

"Огненный шар"

Краткое описание задачи "Огненный шар"

При авариях на объектах хранения нефти и нефтепродуктов одной из опасностей является возникновение очага горения. В этом случае, вследствие продолжительной подготовки к локализации и тушению пожара, происходит сильный нагрев объектов хранения, что может привести к BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions – Взрыв кипящей жидкости с расширением пара) и образованию вторичных очагов поражения.

Взрывы с образованием огненных шаров происходят при больших массах горючей жидкости, высоких значениях энергии перегрева и внезапном разрушении сосудов, когда мгновенно образуется огромная масса паров. Это часто происходит при огневом или другом интенсивном нагреве сосудов со сжиженными углеводородными газами и ЛВЖ. Поэтому локальные пожары или взрывы с последующим возникновением пожаров на складах сжиженных газов или технологических установках всегда представляют опасность масштабного развития аварий, особенно при больших плотностях энергоносителей на производственных площадях.

Огненный шар - крупномасштабное диффузионное горение, реализуемое при разрыве резервуара с горючей жидкостью или газом под давлением с воспламенением содержимого резервуара (ГОСТ Р 12.3.047-2012).

Поражающим воздействием от огненного шара является тепловое излучение, величина которого определяется по методике расчета, представленной в Приказе МЧС России № 404 от 10.07.2009 (ред. от 14.12.2010) "Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах".

При оценке последствий воздействия опасных факторов использованы вероятностные критерии (по пробит-функции, характеризующей вероятность возникновения последствий). Оценка последствий проводится в соответствии с Приказом Ростехнадзора от 11.04.2016 № 144 "Об утверждении Руководства по безопасности "Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах".

Расчет интенсивности теплового излучения и времени существования огненного шара (ГОСТ Р 12.3.047— 2012)

Интенсивность теплового излучения q (кВт/м²) для огненного шара определяется.

$$q = E_f * E_q * \tau, \quad (1)$$

где E_f - среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, кВт/м²; E_q - угловой коэффициент облученности; τ - коэффициент пропускания атмосферы.

Величина E_f - определяется на основе имеющихся экспериментальных данных. Допускается принимать E_f - равной 450 кВт/м². Значение E_q - определяется по формуле

$$E_q = \frac{D_s^2}{4 * (H^2 + R^2)}, \quad (2)$$

где H - высота центра огненного шара, м. Допускается полагать, $H = D_s$

D_s - эффективный диаметр огненного шара, м;

R - расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром огненного шара, м.

Эффективный диаметр огненного шара D_s (м) определяется по формуле

$$D_s = 6,48 \cdot m^{0,325}, \quad (3)$$

где m - масса продукта, поступившего в окружающее пространство, кг.

Величину H допускается принимать равной D_s .

Время существования огненного шара t_s определяется по формуле

$$t_s = 0,852 \cdot m^{0,26}. \quad (4)$$

Коэффициент пропускания атмосферы τ для огненного шара рассчитывается по формуле

$$\tau = \exp[-7.0 \cdot 10^{-4} \cdot (\sqrt{R \cdot R + H \cdot H} - D_s/2)] \quad (5)$$

Для поражения человека тепловым излучением величина пробит-функции описывается формулой:

$$Pr = -14.9 + 2.56 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3})$$

(Методика оценки пожароопасных расстояний при проектировании промышленных предприятий; Москва 2016)

где t - эффективное время экспозиции, с;

q - интенсивность теплового излучения, Вт/м²;

Величина эффективного времени экспозиции t определяется по формулам:
для огненного шара:

$$t = 0.92 \cdot m^{0.303}$$

Вероятность летального поражения человека при тепловом излучении огненного шара P

$$P = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr-5} \exp(-t^2) dt$$

Связь вероятности поражения с пробит-функцией

<https://meganorm.ru/Data2/1/4293755/4293755568.htm#i211020>

P, %	0	1	2	3	4
0		2,67			
10	3,72	3,77			
20	4,16	4,19			
30	4,48				
40	4,75				
50	5,0				

60	5,25				
...	...				

Дозу теплового излучения Q , Дж/м², рассчитывают по формуле

$$Q = q \cdot t_s$$

где q - интенсивность теплового излучения огненного шара, Вт/м²;

t_s - время существования огненного шара, с.

Предельно допустимые дозы теплового излучения при воздействии огненного шара на человека представлены в табл. 1.

Таблица 1

Предельно допустимая интенсивность теплового излучения
при воздействии огненного шара на человека

Степень поражения, i	Интенсивность теплового излучения, q , Дж/м ²
Ожог 1-й степени	$1,2 \cdot 10^5$
Ожог 2-й степени	$2,2 \cdot 10^5$
Ожог 3-й степени	$3,2 \cdot 10^5$

Пример - Определить время существования "огненного шара" и интенсивность теплового излучения от него на расстоянии 500 м при разрыве сферической емкости с пропаном объемом 600 м³ в очаге пожара. Рассчитать вероятность поражения человека, находящегося на расстоянии 500 метров от точки проекции центра огненного шара на Землю.

Данные для расчета

Объем сферической емкости 600 м³. Плотность жидкой фазы 530 кг/м³. Степень заполнения резервуара жидкой фазы 80%. Расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром "огненного шара" 500 м.

Расчет

Находим массу горючего m в "огненном шаре" по формуле

$$m = V \rho \alpha = 600 \cdot 530 \cdot 0,8 = 2,54 \cdot 10^5 \text{ кг,}$$

где V - объем резервуара, м³ ($V = 600 \text{ м}^3$);

ρ - плотность жидкой фазы, кг/м³ ($\rho = 530 \text{ кг/м}^3$);

α - степень заполнения резервуара ($\alpha = 0,8$).

Определяем эффективный диаметр "огненного шара" D_s

$$D_s = 6,48 \cdot m^{0,325} = 6,48 \cdot (2,54 \cdot 10^5)^{0,325} = 370 \text{ м.}$$

Принимая $H = D_s = 370 \text{ м}$ находим угловой коэффициент облученности F_q

$$F_q = \frac{D_s^2}{4 \cdot (H^2 + r^2)} = (370 \cdot 370) / (4 \cdot (370^2 + 500^2)) = 0,088$$

Находим коэффициент пропускания атмосферы τ :

$$\tau = \exp[-7,0 \cdot 10^{-4} \cdot ((500^2 + 370^2)^{0,5} - 185)] = 0,736$$

Принимая $E_f = 450$ кВт/м² находим интенсивность теплового излучения q

$$q = 450 \cdot 0,088 \cdot 0,736 = 29,33 \text{ кВт / м}^2$$

По формуле определяем эффективное время экспозиции

$$t_s = 0,92 \left(2,54 \cdot 10^5 \right)^{0,303} = 40 \text{ с.}$$

Рассчитываем пробит-функцию

$$Pr = -14.9 + 2.56 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3})$$

Рассчитываем вероятность

$$P = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr-5} \exp(-t^2) dt$$

```
#include <iostream>
#include <math.h>
using namespace std;
double ff(double xx) // Подпрограмма расчета интеграла
{ double s=0;
double xs=-10, xf=0, dd;
int n=100;
dd=(xx - xs)/(n-1);
for(int i=1; i<n; i++)
{ xf=xs+dd;
s=s+(exp(-xs*xs/2)+exp(-xf*xf/2));
xs=xf; }
s=(s*dd /2 )/sqrt(2*3.1415);
return (s); }
```

```
int main()
{ double R=500, V =600; // R, m - расстояние; V, m - объем емкости с пропаном
double d = 530, z = 80; // d, кг/м3 - плотность пропана в жидком сост., z,% - заполнение
double Ef = 450; // Интенсивность теплового излучения пламени, кВт/м2
double m, Ds, H, Eq, tay, q, ts, t, Pr, P;
m = V*d*0.01*z; // масса, кг
std::cout <<" m = " << m << " кг " << "\n";
Ds = 6.48*pow(m, 0.325); // эффективный диаметр,м
H = Ds; // Высота подъема огненного шара
std::cout <<" Ds = " << Ds << ", м " << "\n";
Eq = Ds*Ds/(4*(H*H+R*R)); // угловой коэффициент
std::cout <<" Eq = " << Eq << " угловой коэффициент " << "\n";
tay = exp(-7.0E-4*(sqrt(H*H+R*R)-Ds/2)); // коэффициент пропускания
```

```

std::cout << " tau = " << tau << " коэффициент пропускания " << "\n";
q = Ef*Eq*tau; // Интенсивность, кВт/м2
std::cout << " q = " << q << " Интенсивность, кВт/м2 " << "\n";
ts = 0.852*pow(m, 0.26); // Время существования ОШ,с
std::cout << " ts = " << ts << " Время существования ОШ,с " << "\n";
t = 0.92*pow(m, 0.303); // Эффективное время экспозиции ОШ,с
std::cout << " t = " << t << " Эффективное время экспозиции ОШ,с " << "\n";
Pr = -14.9+2.56*log(t*(pow(q,1.3333)));
std::cout << " Pr = " << Pr << " Пробит " << "\n";
P=ff(Pr-5);
std::cout << " P = " << P << " Вероятность " << "\n";
return 0;}

```

Результат работы программы

```

m = 254400 кг
Ds = 370.142, м
Eq = 0.0885033 угловой коэффициент
tau = 0.736447 коэффициент пропускания
q = 29.3301 Интенсивность, кВт/м2
ts = 21.6708 Время существования ОШ,с
t = 39.9631 Эффективное время экспозиции ОШ,с
Pr = 6.07322 Пробит
P = 0.858175 Вероятность

```