловании на сухую стенку резервуара с нефтепродуктом, учитывающая лучистый теплообмен с факелом и конвективный теплообмен с восходящим над очагом горения воздушным потоком.

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

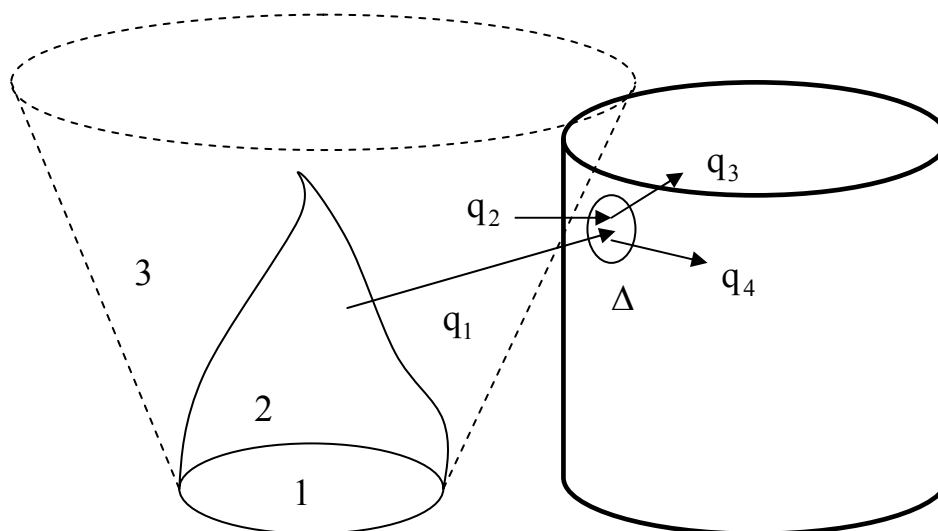
**Постановка проблемы.** Пожар в обваловании резервуара с нефтепродуктом представляет особую опасность в связи с угрозой нагрева стенок резервуара до температуры самовоспламенения нефтепродукта, могущего привести к взрыву паровоздушной смеси. Поэтому для проектирования системы пожаротушения необходимо оценить время, в течение которого должно быть начато охлаждение стенок резервуара, либо ликвидирован пожар в обваловании. Таким образом, возникает необходимость в построении модели теплового воздействия пожара в обваловании на резервуар с нефтепродуктом.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Пожар в обваловании и его воздействие на резервуар с нефтепродуктом рассмотрен в работе [4]. Но построенная в ней модель учитывает лишь лучистую передачу тепла от факела к стенке резервуара, а конвективная составляющая не учтена. В работе [2] построены оценки скорости и температуры восходящих потоков над горящим разливом жидкости, но не рассматривается их воздействие на окружающие объекты.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является построение математической модели нагрева стенки резервуара, не соприкасающейся с налитым в него нефтепродуктом, под тепловым воздействием пожара в обваловании.

Рассмотрим малую область  $\Delta$  площадью  $S$  на сухой стенке резервуара (не соприкасающейся с налитым в резервуар нефтепродуктом). Она участвует в теплообмене (рис. 1):

- теплообмене излучением с факелом –  $q_1$ ;
- конвективном теплообмене с восходящими воздушными потоками над факелом –  $q_2$ ;
- теплообмене излучением с внутренним пространством резервуара –  $q_3$ ;
- конвективном теплообмене с паровоздушной смесью в газовом пространстве резервуара –  $q_4$ .



**Рис. 1. Теплообмен стенки резервуар при пожаре в обваловании: 1 – разлив; 2 – факел; 3 – восходящие воздушные потоки над очагом горения**

Тепловой поток излучением от факела определяется законом Стефана-Больцмана [3]:

$$q_1 = c_0 \varepsilon_\phi \varepsilon_c \left[ \left( \frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] N_\phi + c_0 \varepsilon_c \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] N_0,$$

где  $c_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ ;  $\varepsilon_\phi$ ,  $\varepsilon_c$  – степени черноты поверхностей пламени и стенки резервуара;  $T_\phi$  – температура излучающей поверхности пламени;  $T$  – температура стенки резервуара;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $N_\phi$ ,  $N_0$  – площади взаимного облучения области  $\Delta$  с пламенем и окружающей средой.

По закону Ньютона [3], тепловой поток, получаемый областью  $\Delta$  путем конвективного теплообмена с восходящими воздушными потоками над очагом горения, равен

$$q_2 = \alpha_2 S (T_b - T),$$

где  $\alpha_2$  – коэффициент конвективного теплообмена;  $T_b$  – температура воздушной среды в месте соприкосновения с областью  $\Delta$ .

Тепловой поток излучением, уходящий от нагреваемой стенки во внутреннее пространство резервуара, имеет вид

$$q_3 = c_0 \varepsilon_c \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] S.$$

Конвективный тепловой поток, уходящий в паровоздушную

смесь в газовом пространстве резервуара, равен

$$q_4 = \alpha_4 S (T_0 - T).$$

Общее количество тепла, получаемое областью  $\Delta$  за промежуток времени  $dt$ , идет на ее нагрев на температуру  $dT$ :

$$\sum_{i=1}^4 q_i dt = mcdT = \rho VcdT = \rho S\delta cdT,$$

где  $m$ ,  $V$  – масса и объем рассматриваемой области  $\Delta$ ;  $\delta$  – толщина стенки резервуара;  $\rho$ ,  $c$  – плотность и теплоемкость стали. Тогда динамика изменения температуры области  $\Delta$  описывается дифференциальным уравнением

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= \frac{c_0 \varepsilon_\phi \varepsilon_c}{\rho \delta c} \left[ \left( \frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] \psi + \frac{c_0 \varepsilon_c}{\rho \delta c} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] (1 - \psi) + \\ &+ \frac{\alpha_2 (T_B - T)}{\rho \delta c} + \frac{c_0 \varepsilon_c}{\rho \delta c} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] + \frac{\alpha_4 (T_0 - T)}{\rho \delta c} = \\ &= \frac{c_0 \varepsilon_\phi \varepsilon_c}{\rho \delta c} \left[ \left( \frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] \psi + \frac{c_0 \varepsilon_c}{\rho \delta c} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] (2 - \psi) + \\ &+ \frac{\alpha_2 (T_B - T)}{\rho \delta c} + \frac{\alpha_4 (T_0 - T)}{\rho \delta c}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\psi$  – локальный коэффициент облучения факелом, рассчитанный для центра области  $\Delta$ ,  $\psi = \lim_{S \rightarrow 0} H_0/S$ .

Значение коэффициентов конвективного теплообмена  $\alpha_2$  и  $\alpha_4$  может быть определено из выражения

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{L},$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха;  $L$  – характерный размер;  $Nu$  – число Нуссельта.

Для вынужденного конвективного теплообмена (с восходящими над очагом горения воздушными потоками), значение числа Нуссельта может быть оценено из соотношения [3]

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

где  $Re = wL/\nu$  – число Рейнольдса;  $w$  – скорость движения воздушного потока, соприкасающегося с областью  $\Delta$ ;  $\nu$  – кинематическая

вязкость воздуха;  $Pr \approx 0,7$  – число Прандтля воздуха;  $\varepsilon_t$  – поправочный коэффициент:

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

$\mu_f$ ,  $\mu_w$  – динамическая вязкость воздуха при температурах  $T_B$  и  $T$  соответственно. Тогда оценка коэффициента конвективного теплообмена с восходящими воздушными потоками примет вид:

$$\alpha_2 = \lambda \frac{0,0364(wL)^{0,8} Pr^{0,4} \varepsilon_t}{Lv^{0,8}} = \frac{0,0364\lambda w^{0,8} Pr^{0,4} \varepsilon_t}{L^{0,2}v^{0,8}}.$$

При этом параметры  $\lambda$ ,  $Pr$ ,  $v$  являются функциями температуры воздушного потока.

В [2] построены оценки для скорости и температуры восходящих потоков над очагом горения:

$$\frac{T_B - T_0}{T_\phi - T_0} = \sqrt{\frac{w}{u_0}} = \sqrt{f\left(\frac{r_1}{r_1 + r_2}\right)},$$

где  $u_0$  – скорость конвективных потоков в факеле;  $r_1$  – расстояние до границы ядра струи;  $r_2$  – расстояние до границы восходящих воздушных потоков (рис. 1);  $f$  – таблично заданная функция [1, 2].

Вводя обозначение

$$\varphi = f\left(\frac{r_1}{r_1 + r_2}\right),$$

запишем слагаемое, характеризующее вклад конвективного теплообмена с восходящим воздушным потоком, в виде

$$\frac{\alpha_2(T_B - T)}{\rho\delta c} = \frac{1}{\rho\delta c} \frac{0,0364\lambda(u_0\varphi)^{0,8} Pr^{0,4} \varepsilon_t}{L^{0,2}v^{0,8}} [(T_\phi - T_0)\sqrt{\varphi} + T_0 - T]. \quad (2)$$

Для свободного конвективного теплообмена (с паровоздушной смесью в газовом пространстве резервуара) значение числа Нуссельта определяется из соотношения [3]

$$Nu = 0,135(Gr \cdot Pr)^{1/3},$$

где  $Gr$  – число Грасгофа:

$$Gr = \frac{\beta\Delta TL^3 g}{\nu^2},$$

де  $\Delta T = T - T_0$ ;  $\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения воздуха;  $g$  – ускорение свободного падения. Тогда слагаемое в (1), соответствующее конвективному теплообмену с паровоздушной смесью, примет вид

$$\frac{\alpha_4(T_0 - T)}{\rho \delta c} = -0,135 \frac{\lambda}{\rho \delta c} \left( \frac{g \text{Pr}}{T v^2} \right)^{1/3} (T - T_0)^{4/3}. \quad (3)$$

Дифференциальное уравнение (1) с учетом соотношений (2)-(3) и начального условия  $T(0) = T_0$  определяет динамику изменения температуры произвольно выбранной точки на сухой стенке резервуара.

**Выводы.** Построена математическая модель нагрева сухой стенки резервуара с нефтепродуктом при пожаре в его обваловании. Модель учитывает лучистый теплообмен с факелом и конвективный теплообмен с поднимающимся над очагом горения воздушным потоком.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. – М.: Физматгиз, 1960. – 715 с.
2. Басманов А.Е. Оценка параметров воздушного потока, поднимающегося над горящим разливом произвольной формы / А.Е. Басманов, Я.С. Кулик // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ, 2013. – № 33. – С. 17-21.
3. Луканин В.Н. Теплотехника / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др. – М.: Высш. шк., – 2002. – 671 с.
4. Улинец Э.М. Математическая модель теплового воздействия пожара разлива нефтепродукта на резервуар / Э.М. Улинец // Проблемы пожарной безопасности. – 2008. – Вып. 24. – С. 227-231.

О.Є. Басманов, Я.С. Кулик

### **Моделювання теплового впливу пожежі в обвалуванні на резервуар з нафтопродуктом**

Побудовано математичну модель теплового впливу пожежі нафтопродукту в обвалуванні на суху стінку резервуара з нафтопродуктом, яка враховує променистий теплообмін з факелом і конвекційний теплообмін з повітряним потоком, що здіймається над осередком горіння.

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

A.E. Basmanov, Y.S. Kulik

### **Modeling of the thermal impact of fire in bund to the tank with petroleum**

Mathematical model of thermal impact of fire of the spill in the bund to the dry wall of the tank is constructed. It takes into account radiative heat transfer from fire and a convective heat exchange with combusting air flow which rising above fireplace.

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