

## ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВЗРЫВА: ОЦЕНКИ РИСКА ТЕРМИЧЕСКОГО ПОРАЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ И ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРОВ. II

Степанов К.Л., к.ф.-м.н., доцент, Станчиц Л.К., к.ф.-м.н., доцент,  
Станкевич Ю.А., к.ф.-м.н.

Институт тепло- и массообмена им. А.В Лыкова НАН Беларуси  
e-mail: kls@hmti.ac.by

*В работе продолжено исследование теплового излучения взрыва, начатое в [1]. Полученные ранее данные по излучательным характеристикам огненного шара взрыва и факела диффузионного горения углеводородного топлива [1] используются для определения доз облучения и тепловых потоков на мишенях. С этой целью на основе теории угловых коэффициентов рассчитаны параметры облученности расположенных на земной поверхности мишеней различной ориентации. Получены распределения тепловых нагрузок на них в окрестности зоны энерговыделения. Проведено сравнение тепловых параметров на приемниках излучения с критериями теплового поражения людей и воспламенения горючих материалов.*

*In this paper we continue the study of thermal radiation from explosion, initiated in [1]. Obtained earlier data on the radiative characteristics of the fireball explosion and plume diffusion combustion of hydrocarbon fuel [1] are used for determining the doses of radiation and heat fluxes on the target. For this purpose, we use the theory of angular coefficients that allows evaluate the irradiance parameters for arbitrary oriented targets located on the earth's surface. Calculation of thermal loads on the target in the vicinity of the energy release zone is performed. The impact of radiation from the explosion and fire compared with the criteria of the thermal damage of people and ignition of combustible materials.*

(Поступила в редакцию 21 июня 2010 г.)

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] было рассмотрено тепловое излучение взрывов химических взрывчатых веществ (ВВ) и факелов диффузионного горения углеводородного топлива. Определены степени черноты и потоки излучения с поверхности огненного шара (ОШ). Показано, что при взрывах конденсированного ВВ энергия ОШ, как правило, не превышает 10 % полной энергии. Во взрыве топливно-воздушной смеси эта доля может достигать 60 % и более. Ниже рассмотрим воздействие ИК-излучения на объекты, расположенные в окрестности источника энерговыделения.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ОГНЕННОГО ШАРА

Интенсивность воздействия излучения ОШ характеризуется значением плотности теплового потока (и дозой излучения), приходящего на поверхность мишени. Как известно [2], величина теплового потока на мишени  $q_M$  определяется потоком с поверхности ОШ  $q_{ОШ}$ , пропусканием атмосферы на пути от ОШ к мишени  $\tau_A$  и взаимным расположением мишени и ОШ:

$$q_M = q_{ОШ} \tau_A F_{M-ОШ}, \quad (1)$$

где  $F_{M-ОШ}$  – угловой коэффициент, определяющий облученность мишени излучением ОШ.

Произведение  $q_{ОШ} F_{M-ОШ}$  дает плотность попадающего на мишень теплового потока при отсутствии ослабления его в воздухе.

В качестве источника излучения рассмотрим два геометрических объекта. Первый из них – сфера радиусом  $r_0$ , центр которой находится на высоте  $h$  над поверхностью земли. Второй – круговой цилиндр радиусом  $r_0$  с основанием на земной поверхности и высотой  $l_0$ .

При  $h > r_0$  сфера целиком расположена над поверхностью, при  $h = r_0$  – касается ее, а если  $h < r_0$ , она частично усечена. Когда  $h = 0$ , источник превращается в полусферу, если  $h \leq -r_0$ , то сфера не видна на поверхности.

Положение мишени характеризуется ее расстоянием вдоль земной поверхности от оси цилиндра или вертикальной оси, проходящей через центр сферы, и нормалью к поверхности мишени. Для вертикально стоящей мишени (рис. 1) нормаль параллельна поверхности и направлена на ось источника. Для мишени, лежащей на поверхности, нормаль параллельна оси излучающего объема (рис. 2). Схема взаимного расположения цилиндра и мишеней дана на рис. 3.

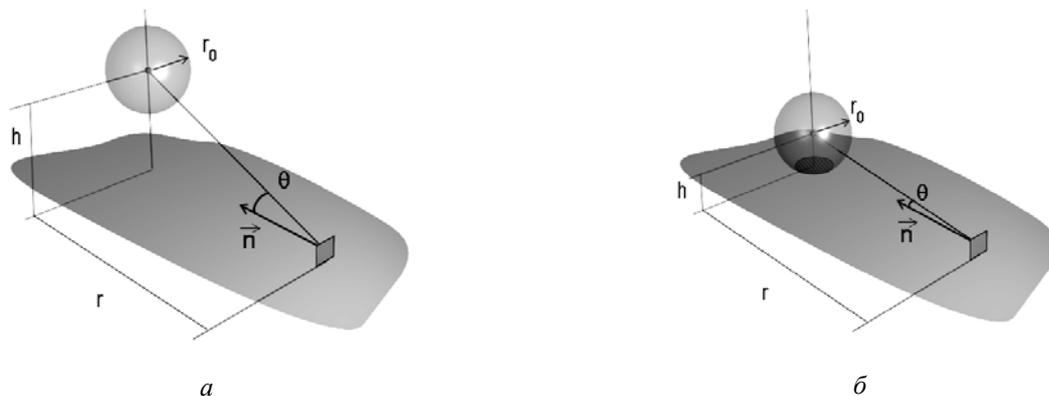


Рисунок 1 – Облученность вертикальной мишени сферой (а) и ее частью, находящейся над поверхностью (б)

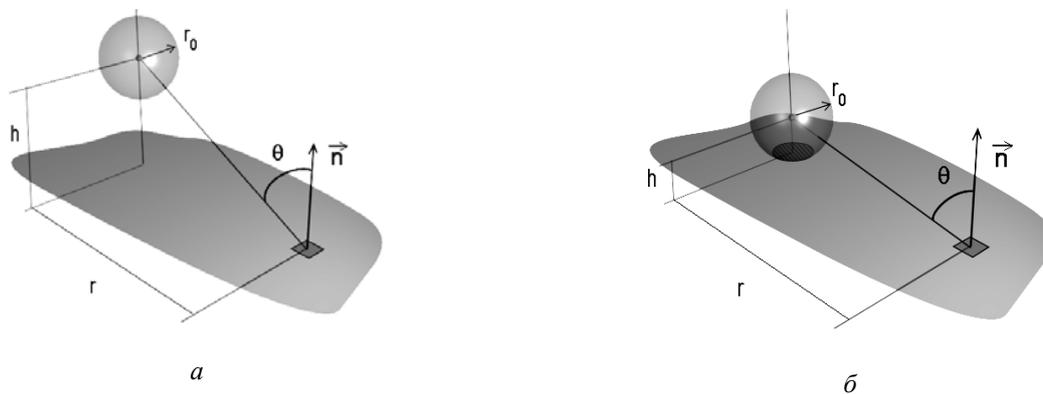


Рисунок 2 – Облученность горизонтальной мишени сферой (а) и ее частью, лежащей над поверхностью (б)

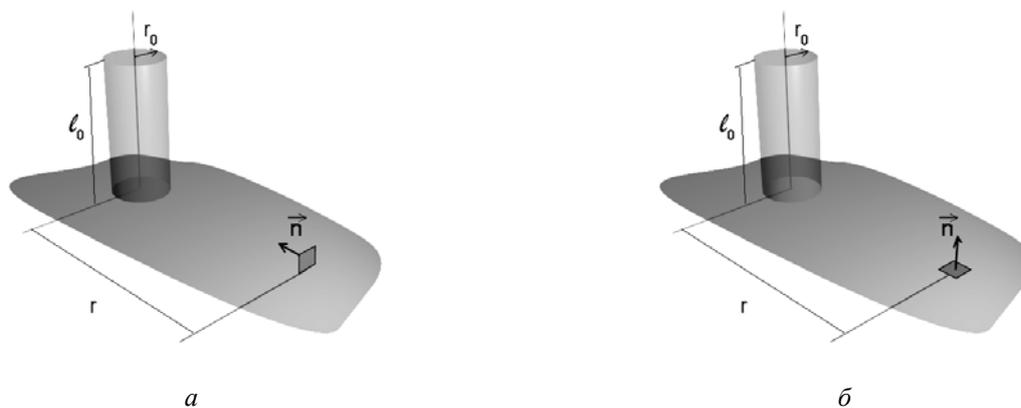


Рисунок 3 – Облученность излучающим цилиндром вертикально (а) и горизонтально (б) расположенных мишеней

**УГЛОВЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ**

Приведем соотношения для вычисления угловых коэффициентов и результаты их расчетов [3, 4]. Вычисление угловых коэффициентов удобно проводить, используя безразмерные параметры. Введем безразмерную высоту ОШ  $H$  и расстояние его до мишени  $L$ :

$$H = h / r_0, \quad L = r / r_0. \quad (2)$$

1а. Сфера находится над поверхностью земли ( $H \geq 1$ ):

$$F_{\text{М-ОШ}}^a = \begin{cases} \frac{L}{(H^2 + L^2)^{3/2}}, & L \geq 1, \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{\sqrt{H^2 + L^2 - 1}}{H} + \frac{1}{\pi(H^2 + L^2)} \left[ \frac{L}{\sqrt{H^2 + L^2}} \arccos \left( -\frac{L}{H} \sqrt{H^2 + L^2 - 1} \right) - \sqrt{(H^2 + L^2 - 1)(1 - L^2)} \right], & L \leq 1. \end{cases} \quad (3)$$

Облученность вертикальной мишени приподнятой над поверхностью сферой показана на рис. 4. Различной высоте сферы отвечают кривые 1–11. Первая из них относится к сфере, касающейся поверхности ( $H = 1$ ). Значение  $L = 0$  отвечает положению площадки прямо под центром сферы. Когда  $L \rightarrow -1$ , излучение сферы не попадает на площадку с выбранным направлением нормали и  $F_{\text{М-ОШ}}^a \rightarrow 0$ . Асимптотическое выражение углового коэффициента для большого удаления мишени от оси сферы:

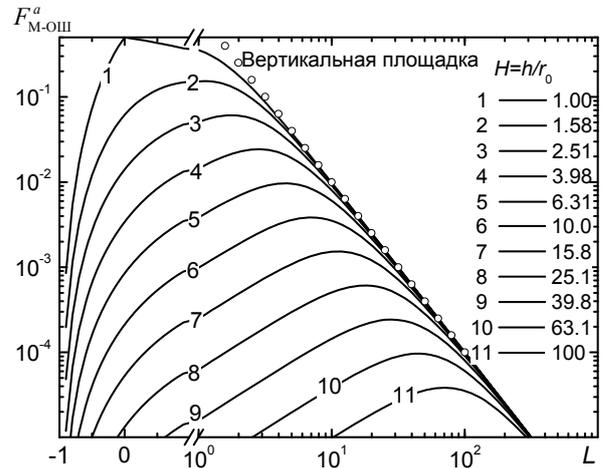
$$F_{\text{М-ОШ}}^a = \frac{1}{L^2}, \quad L \gg 1, L \gg H. \quad (4)$$

Зависимость (4) показана на рис. 4 кружками. Видно, что данная асимптотика имеет место, когда  $L \geq 4H$ .

1б. Над поверхностью находится часть сферы ( $-1 \leq H \leq 1$ ):

$$F_{\text{М-ОШ}}^b = \frac{L}{(H^2 + L^2)^{3/2}} \left[ 1 - \frac{1}{\pi} \arccos \left( \frac{H}{L} \sqrt{H^2 + L^2 - 1} \right) + \frac{H}{\pi L^2} \sqrt{L^2 + H^2 - 1} \sqrt{(L^2 + H^2)(1 - H^2)} \right]. \quad (5)$$

Облученность в этом случае как функция расстояния мишени до оси сферы  $L$  и степени заглубления сферы под поверхность представлена на рис. 5. Индекс кривых от 1 до 7 относится к различной степени заглубления сферы. При  $H = 1$  она касается поверхности, при  $H = 0,5$  центр сферы расположен на половине ее радиуса над поверхностью, когда  $H = 0$ , над поверхностью находится полусфера. Кривые 3–7 соответствуют уменьшающемуся сегменту сферы, находящемуся над поверхностью земли. Асимптотическое поведение углового коэффициента для больших расстояний  $L$  от оси сферы имеет вид:



**Рисунок 4 – Облученность мишени сферой, находящейся над поверхностью земли (1а)**

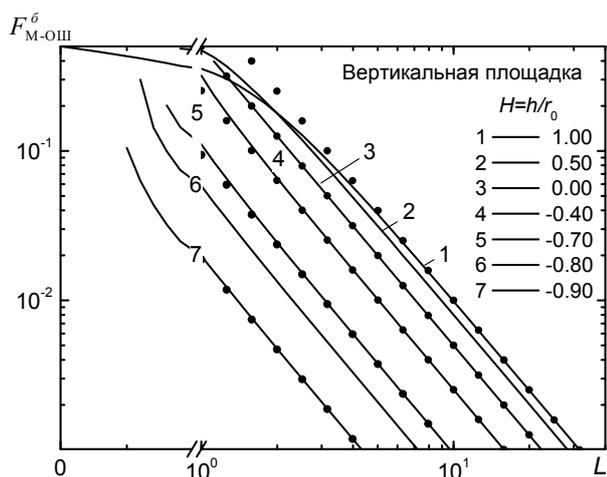


Рисунок 5 – Облученность мишени сферой, часть которой находится над поверхностью земли (1б)

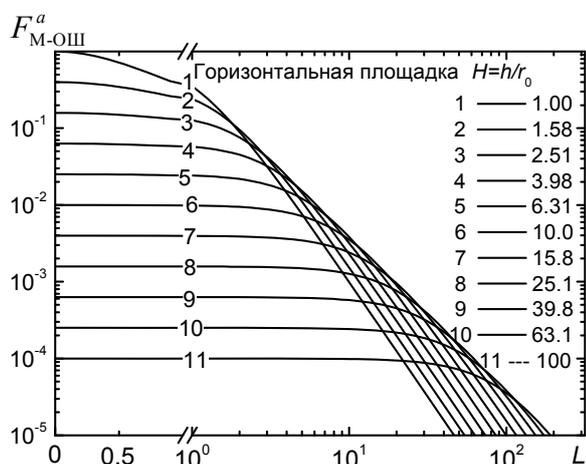


Рисунок 6 – Облученность горизонтальной мишени сферой, находящейся над поверхностью земли (2а)

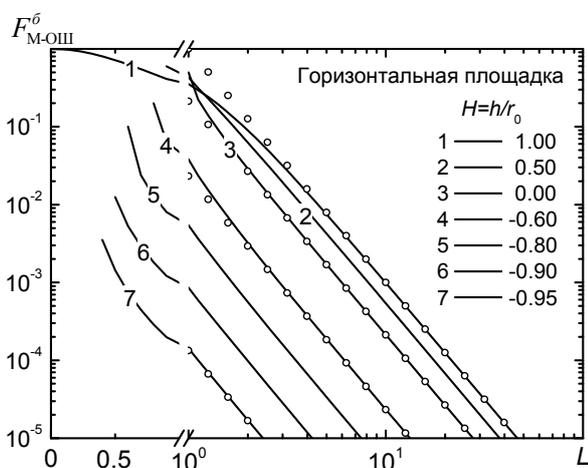


Рисунок 7 – Облученность горизонтальной мишени частью сферы (2б)

$$F_{M-ОШ}^b = \frac{1}{L^2} \left[ 1 + \frac{1}{\pi} \left( H\sqrt{1-H^2} - \arccos H \right) \right],$$

$$L \gg 1. \quad (6)$$

Из расчетов по формулам (5) и (6) (последние показаны точками на рис. 5), следует, что эта асимптотика справедлива уже при достаточно малых значениях  $L$ : при  $H \rightarrow 1$  расстояние  $L \approx 5$ , а при  $H \leq 0$   $L \approx 1,5$ .

2а. Сфера расположена над поверхностью ( $H \geq 1$ ), мишень горизонтальная:

$$F_{M-ОШ}^a = H(H^2 + L^2)^{-3/2}. \quad (7)$$

Расчет по (7) показывает, что максимальная облученность  $F_{M-ОШ}^a = 1$  имеет место, когда мишень расположена на оси сферы, причем ОШ касается поверхности земли (рис. 6). По мере увеличения высоты его центра облученность вблизи оси снижается, однако на далеких расстояниях превышает значения, соответствующие более низким высотам. Для высот сферы  $H \geq 10$  облученность горизонтальной площадки на расстояниях  $0 < L \leq H/2$  примерно одинаковая.

2б. Часть сферы расположена под поверхностью ( $-1 \leq H \leq 1$ ). В этом случае угловой коэффициент имеет вид:

$$F_{M-ОШ}^b = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{\sqrt{H^2 + L^2} - 1}{L} + \frac{1}{\pi(H^2 + L^2)} \left[ \frac{H}{\sqrt{H^2 + L^2}} \times \arccos \left( -\frac{H}{L} \sqrt{H^2 + L^2} - 1 \right) - \sqrt{(H^2 + L^2 - 1)(1 - H^2)} \right], \quad (8)$$

$$H \leq 1, \quad L \geq \sqrt{1 - H^2}.$$

Как следует из расчета по (8), показанного на рис. 7, по мере погружения излучающей сферы под поверхность облученность площадки при одинаковом удалении  $L$  уменьшается, обращаясь в нуль, когда  $H = -1$ . Асимптотическая зависимость углового коэффициента при значении  $L \gg 1$  дана на рис. 7 кружками. Как видно, она оказывается справедливой для  $H \rightarrow 1$ , начиная

с  $L \approx 3$ , при  $H \rightarrow 0$  – с  $L \approx 2$ , а при  $H \rightarrow -1$  – с  $L \approx 1$ . Асимптотическое поведение углового коэффициента описывается выражением

$$F_{\text{М-ОШ}}^{\delta} = \frac{1}{\pi L^3} \left[ H \arccos(-H) + \sqrt{1-H^2} (2+H^2)/3 \right], \quad L \gg 1 \quad (9)$$

Рассмотрим далее характеристики облученности, отвечающие излучению кругового цилиндра. Можно считать, что ОШ диффузионного горения топлива над разливом в первом приближении представляет собой излучающий круговой цилиндр. Введем безразмерную высоту цилиндра  $H$ , которую отнесем к его радиусу, а расстояние от мишени до оси цилиндра вдоль поверхности земли по-прежнему будет  $L = r/r_0$ :

$$H = l_0/r_0. \quad (10)$$

3а. Мишень расположена вертикально, ее расстояние от оси цилиндра равно  $L$ , нормаль к ней направлена на ось цилиндра:

$$F_{\text{М-ОШ}}^a = \frac{1}{\pi L} \left[ \operatorname{arctg} \frac{H}{\sqrt{L^2-1}} - H \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{L-1}{L+1}} + \frac{H(H^2+L^2+1)}{\sqrt{[(L+1)^2+H^2][(L-1)^2+H^2]}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{(L-1)[(L+1)^2+H^2]}{(L+1)[(L-1)^2+H^2]}} \right]. \quad (11)$$

3б. Мишень расположена горизонтально на поверхности:

$$F_{\text{М-ОШ}}^{\delta} = \frac{1}{\pi} \left[ \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{L+1}{L-1}} - \frac{H^2+L^2-1}{\sqrt{[(L+1)^2+H^2][(L-1)^2+H^2]}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{(L-1)[(L+1)^2+H^2]}{(L+1)[(L-1)^2+H^2]}} \right]. \quad (12)$$

При условии  $L \gg 1$  выражения (11) и (12) упрощаются. Их асимптотическое поведение описывается выражениями

$$F_{\text{М-ОШ}}^a \approx \frac{2H}{\pi L^2}, \quad F_{\text{М-ОШ}}^{\delta} = \frac{H^2}{\pi L^3}, \quad L \gg 1. \quad (13)$$

Облученности соответствующих площадок показаны на рис. 8, а их сопоставление представлено на рис. 9. Видно, что в широком интервале значений  $H$  на одинаковом расстоянии мишеней от оси цилиндра облученность вертикальной площадки гораздо выше, чем горизонтальной.

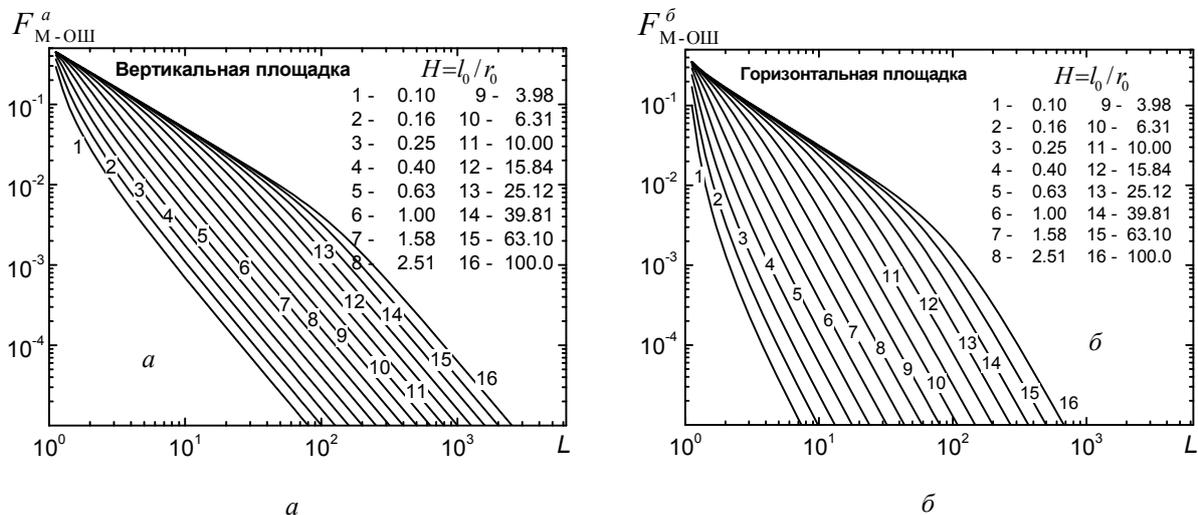


Рисунок 8 – Облученность вертикально (а) и горизонтально (б) расположенных мишеней излучением кругового цилиндра

Асимптотическое поведение угловых коэффициентов (13) представлено на рис. 9 в виде кружков и квадратов. Анализ показывает, что облученность вертикально ориентированной мишени выходит на асимптотику (13) при  $L \approx 2,5H$ , за исключением случая  $H \sim 10^{-1}$ , когда  $L \approx 40H$ . Асимптота (13) горизонтально расположенной мишени хорошо описывает ее облученность при  $L \geq 10H$ , когда  $H \geq 1$ , и  $L \sim 10^2 H$ , когда  $H \rightarrow 10^{-1}$ .

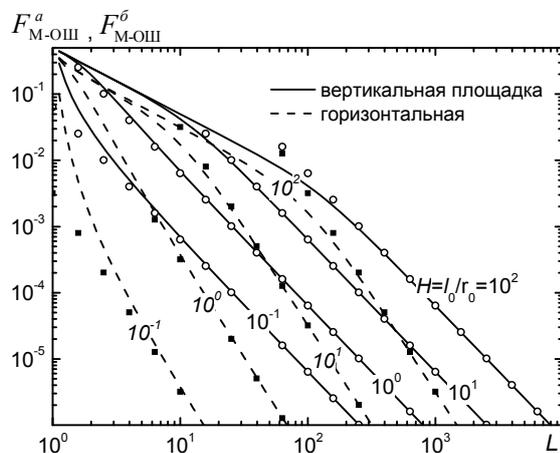


Рисунок 9 – Облученности цилиндрическим источником мишеней различной ориентации

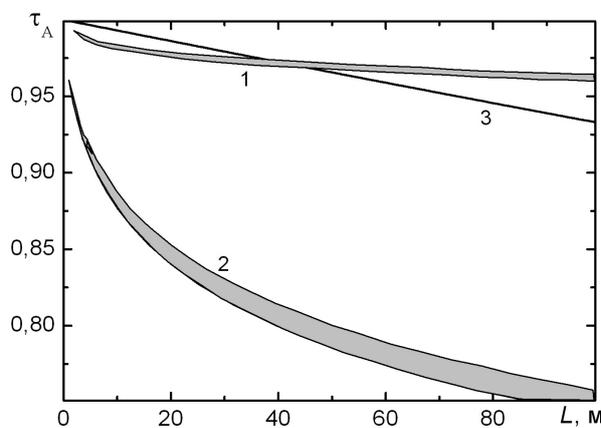


Рисунок 10 – Пропускание сухого (1) и влажного (2) воздуха; 3 – данные [5]

### ПРОПУСКАНИЕ АТМОСФЕРЫ

Использование угловых коэффициентов для определения облученности мишеней основано на предположении о том, что излучение ОШ изотропно, т. е. соответствует излучению абсолютно черного тела с эффективной температурой, определяемой тепловым потоком на его поверхности. В этом же приближении рассчитывался коэффициент пропускания атмосферы. Соответствующее выражение имеет вид:

$$\tau_A(L) = \frac{1}{q_P} \int_0^\infty q_{\omega P} \exp(-\kappa_\omega^A L) d\omega, \quad (14)$$

где  $\kappa_\omega^A$  – коэффициент поглощения воздуха при нормальных условиях;

$L$  – расстояние от поверхности ОШ до мишени.

Поглощение излучения ОШ в воздухе зависит от присутствия в нем малых концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . На рис. 10 дано пропускание атмосферы для сухого (1) и влажного (2) воздуха. Концентрация паров воды во влажном воздухе на уровне 1 % по объему заметно снижает пропускание атмосферы. Небольшой разброс в пропускании связан с тем, что величина эффективной температуры ОШ варьируется для различных источников в интервале 10 %. Прямая линия 3 – принятое в нормах пожарной безопасности [5] пропускание, имеющее вид  $\tau_A = \exp(-7,4 \cdot 10^{-4} L)$  и отвечающее постоянному коэффициенту поглощения.

### ПАРАМЕТРЫ ОГНЕННОГО ШАРА ВЗРЫВА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ И ГОРЮЧИХ СМЕСЕЙ

Из приведенных в [1] данных следует, что при взрывах конденсированных ВВ перераспределение энергии между продуктами взрыва и окружающей средой за счет работы сил

давления заканчивается ко времени  $t \leq 0,1$  с. Диаметр сферы с продуктами взрыва согласно формуле (6) из [1] можно представить как

$$D \approx \left( \frac{6}{\pi \rho_{\text{ПВ}}^0} \right)^{1/3} \left( \frac{p_{\text{ПВ}}^0}{p_\infty} \right)^{1/(3\gamma)} M^{1/3}, \quad (15)$$

где  $p_{\text{ПВ}}^0$  и  $\rho_{\text{ПВ}}^0$  – начальные давление и плотность в ПВ;  
 $M$  – масса ВВ;  
 $p_\infty \approx 1$  атм – давление на стадии развития ОШ;  
 $\gamma \approx 1,54$ .

Расчеты показывают, что прогреваемая ударной волной зона несколько больше занятой продуктами взрыва области. Если принять за границу ОШ поверхность с температурой  $10^3$  К, то в достаточно широком диапазоне масс заряда его диаметр равен

$$D \approx 1,88 M^{1/3}. \quad (16)$$

Здесь масса ВВ задается в килограммах, диаметр ОШ – в метрах.

Аналогичная (15) оценка размера ОШ взрыва горючей смеси при заданной массе  $M_{\text{Fuel}}$  горючего вещества дает:

$$D = \left( \frac{6}{\pi \rho_{\text{ТВС}}^0 \alpha_M} \right)^{1/3} \left( \frac{p_{\text{ПВ}}^0}{p_\infty} \right)^{1/(3\gamma)} M_{\text{Fuel}}^{1/3} = G M_{\text{Fuel}}^{1/3}, \quad (17)$$

где  $\alpha_M$  – массовая доля топлива в стехиометрической смеси с воздухом.

Учитывая, что плотность горючей смеси из-за сжатия в детонационной волне примерно вдвое выше плотности нормального воздуха, коэффициент  $G$  в соответствии с данными табл. 1 [1] лежит в интервале 4,3–5,5. Видно, что размер ОШ взрыва ВВ при одинаковой массе заряда в 2–3 раза меньше. Это обусловлено диссипацией энергии взрыва ВВ в гораздо большем объеме благодаря распространению сильной ударной волны. В результате на образование ОШ идет сравнительно малая доля полной энергии ВВ – порядка 10 % [4].

Аналогичные результаты можно получить, опираясь на соотношения размерности и подобия [6]. Поскольку различные типы ОШ взрывов характеризуются несколькими основными параметрами, среди которых энергия  $E$  (Дж), размер ОШ  $D$  (м), время его жизни  $t$  (с), объемная плотность энергии в ОШ  $\rho_{\text{ср}} T$  (Дж/м<sup>3</sup>) и величина теплового потока  $\sigma T^4$  (Дж/(м<sup>2</sup>·с)), то можно получить два независимых безразмерных комплекса. Один связан с диаметром ОШ, другой – со временем его жизни:

$$A = (\rho_{\text{ср}} T)^{1/3} D / E^{1/3}, \quad B = \sigma T^4 t / [(\rho_{\text{ср}} T)^{2/3} E^{1/3}]. \quad (18)$$

Предположив, что теплоемкость единицы объема  $\rho_{\text{ср}}$  для разных взрывов примерно одинакова, а энергия  $E$  пропорциональна  $M_{\text{Fuel}}$  (массе топлива), находим связь диаметра и времени существования ОШ с остальными его параметрами:

$$D = \frac{a}{T^{1/3}} M_{\text{Fuel}}^{1/3}, \quad t = \frac{b}{T^{10/3}} M_{\text{Fuel}}^{1/3}. \quad (19)$$

Как видно, диаметр ОШ зависит от его температуры. Чем выше температура при данной массе заряда, тем меньше размер ОШ. Это находит экспериментальное подтверждение при сравнении ОШ взрывов конденсированных ВВ, ракетного топлива и горючих смесей. Безразмерные коэффициенты  $a$  и  $b$  определяются путем привязки к опытным либо расчетным данным. В [6] содержатся данные о взрывах ракетного топлива, температура ОШ которого составляла около 2500 К. Опираясь на них, диаметр ОШ можно представить в виде:

$$D = 60M_{\text{Fuel}}^{1/3} / T^{1/3} = GM_{\text{Fuel}}^{1/3}. \quad (20)$$

В интервале температур  $T = 1300 \div 2000$  К из (20) находим значения  $G = 4,76 \div 5,5$ , весьма близкие к результатам гидродинамических оценок.

Длительность существования ОШ в соответствии с (19) сильно зависит от его температуры: «горячий» ОШ живет гораздо меньше «холодного». Из опытных данных [6] для ОШ взрыва ракеты с топливом, имеем:

$$t = 6,3 \cdot 10^{10} M_{\text{Fuel}}^{1/3} / T^{10/3} = SM_{\text{Fuel}}^{1/3}. \quad (21)$$

Использование этого выражения при температуре ОШ в том же интервале ( $T = 1300 \div 2000$  К) дает значения коэффициента  $S = 2,6 \div 0,63$ .

Рис. 11, *a* демонстрирует рассчитанный согласно (16) и (17) диаметр ОШ для ряда горючих смесей и ВВ, кружками отмечена зависимость, взятая из стандартов пожарной безопасности [5]. На рис. 11, *б* показана зависимость времени жизни ОШ от его температуры и массы топлива.

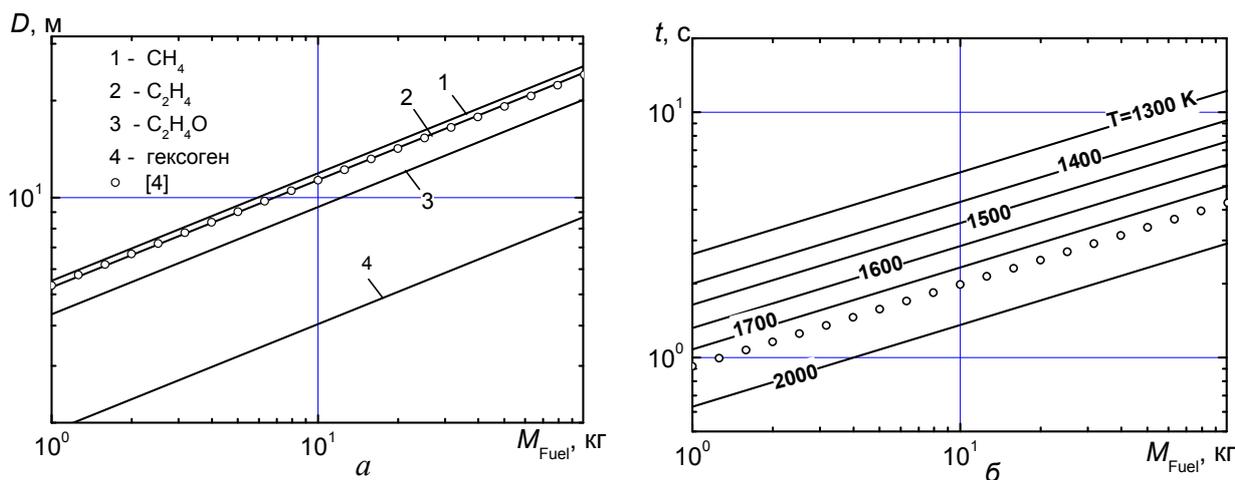


Рисунок 11 – Характерные размеры (*a*) и время жизни (*б*) ОШ взрыва

### ПАРАМЕТРЫ ОГНЕННОГО ШАРА ГОРЕНИЯ РАЗЛИТОГО ТОПЛИВА

К другому типу источников теплового излучения относятся ОШ, возникающие при горении топлива над проливом. Основное их отличие от ОШ взрыва состоит в стационарности процесса горения, вследствие чего тепловое воздействие может быть более сильным. Обычно считается, что в данном случае ОШ представляет собой излучающий круговой цилиндр. Соотношение между высотой и диаметром ОШ определяется процессами конвекции и может быть представлено в следующем виде [7]:

$$\frac{H}{D} = C \left( \frac{\dot{M}}{\rho_A g^{1/2} D^{1/2}} \right)^{2/3} = \frac{W}{D^{1/3}}. \quad (22)$$

В (22) стоящая в скобках величина – число Фруда для горения. Оно зависит от удельной массовой скорости выгорания топлива  $\dot{M}$ , кг/(м<sup>2</sup>·с), плотности окружающего воздуха  $\rho_A$ , ускорения свободного падения  $g$  и диаметра пламени  $D$ , безразмерный множитель  $C \approx 55$  [7]. При изменении величины  $\dot{M}$  для различных топлив в интервале 0,04–0,1, что отвечает переходу от нефти и дизельного топлива к бензину, метану и пропану, величина  $W$  находится в пределах 2,54–4,67. Эта оценка согласуется с экспериментальными данными [6] по горению пролитых нефтепродуктов и с данными [5], где коэффициент  $C \approx 42$ , а показатель степени числа Фруда равен 0,61.

### РАСЧЕТЫ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ОКРЕСТНОСТИ ОГНЕННОГО ШАРА

В качестве примеров применения изложенной выше модели приведем расчеты теплового излучения ОШ и стационарного цилиндрического факела, которое попадает на мишени. Рассмотрим взрыв топливно-воздушной смеси. Пусть масса топлива (метана) составляет 93 кг. Масса стехиометрической горючей смеси равна  $M_{\text{ТВС}} \approx 1,72 \cdot 10^3$  кг, а занимаемый ею объем имеет диаметр 13,6 м. Согласно соотношению (3) из [1], диаметр области, занятой продуктами взрыва, которая совпадает с ОШ, к окончанию гидродинамической фазы оказывается равным  $D = 25$  м, если принять начальное давление в ПВ близким к 10 атм, а их показатель адиабаты  $\gamma_{\text{ПВ}} \approx 1,3$ . Этот же размер ОШ взрыва метана следует из табл. 1 [1] и (17). Эффективная температура излучения ОШ  $T_{\text{эф}}$ , определяемая соотношением  $\sigma T_{\text{эф}}^4 = \varepsilon \sigma T^4$  ( $T = 2210$  К – адиабатическая температура сгорания метана), равна 1650 К. Зависимость теплового потока на вертикально расположенной мишени от ее расстояния  $r$  до оси ОШ и высоты центра ОШ  $h$  показана на рисунке 12, где уровень потока излучения обозначен цифрой у изолиний. Как показывают расчеты [4], тепловой поток на вертикальной мишени может на порядок и более превышать соответствующую величину на горизонтальной мишени. С ростом высоты центра ОШ различие уменьшается. Это связано со средним значением угла между направлением на ОШ и нормалью к поверхности мишени.

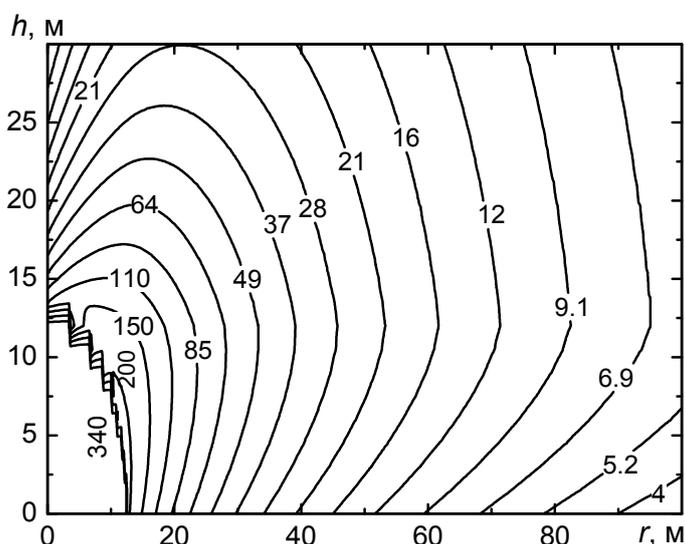


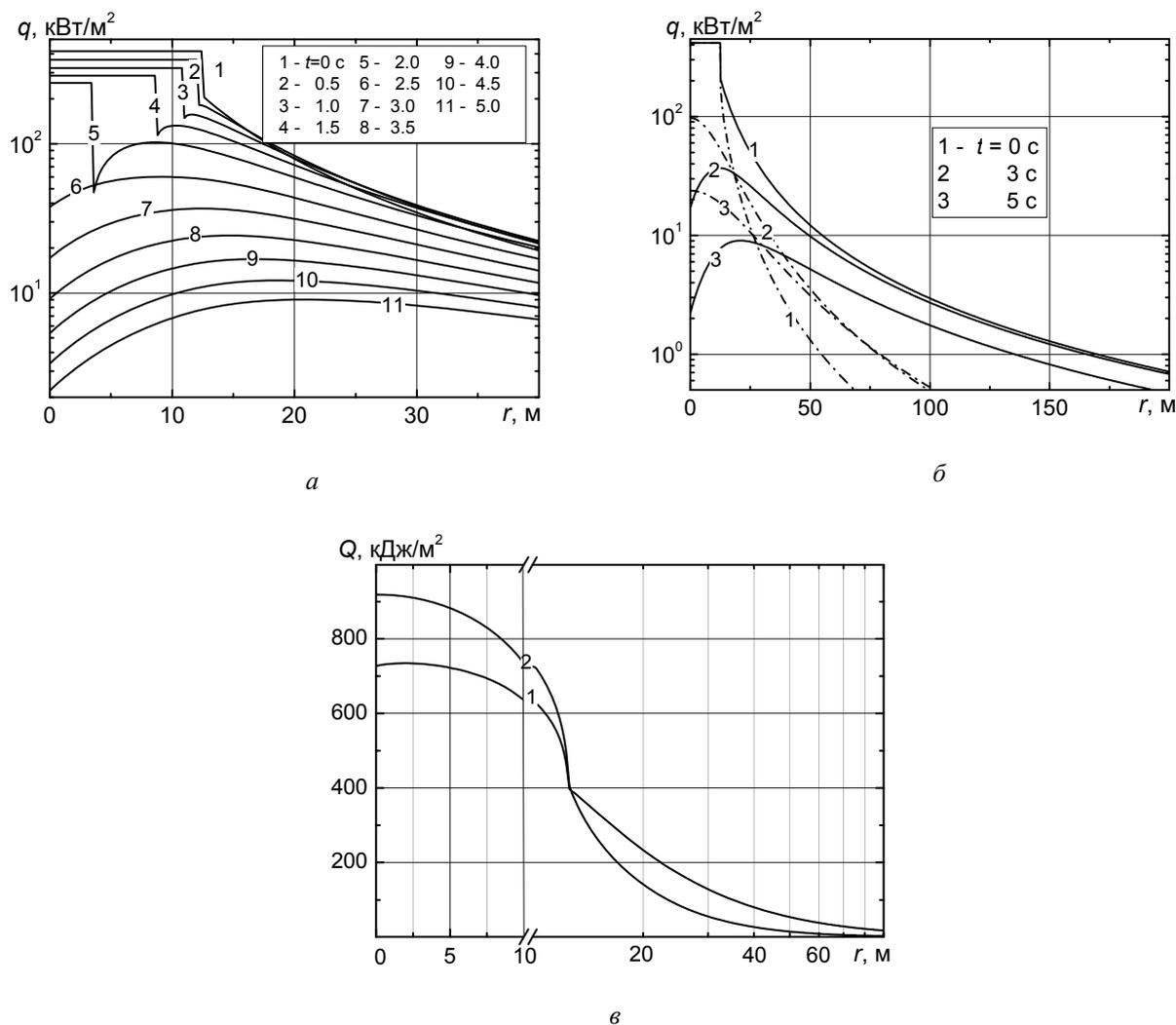
Рисунок 12 – Поток (кВт/м<sup>2</sup>) на вертикальной мишени как функция расстояния до эпицентра и высоты ОШ

Влияние охлаждения и всплытия ОШ можно приближенно учесть путем задания временного хода температуры и положения центра ОШ. Пусть в начальный момент времени он имеет форму полусферы, что соответствует наземному взрыву. Диаметр – ОШ 25 м, скорость подъема – 6 м/с, начальная температура – 2200 К, ее изменение со временем:

$$T(t) = a + b \exp(-t/t_1) + c \exp(-t/t_2),$$

где  $a \approx 957$ ;  $b \approx 487$ ;  $c \approx 756$ ;  $t_1 \approx 2,59$ ;  $t_2 \approx 12,1$ ; время жизни ОШ – около 5 с.

Распределение плотности теплового потока на мишени в зависимости от ее ориентации и расстояния от оси ОШ взрыва в последовательные моменты времени изображено на рис. 13, а, б. Предполагается, что когда мишень оказывается внутри ОШ, падающий на нее поток равен потоку на его поверхности. Радиальное распределение энергии, попавшей на мишень за время жизни ОШ, показано на рис. 13, в. Как видно, при  $r > R_{\text{ОШ}}$  вертикально ориентированная мишень подвергается более сильному (в 2–3 раза) облучению, чем мишень, лежащая на том же расстоянии на поверхности. В приведенных расчетах пропускание атмосферы определялось на основе данных для сухого воздуха.



**Рисунок 13 – Тепловой поток на вертикальной мишени в зависимости от времени и расстояния (а); сравнение тепловых потоков на вертикальных (сплошные линии) и горизонтальных (штриховые кривые) мишенях (б); профиль энерговыделения за время жизни ОШ на мишени с вертикальной (1) и горизонтальной (2) ориентацией (в)**

Когда известны тепловые нагрузки на приемники излучения и их длительность, для оценки степени поражения используют пороговую зависимость, которая связывает плотность теплового потока  $q$  и энергию  $Q$ , падающую на единицу поверхности [6]. Диаграмма  $q-Q$  аналогична диаграмме  $p-I$ , используемой для оценки действия ударной волны [8].

Импульс  $I$  есть интеграл по времени от избыточного давления  $I = \int \Delta p dt$ , энергия на мишени равна интегралу от теплового потока  $Q = \int q dt$ . Во взрывной волне избыточное давление определяет величину деформации (разрушения) в режиме квазистатического нагружения ( $\omega\tau \gg 1$ ,  $\omega$  – собственная частота конструкции,  $\tau$  – длительность положительной фазы давления). В противоположном случае ( $\omega\tau \ll 1$ ) продолжительность действия избыточного давления мала по сравнению со временем реакции конструкции, ударная волна сообщает конструкции начальную скорость. При этом деформация пропорциональна импульсу давления  $I$ . Аналогично, если длительность теплового излучения велика по сравнению со временем реакции мишени (в данном случае временем теплопереноса от места поглощения), критической величиной для воздействия является тепловой поток  $q$ , так как он определяет температуру поверхности. Если же время воздействия мало, нагрев поверхности определяется попавшей на нее энергией  $Q$ .

В стандартах пожарной безопасности [5] часто используются комбинированные критерии поражения, включающие величину теплового потока и длительность воздействия. Такая информация для горения легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) и горючих жидкостей (ГЖ) представлена в табл. 1.

Таблица 1 – Предельно допустимые потоки излучения при горении ЛВЖ и ГЖ

Степень поражения	$q$ , кВт/м <sup>2</sup>
Без негативных последствий в течение длительного действия	1,4
Безопасно для человека в брезентовой одежде	4,2
Непереносимая боль через 20–30 с Ожог 1-й степени через 6–8 с Ожог 2-й степени через 30–40 с Воспламенение хлопка-волокна через 15 мин	7,0
Непереносимая боль через 3–5 с Ожог 1-й степени через 15–20 с Ожог 2-й степени через 12–16 с	10,5
Воспламенение древесины с шероховатой поверхностью (влажность 12 %) при длительности облучения 15 мин	12,9
Воспламенение древесины, окрашенной масляной краской по строганой поверхности, воспламенение фанеры	17,0

Как следует из приведенных данных, тепловой поток на уровне 7–10 кВт/м<sup>2</sup> вызывает ожоги различной степени и нестерпимую боль, когда он действует в течение 3–40 с. При этом температура поверхностного слоя кожи толщиной 0,1 мм достигает 44,8 °С. В рассмотренном выше примере взрыва метана с массой топлива 93 кг потоки излучения, вызывающие ожоги, реализуются на расстоянии  $\approx 50$  м от эпицентра.

В табл. 2 представлены критические для воспламенения некоторых горючих материалов потоки теплового излучения [9]. Эти данные позволяют определить зоны безопасности и их зависимость от параметров источников теплового излучения.

Сопоставим критические потоки из табл. 2 с интенсивностью излучения стационарного цилиндрического факела, расчет которого дан на рисунке 14. При удельной скорости выгорания топлива 0,08 кг/(м<sup>2</sup>·с) высота факела диаметром 20 м, согласно (22), составляет 29,5 м. Уровень тепловых потоков на вертикально ориентированной мишени у поверхности земли отвечает пересечению пунктирной прямой, соответствующей этой высоте факела, с изолиниями интенсивностей. Из графика следует, что на расстоянии 100 м тепловой поток превышает пороговую величину возникновения ожогов (7 кВт/м<sup>2</sup>), а радиус зоны воспламенения горючих материалов составляет  $\leq 60$  м (см. табл. 2).

Таблица 2 – Величины  $q_{кр}$  для воспламенения горючих материалов

Материалы	$q_{кр}$ , кВт/м <sup>2</sup>	Материалы	$q_{кр}$ , кВт/м <sup>2</sup>		
Древесно-стружечные плиты	8,3	Кожа искусственная	17,9–20,0		
Торф брикетный	13,2	Лакокрасочные покрытия	25,0		
Хлопок-волокно	7,5	Линолеум ПВХ	10,0–12,0		
Слоистый пластик	15,4	Покрытие ковровое	4,0–6,0		
Резина	14,8	Сено, солома (при минимальной влажности до 8 %)	7,0		
Уголь	35,0				
Рулонная кровля	17,4	ЛВЖ, ГЖ при температуре самовоспламенения, °С:			
Картон серый	10,8				
Декоративный бумажно-слоистый пластик	19,0–24,0			300	12,1
				350	15,5
Металлопласт	24,0–27,0			400	19,9
Плита древесно-волоконная	13,0	500 и выше	≥ 28,0		
Плита древесно-стружечная	12,0				

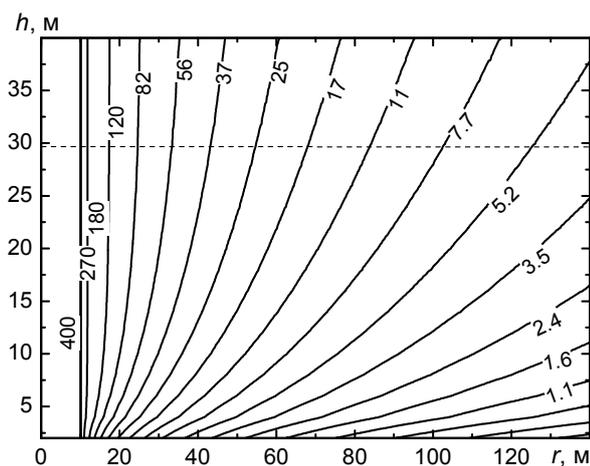


Рисунок 14 – Плотность теплового потока  $q$  (кВт/м<sup>2</sup>) на вертикальной мишени как функция  $h$  и  $r$  для стационарно горящего факела диаметром 20 м

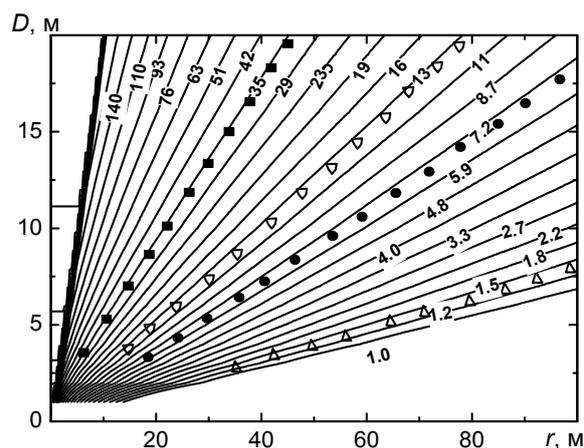


Рисунок 15 – Плотность теплового потока  $q$  (кВт/м<sup>2</sup>) как функция расстояния и диаметра пролива углеводородного топлива

В заключение рассмотрим результаты расчетов тепловых нагрузок на приемники излучения при горении над проливом углеводородного топлива (метана). На рис. 15 изображены изолинии плотности теплового потока на вертикально расположенной площадке у поверхности земли. Абсцисса – расстояние площадки до оси пламени, ордината – диаметр области горения. Высота факела принята равной  $H = 4D^{2/3}$ , что соответствует соотношению (22) для метана. Слева от черной жирной линии находится область горения. На графике показаны зоны, где достигается критическая величина теплового потока для горения угля  $q_{кр} \approx 35$  кВт/м<sup>2</sup>, возгорания древесины  $q_{кр} \approx 13$  кВт/м<sup>2</sup>, появления ожогов различной степени  $q_{кр} \approx 7$  кВт/м<sup>2</sup>. Отмечены расстояния, на которых тепловое излучение факела примерно равно потоку солнечного излучения.

Полученные данные представляют, по-видимому, оценку сверху теплового воздействия взрыва и горения углеводородного топлива. Это связано в основном с предположением о стехиометрическом составе горючих смесей. Любое отклонение от него приводит к уменьшению температуры ОШ, что обусловлено либо неполным сгоранием топлива, т. е. уменьшением его эффективной массы, либо рассеянием выделившейся энергии на большую, чем стехиометрическая, массу горючей смеси. Действительно, как показывают расчеты, недостаток или избыток воздуха в 30 % к его количеству в стехиометрической смеси с метаном снижают температуру ОШ примерно на 270 К. Функция пропускания воздуха из-за наличия в нем паров воды может быть меньше, чем принятое в расчетах пропускание сухого воздуха. Процессы перемешивания продуктов взрыва с окружающим воздухом также ведут к понижению температуры ОШ и уменьшают его тепловое воздействие.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные результаты, изложенные в данной работе (части I [1] и II).

Исследована динамика передачи энергии от продуктов взрыва окружающей среде и найдены соотношения между энергией, ушедшей на совершение работы расширения, и энергией, оставшейся в ОШ взрыва. Показано, что длительность гидродинамической фазы значительно меньше времени жизни ОШ. Поэтому на стадии его эволюции и радиационного остывания давление вблизи эпицентра близко к атмосферному, а ударная волна, вырождаясь в звуковую волну, уходит на значительные расстояния.

Для стехиометрической смеси метана с воздухом определены спектральные коэффициенты поглощения продуктов сгорания в широком диапазоне температур. Рассчитаны степени черноты изотермических объемов простой геометрии, спектральные и интегральные потоки выходящего излучения.

Исследованы характеристики теплового воздействия ОШ взрыва и стационарного факела горения разлитых углеводородных топлив. С этой целью рассчитаны угловые характеристики, определяющие облученность мишеней источниками излучения различной конфигурации, найдены параметры пропускания излучения сухой и влажной атмосферы.

На основе выполненных расчетов гидродинамической стадии взрыва получены соотношения, связывающие массу топлива с размером ОШ.

Определены тепловые потоки и энергии излучения на мишени при воздействии ОШ взрыва и факела горения над пролитым углеводородным топливом.

Проведено сравнение полученных результатов с литературными данными и нормами, принятыми в стандартах пожарной безопасности.

Созданные в работе физические и компьютерные модели, программные средства для описания теплового воздействия взрыва и горения топлива показали высокую эффективность.

Работа выполнена при поддержке проекта № 39 ГППНИ «Снижение рисков чрезвычайных ситуаций».

### ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов, К.Л. Тепловое излучение взрыва: оценки риска термического поражения людей и возникновения пожаров. I / К.Л. Степанов, Л.К. Станциц, Ю.А. Станкевич // Вест. Команд.-инженер. института МЧС Респ. Беларусь. – 2010. – № 2.
2. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель. Дж.М. Хауэлл. – Мир, 1975. – 934 с.
3. Howell, J.R. A catalog of radiation heat transfer configuration factor / J.R. Howell (<http://www.me.utexas.edu/~howell/index.html>).
4. Степанов, К.Л. Моделирование теплового излучения взрыва: оценки риска термического поражения людей и возникновения пожаров / К.Л. Степанов, Л.К. Станциц, Ю.А. Станкевич. – Минск, 2010. – 48 с. - (Препринт / Акад. Наук Беларуси, Ин-т тепло- и массообмена, № 1).
5. Нормы пожарной безопасности МЧС Российской Федерации “Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности” НПБ 105-03. (<http://www.0-1.ru/law/showdoc.asp?dp=npb105-03>).

6. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2 т. / Под ред. Я.Б. Зельдовича. – М.: Мир, 1987.
7. Raj, P.K. Large LNG fire thermal radiation – modeling issues & hazard criteria revisited / P.K. Raj // Proc. Safety Progress. – 2005. V. 24, No. 3. P. 192–202.
8. Гельфанд, Б.Е. Фугасные эффекты взрывов / Б.Е. Гельфанд, М.В. Сильников – СПб.: Полигон, 2004. – 267 с.
9. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. [http://fire.mchs.gov.ru/docs/?ID=597&SECTION\\_ID=75](http://fire.mchs.gov.ru/docs/?ID=597&SECTION_ID=75) Зарегистрирована в Минюсте РФ 17. 08. 2009 г. N 14541.