

Прогнозирование последствий аварийного сценария «Пожар пролива»

1. Общие сведения

Пожар пролива легковоспламеняющихся и горючих жидкостей - неконтролируемый процесс горения пролива легковоспламеняющихся и горючих жидкостей.

Резервуары и резервуарные парки, как основные сооружения складов нефти и нефтепродуктов, широко распространены в отраслях промышленности. В связи с этим проблема обеспечения безопасности при транспортировке и хранении нефтепродуктов приобретает первостепенное значение.

Поражающим воздействием от пожара пролива является тепловое излучение, величина которого определяется по методике расчета, представленной в ГОСТ Р 12.3.047-2012 (Приложение В - "Метод расчета интенсивности теплового излучения при пожарах проливов легковоспламеняющихся и горючих жидкостей")

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".

2. Метод расчета интенсивности теплового излучения при пожарах пролива легковоспламеняющихся и горючих жидкостей

Интенсивность теплового излучения q (кВт / м²) для пожара пролива легковоспламеняющихся (ЛВЖ), горючих жидкостей (ГЖ), сжиженного природного газа (СПГ) сжиженного углеводородного газа (СУГ) определяется по формуле

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau \quad 1$$

где E_f — среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, кВт/м²;
 F_q — угловой коэффициент облученности; τ — коэффициент пропускания атмосферы.
Значение E_f , принимается на основе имеющихся экспериментальных данных или по таблице.

Таблица В.1 — Среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени в зависимости от диаметра очага d и удельная массовая скорость выгорания m для некоторых жидких углеводородных топлив

Топливо	E_f , кВт/м ² , при d , м					m , кг/(м ² · с)
	10	20	30	40	50	
СПГ	220	180	150	130	120	0,08
СУГ (пропан-бутан)	80	63	50	43	40	0,1
Бензин	60	47	35	28	25	0,06
Дизельное топливо	40	32	25	21	18	0,04

Примечание - Для диаметров очага менее 10 м или более 50 м следует принимать E_f такой же, как и для очагов диаметром 10 м и 50 м соответственно.

В.3. Рассчитывают эффективный диаметр пролива d , м, по формуле

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}, \quad (B.2)$$

где S - площадь пролива, м².

В.4. Рассчитывают высоту пламени H , м, по формуле

$$H = 42d \left(\frac{m}{\rho_e \sqrt{gd}} \right)^{0,61}, \quad (B.3)$$

где m - удельная массовая скорость выгорания топлива, кг/(м²·с);
 ρ_e - плотность окружающего воздуха, кг/м³;
 g - ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с².

При отсутствии данных для нефти и нефтепродуктов допускается величину E_f (кВт/м²) определять по формуле

$$E_f = 140 \cdot e^{-0,12d} + 20 \cdot (1 - e^{-0,12d}), \quad (B.2)$$

где d - эффективный диаметр пролива, м.

e - основание натурального логарифма, равное 2,7.

При отсутствии данных допускается E_f принимать равной 100 кВт/м² для СУГ, 40 кВт/м² для нефтепродуктов.

При отсутствии данных для однокомпонентных жидкостей допускается величину E_f (кВт/м²) определять по формуле

$$E_f = \frac{0,4 \cdot m' \cdot H_{сг}}{\left(1 + 4 \cdot \frac{L}{d} \right)}, \quad (B.3)$$

где m' - удельная массовая скорость выгорания, кг/(м²·с);
 $H_{сг}$ - удельная теплота сгорания, кДж/кг;
 L - длина пламени, м.

При отсутствии данных для однокомпонентных жидкостей допускается величину m' , кг/(м²·с), определять по формуле

$$m' = \frac{0,001 \cdot H_{сг}}{L_g + C_p(T_b - T_a)}, \quad (B.4)$$

где L_g - удельная теплота испарения жидкости, кДж/кг;
 C_p - удельная теплоемкость жидкости, кДж/(кг·К);

T_b - температура кипения жидкости при атмосферном давлении, К;

T_a - температура окружающей среды, К.

Для многокомпонентных смесей жидкостей допускается определение значений E_f и m' по компонентам, для которых величины E_f и m' максимальны.

В.2 Угловой коэффициент облученности F_q определяется по формуле

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}, \quad (B.5)$$

где F_V , F_H - факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок, соответственно, определяемые для площадок, расположенных в 90° секторе в направлении наклона пламени, по следующим формулам:

$$F_V = \frac{1}{\pi} \left\{ \begin{aligned} & -E \cdot \operatorname{arctg} D + E \cdot \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot b \cdot (1 + a \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right] \operatorname{arctg} \left(\frac{A \cdot D}{B} \right) + \\ & + \frac{\cos \theta}{C} \cdot \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] + \operatorname{arctg} \left(\frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \end{aligned} \right\} \quad (B.6)$$

$$F_H = \frac{1}{\pi} \left\{ \begin{aligned} & \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{1}{D} \right) + \frac{\sin \theta}{C} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] \right] - \\ & - \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot (b+1) \cdot a \cdot \sin \theta}{A \cdot B} \right] \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{A \cdot D}{B} \right) \end{aligned} \right\} \quad (\text{B.7})$$

$$a = \frac{2 \cdot L}{d}, \quad (\text{B.8})$$

$$b = \frac{2 \cdot X}{d}, \quad (\text{B.9})$$

$$A = \sqrt{(a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b+1) \cdot \sin \theta)}, \quad (\text{B.10})$$

$$B = \sqrt{(a^2 + (b-1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b-1) \cdot \sin \theta)}, \quad (\text{B.11})$$

$$C = \sqrt{(1 + (b^2 - 1) \cdot \cos^2 \theta)}, \quad (\text{B.12})$$

$$D = \sqrt{\left(\frac{b-1}{b+1} \right)}, \quad (\text{B.13})$$

$$E = \frac{a \cdot \cos \theta}{b - a \cdot \sin \theta}, \quad (\text{B.14})$$

$$F = \sqrt{(b^2 - 1)}, \quad (\text{B.15})$$

где X - расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта, м;

d - эффективный диаметр пролива, м;

L - длина пламени, м;

θ - угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра.

Для площадок, расположенных вне указанного сектора, а также в случаях отсутствия ветра факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок рассчитываются по формулам В.6-В.15 и В.18, принимая $\theta = 0$.

Эффективный диаметр пролива d (м) рассчитывается по формуле

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi}}, \quad (\text{B.16})$$

где F - площадь пролива, м².

Длина пламени L (м) определяется по формулам:

при $u_k \geq 1$

$$L = 55 \cdot d \cdot \left(\frac{m'}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0,67} \cdot u_*^{0,21} \quad (B.17)$$

при $u_* < 1$

$$L = 42 \cdot d \cdot \left(\frac{m'}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0,61}, \quad (B.18)$$

где u_*

$$u_* = \frac{w_0}{\sqrt[3]{\frac{m' \cdot g \cdot d}{\rho_a}}}, \quad (B.19)$$

где m' - удельная массовая скорость выгорания топлива, кг/(м²·с);

ρ_a - плотность окружающего воздуха, кг/м³;

w_0 - скорость ветра, м/с;

g - ускорение свободного падения (9,81 м/с²).

Угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра θ рассчитывается по формуле

$$\cos \theta = \begin{cases} 1, & \text{при } u_* < 1 \\ u_*^{-0,5}, & \text{при } u_* \geq 1. \end{cases} \quad (B.20)$$

Коэффициент пропускания атмосферы τ для пожара пролива определяется по формуле

$$\tau = \exp[-7 \cdot 10^{-4} \cdot (X - 0,5 \cdot d)]. \quad (B.21)$$

Интенсивность теплового излучения q (кВт / м²) для пожара пролива

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau$$

В таблице В.2 представлены типичные значения предельно допустимой интенсивности теплового излучения для различных степеней поражения.

Таблица В.2 - Типичные значения предельно допустимой интенсивности теплового излучения для различных степеней поражения

Степень поражения	Типичные предельно допустимые значения интенсивности теплового излучения, кВт/м ²
Без негативных последствий в течение длительного времени	1,4
Безопасно для человека в брезентовой одежде	4,2
Непереносимая боль через 20-30 с	7,0
Ожог 1-й степени через 15-20 с	
Ожог 2-й степени через 30-40 с	
Воспламенение хлопка-волокна через 15 мин	
Воспламенение древесины, окрашенной масляной краской по строганной поверхности; воспламенение фанеры	17,0

Непереносимая боль через 3-5 с Ожог 1-й степени через 6-8 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 строганной поверхности; воспламенение фанеры	17,0

Плотность воздуха при нормальных условиях 1.293 кг/м^3
 $(1.225 \text{ кг/м}^3 \text{ Стандарт ISA } \rho[\text{кг/м}^3]=p[\text{Па}]/\{R[287.058 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})]\cdot T[\text{К}]\})$

ρ_n - плотность насыщенных паров топлива при температуре кипения, кг/м^3 ;

$$\rho_n = \frac{M}{V_0(1 + 0,00367 \cdot t_p)}, \quad \text{кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

где M - молярная масса, $\text{кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$;
 V_0 - мольный объем, равный $22,413 \text{ м}^3\cdot\text{кмоль}^{-1}$;
 t_p - расчетная температура, $^{\circ}\text{C}$.
 Если $M = 58,08$

$$\rho_n = \frac{M}{V_0(1 + 0,00367 \cdot t_p)} = \frac{58,08}{22,413 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 36)} = 2,29 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

Если молекулярная масса паров M , то плотность его паров при н.у. будет равна $1.29 \cdot M/29 [\text{кг/м}^3]$, где 1.29 - плотность воздуха при н.у., 29 - молекулярная масса воздуха, кг/м^3

Для бензина $1.29 \cdot 95.3/29 \text{ кг/м}^3 = 4,239 \text{ кг/м}^3$

Для бензина C_7H_{14} молекулярная масса $M = 97 \text{ кг/кмоль}$

Вероятностные критерии поражения тепловым излучением

Для поражения человека тепловым излучением величина пробит-функции описывается следующими выражениями:

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

где t - эффективное время экспозиции, с; q - интенсивность теплового излучения, $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-2}$, Величина эффективного времени экспозиции t вычисляется по формуле:

$$t = t_0 + \frac{x_0}{u_{\text{ср}}}$$

t_0 характерное время, за которое человек обнаруживает пожар и принимает решение о своих дальнейших действиях, с (принимается равным 5 с);

x_0 - расстояние от места расположения человека до безопасной зоны (зона, где

интенсивность теплового излучения меньше 4 кВт/м^2), м;

$u_{\text{ср}}$ - средняя скорость движения человека к безопасной зоне, м/с (принимается 5 м/с).

Вероятность поражения человека выражается через пробит-функцию:

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

При использовании пробит-функции в качестве зон стопроцентного поражения принимаются зоны поражения, где значение пробит-функции достигает величины, соответствующей вероятности в 90%. В качестве зон, безопасных с точки зрения воздействия поражающих факторов, принимаются зоны поражения, где значения пробит-функции достигают величины, соответствующей вероятности в 1%.

Условная вероятность поражения человека, попавшего в зону непосредственного воздействия пламени пожара, пролива или факела, принимается равной 1.

Для пожара-вспышки следует принимать, что условная вероятность поражения человека, попавшего в зону воздействия высокотемпературными продуктами сгорания газопаровоздушного облака, равна 1. За пределами этой зоны условная вероятность поражения человека принимается равной 0.

При расчете вероятности поражения человека тепловым излучением рекомендуется учитывать возможность укрытия (например, в здании или за ним).

Пример. Определение интенсивности теплового излучения от пожара пролива бензина.

Данные для расчета

В качестве наружной установки в настоящем примере рассматривается резервуарный парк бензина, условно размещаемый на территории производственного объекта.

В состав резервуарного парка бензина (бензин марки АИ-93) входят 2 резервуара объемом по 10000 м^3 каждый (диаметр резервуара $34,2 \text{ м}$; высота – $11,92 \text{ м}$) и 2 трубопровода бензина (вход и выход продукта из каждого резервуара осуществляется по одному патрубку) диаметром 900 мм , суммарная длина трубопроводов парка $L_{\text{труб}}$ составляет 200 м . Резервуары стальные вертикальные цилиндрические с купольной крышей без понтона. Парк имеет ограждающую стену, рассчитанную на гидростатическое давление разлившейся жидкости. Площадь внутри обвалования (ограждения) парка составляет 7000 м^2 .

Свойства бензина принимались по бензину АИ-93 (зимний): молярная масса – $95,3 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$; температура вспышки минус $37 \text{ }^\circ\text{C}$; константы уравнения Антуана в диапазоне температур минус $60 \div 90 \text{ }^\circ\text{C}$: $A = 4,26511$, $B = 695,019$, $C_A = 223,220$; $C_{\text{НКПР}} = 1,1 \text{ \% (об.)}$.

Плотность паров бензина при температуре кипения $T_k = 95 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\rho_{\text{п}} = \frac{M}{V_0(1 + 0,00367 \cdot t_p)} = \frac{95,3}{22,413 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 95)} = 3,15278 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3};$$

где M - молярная масса, $\text{кг}\cdot\text{кмоль}^{-1}$;

V_0 - мольный объем, равный $22,413 \text{ м}^3\cdot\text{кмоль}^{-1}$;

t_p - расчетная температура, $^{\circ}\text{C}$.

Площадь очага пожара, в случае пожара одного из резервуаров по всей поверхности, принималась равной:

$$F_{\text{п}} = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = 3,14 \cdot \frac{34,2^2}{4} = 918,6 \text{ м}^2.$$

Расчет

Рассматривается сценарий пожара в резервуарном парке бензина при горении одного из резервуаров с бензином, расположенного в обваловании.

Рассчитывается интенсивность теплового излучения пожара бензина площадью $F_{\text{п}}$ (пожар резервуара по всей поверхности) в точке, расположенной на расстоянии $r = 20$ м от границы очага пожара, при ветре со скоростью $w_0 = 20 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ в направлении облучаемого объекта.

Эффективный диаметр пролива d рассчитываем по формуле (В.16):

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{п}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 918,6}{3,14}} \approx 34,2 \text{ м},$$

где $F_{\text{п}}$ - площадь пролива, м^2 .

Удельная массовая скорость выгорания бензина согласно таблице В.1 принималась равной $m' = 0,06 \text{ кг}\cdot(\text{м}^2\cdot\text{с})^{-1}$.

Плотность окружающего воздуха при расчетной температуре $\rho_a = 1,15 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$, плотность насыщенных паров топлива (бензина) при температуре кипения $\rho_{\text{п}} = 3,196 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Находим параметр u_* по формуле (В.19):

$$u_* = \frac{w_0}{\sqrt[3]{\frac{m' \cdot g \cdot d}{\rho_{\text{п}}}}} = \frac{20}{\sqrt[3]{\frac{0,06 \cdot 9,81 \cdot 34,2}{3,196}}} = 10,83 \text{ ,}$$

где m' - удельная массовая скорость выгорания топлива, $\text{кг} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{с})^{-1}$;

$\rho_{\text{в}}$ - плотность окружающего воздуха, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

$\rho_{\text{п}}$ - плотность насыщенных паров топлива при температуре кипения, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

w_0 - скорость ветра, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$;

g - ускорение свободного падения.

Находим длину пламени по формуле (В.17):

$$L = 55 \cdot 34,2 \cdot \left(\frac{0,06}{1,15 \cdot \sqrt{9,8 \cdot 34,2}} \right)^{0,67} \cdot 10,83^{0,21} = 61,13 \text{ м.}$$

По формуле (В.20) находим угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра θ :

$$\cos\theta = u_*^{-0,5} = 10,83^{-0,5} = 0,304; \theta = \arccos 0,304 = 1,26214 \text{ рад.}$$

Расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта:

$$X = r + 0,5 \cdot d = 20 + 0,5 \cdot 34,2 = 37,1 \text{ м.}$$

Выполним расчет факторов облученности $F_{\text{в}}$ и $F_{\text{н}}$.

По формуле (В.8) находим a :

$$a = \frac{2 \cdot L}{d} = \frac{2 \cdot 61,13}{34,2} = 3,575$$

По формуле (В.9) находим b :

$$b = \frac{2 \cdot X}{d} = \frac{2 \cdot 37,1}{34,2} = 2,17$$

По формуле (В.10) находим A :

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{(a^2 + (b + 1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b + 1) \cdot \sin\theta)} = \\ &= \sqrt{(3,575^2 + (2,17 + 1)^2 - 2 \cdot 3,575 \cdot (2,17 + 1) \cdot \sin 1,262)} = 1,112 \end{aligned}$$

По формуле (В.11) находим B :

$$\begin{aligned} B &= \sqrt{(a^2 + (b - 1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b - 1) \cdot \sin\theta)} = \\ &= \sqrt{(3,575^2 + (2,17 - 1)^2 - 2 \cdot 3,575 \cdot (2,17 - 1) \cdot \sin 1,262)} = 2,486 \end{aligned}$$

По формуле (В.12) находим C :

$$C = \sqrt{1 + (b^2 - 1) \cdot \cos^2\theta} = \sqrt{1 + (2,17^2 - 1) \cdot \cos^2 1,262} = 1,159$$

По формуле (В.13) находим D :

$$D = \sqrt{\frac{b - 1}{b + 1}} = \sqrt{\frac{2,17 - 1}{2,17 + 1}} = 0,607$$

По формуле (В.14) находим E :

$$E = \frac{a \cdot \cos\theta}{b - a \cdot \sin\theta} = \frac{3,3 \cdot \cos 1,262}{2,17 - 3,575 \cdot \sin 1,262} = -0,879$$

По формуле (В.15) находим F :

$$F = \sqrt{(b^2 - 1)} = \sqrt{(2,17^2 - 1)} = 1,925$$

По формуле (В.6) определяем значение фактора облученности для вертикальной площадки F_V :

$$F_V = \frac{1}{\pi} \cdot \left[-E \cdot \arctg D + E \cdot \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot b \cdot (1 + a \cdot \sin\theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \arctg \left(\frac{A \cdot D}{B} \right) + \frac{\cos\theta}{C} \right. \\ \left. \cdot \left[\arctg \left(\frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin\theta}{F \cdot C} \right) + \arctg \left(\frac{F^2 \cdot \sin\theta}{F \cdot C} \right) \right] \right]$$

$$F_V = \frac{1}{3,14} \cdot \left[-(-0,879) \cdot \arctg 0,607 + (-0,879) \right. \\ \left. \cdot \left[\frac{3,575^2 + (2,17 + 1)^2 - 2 \cdot 2,17 \cdot (1 + 3,575 \cdot \sin 1,262)}{1,112 \cdot 2,486} \right] \cdot \arctg \left(\frac{1,112 \cdot 0,607}{2,486} \right) \right. \\ \left. + \frac{\cos 1,262}{1,159} \cdot \left[\arctg \left(\frac{3,575 \cdot 2,17 - 1,925^2 \cdot \sin 1,262}{1,925 \cdot 1,159} \right) + \arctg \left(\frac{1,925^2 \cdot \sin 1,262}{1,925 \cdot 1,159} \right) \right] \right] \\ = 0,228$$

По формуле (В.7) определяем значение фактора облученности для горизонтальной площадки F_H :

$$F_H = \frac{1}{\pi} \left[\arctg \left(\frac{1}{D} \right) + \frac{\sin\theta}{C} \left[\arctg \left(\frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin\theta}{F \cdot C} \right) + \arctg \left(\frac{F^2 \cdot \sin\theta}{F \cdot C} \right) \right] - \right. \\ \left. - \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot (b+1 + a \cdot b \cdot \sin\theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \arctg \left(\frac{A \cdot D}{B} \right) \right] = \\ = \frac{1}{3,14} \left[\arctg \left(\frac{1}{0,607} \right) + \frac{\sin 1,262}{1,159} \cdot \left[\arctg \left(\frac{3,575 \cdot 2,17 - 1,925^2 \cdot \sin 1,262}{1,925 \cdot 1,159} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \arctg \left(\frac{1,925^2 \cdot \sin 1,262}{1,925 \cdot 1,159} \right) \right] - \right. \\ \left. \left[\frac{3,575^2 + (2,17 + 1)^2 - 2 \cdot (2,17 + 1 + 3,575 \cdot 2,17 \cdot \sin 1,262)}{1,112 \cdot 2,486} \right] \cdot \arctg \left(\frac{1,112 \cdot 0,607}{2,486} \right) \right] = \\ = 0,822$$

Находим угловой коэффициент облученности F_q по формуле (В.5):

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2} = \sqrt{0,228^2 + 0,822^2} = 0,853$$

По формуле (В.21) определяем коэффициент пропускания атмосферы:

$$\tau = \exp [- 7,0 \cdot 10^{-4} \cdot (X - 0,5 \cdot d)] = \exp [- 7,0 \cdot 10^{-4} \cdot (37,1 - 0,5 \cdot 34,2)] = 0,998 ,$$

где X - расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта, м.

Для рассматриваемого случая (диаметр очага пожара – 34,2 м) E_f находим методом линейной интерполяции приведенных в таблице В.1 значений для диаметров очага пожара 30 и 40 метров, $E_f = 32,06 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$.

По формуле (В.1) находим интенсивность теплового излучения q :

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau = 32,06 \cdot 0,853 \cdot 0,986 = 27.287 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}.$$

где E_f - среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-2}$;

F_q - угловой коэффициент облученности;

τ - коэффициент пропускания атмосферы.

Для расчета эффективного времени экспозиции определим x_6 - расстояние от места расположения человека до безопасной зоны (зоны, где интенсивность теплового излучения меньше 4 кВт/м^2), м. Положение начала безопасной зоны D_{sf} , отсчитываемой от границы очага пожара, определяется условием:

$$q(D_{sf}) = 4, \text{ имеем } D_{sf} = 81.1 \text{ м}.$$

Учитывая положение реципиента риска $r = 20 \text{ м}$, расстояние: $x_6 = D_{sf} - r$. Эффективное время экспозиции –

$$t = t_0 + (D_{sf} - r)/u_{cp} = 5 + (81.1-20)/5 = 17.22 \text{ с}$$

Рассчитываем пробит-функцию

$$Pr = -14.9 + 2.56 * \ln(t * q^{4/3}) = -14.9 + 2.56 * \ln(17.22 * 27.287^{1.333}) = 3.67159$$

Вероятность

$$P = \frac{1}{\sqrt{2 * \pi}} * \int_{-\infty}^{Pr-5} \exp(-t^2) dt = 0.0921625$$

Вспомогательная программа

// <https://www.programiz.com/cpp-programming/online-compiler/>

```
#include <iostream>
#include <math.h>
using namespace std;
const double PI = 3.1415;
const double G = 9.81;
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); }
```

```
double Eff(int cod, double d) // Возвращает Ef по коду топлива и d пролива
{ double diam[] = {10, 20, 30, 40, 50}; // диаметр пролива, м
  double EfliqNaturalGas[] = {220, 180, 150, 130, 120}; // (СПГ) кВт/м2
  double EfliqPetroleumGas[] = {80, 63, 50, 43, 40}; // (СУГ (пропан-бутан)
кВт/м2
```

```

double Efpetrol[]           = {60, 47, 35, 28, 25};           //бензин кВт/м2
double EfdieselFuel[]      = {40, 32, 25, 21, 18};           //дизельное топливо
кВт/м2
double Eftabl[]            = { 0,0,0,0,0};
double Ef = 0;
for (int i=0; i<5; i++) {
switch (cod) {
case 1: Eftabl[i] = EfliqNaturalGas[i]; break;
case 2: Eftabl[i] = EfliqPetroleumGas[i]; break;
case 3: Eftabl[i] = Efpetrol[i]; break;
case 4: Eftabl[i] = EfdieselFuel[i]; break;
default: std::cout <<" Mistake cod = " << cod << "\n"; } ; }
if (d <= diam[0]) return (Eftabl[0]) ;
if (d >= diam[4]) return (Eftabl[4]) ;
double ddd;
for (int k=0; k<4; k++) { // Линейная аппроксимация
if ((d >= diam[k]) and (d < diam[k+1])) { ddd = Eftabl[k+1]-Eftabl[k];
Ef = ddd*(d-diam[k])/(diam[k+1]-diam[k]) + Eftabl[k]; return (Ef); }
}
std::cout <<" Mistake d = " << d << "\n";
return (10); // Завершение с ошибкой
}
double mf(int cod) // Возвращает массовую скорость выгорания по коду топлива
{ switch (cod) {
case 1: return(0.08);
case 2: return(0.1);
case 3: return(0.06);
case 4: return(0.04);
default: std::cout <<" Mistake cod = " << cod << "\n"; } ;
}
int main()
{
double d_capacity = 34.2; // Диаметр емкости с топливом, м
double r = 20; // Расстояние до реципиента риска от границы пожара, м
double w0 = 20; // Скорость ветра м/с
int cod =3; // Бензин
double p_air = 1.15; // Плотность воздуха кг/м3
double p_gasVar= 3.196; // Плотность паров бензина при темпер. кипения кг/м3

double Fn;
Fn = PI* pow(d_capacity,2)/4; // Площадь пролива
std::cout <<" Площадь пролива Fn = " << Fn <<" ,м " << "\n";
double d;
d = pow(4*Fn/PI,0.5); // эффективный диаметр пролива
std::cout <<" Диаметр пролива d = " << d <<" ,м " << "\n";
double m_strait = mf(cod); // массовая скорость выгорания кг/(м*м*с)
std::cout <<" Скорость выгорания m_strait = " << m_strait <<" ,кг/(м*м*с) " << "\n";
double u_k = w0/pow(m_strait*G*d/p_gasVar,0.333); // Параметр u*
std::cout <<" Параметр u* = " << u_k << "\n";
double L;
if (u_k >=1) { L = 55*d*pow(m_strait/(p_air*sqrt(G*d)),0.67)*pow(u_k,0.21); }
else { L = 42*d*pow(m_strait/(p_air*sqrt(G*d)),0.61); } ;
std::cout <<" Длина пламени = " << L <<" ,м " << "\n";
double angle, cosAngle;
if (u_k < 1) { cosAngle = 1; }
else { cosAngle = pow(u_k, -0.5); } ;
angle = acos(cosAngle);
std::cout <<" Угол = " << angle <<" cos(Угла)=" << cosAngle << "\n";
double X = r+0.5*d;
std::cout << " Расстояние до реципиента риска " <<X<<"\n";
// Расчет факторов облученности
double a = 2*L/d;
double b = 2*X/d;
double A = sqrt(a*a+(b+1)*(b+1)-2*a*(b+1)*sin(angle));
std::cout << "a= " <<a<<" b= " <<b<<" A= " <<A<<"\n";

```

```

double B = sqrt(a*a+(b-1)*(b-1)-2*a*(b-1)*sin(angle));
double C = sqrt(1+(b*b-1)*cos(angle)*cos(angle));
double D = sqrt((b-1)/(b+1));
std::cout << "B = " <<B<<" C= "<<C<<" D= "<<D<<"\n";
double E = a*cos(angle)/(b-a*sin(angle));
double F = sqrt(b*b-1);
std::cout << "E = " <<E<<" F= "<<F<<"\n";
double Fv1 = (1.0/PI);
double Fv2 = -E*atan(D);
double Fv3 = E*((a*a+(b+1)*(b+1)-2*b*(1+a*sin(angle)))/(A*B))*atan(A*D/B);
double Fv4 = (cos(angle)/C)*(atan((a*b-F*F*sin(angle))/(F*C))+
atan((F*F*sin(angle))/(F*C)));
double Fv = Fv1 * ( Fv2+ Fv3 +Fv4);
std::cout << "Fv = " <<Fv<<"\n";
double Fh1 = (1.0/PI);
double Fh2 = atan(1.0/D);
double Fh3 = (sin(angle)/C)*(atan((a*b-F*F*sin(angle))/(F*C))+
atan((F*F*sin(angle))/(F*C)));
double Fh4 = ((a*a+(b+1)*(b+1)-2*(b+1+a*b*sin(angle)))/(A*B)) * atan((A*D/B));
double Fh = Fh1 * ( Fh2+ Fh3 -Fh4);
std::cout << "Fh = " <<Fh<<"\n";
double Fq = sqrt(Fv*Fv+Fh*Fh);
std::cout << " Угловой коэффициент Fq = "<< Fq<<"\n";
double tay = exp(-1.0E-4*(X-0.5*d));
std::cout << " Коэф.пропускани = "<< tay <<"\n";
double Ef = Eff(3,d);
std::cout << " Ef = "<< Ef<<"\n";
double q = Ef*Fq*tay;
std::cout << " q = "<< q <<"\n";
return 0;}

```

Результаты работы вспомогательной программы

```

Площадь пролива Fn = 918.606 ,м
Диаметр пролива d = 34.2 ,м
Скорость выгорания m_strait = 0.06 ,кг/(м*м*с)
Параметр u* = 10.8364
Длина пламени = 61.1364 ,м
Угол = 1.26214 cos(Угла)=0.303779
Расстояние до реципиента риска 37.1
a= 3.57523 b= 2.16959 A= 1.11157
B = 2.48643 C= 1.15849 D= 0.607457
E = -0.878221 F= 1.92539
Fv = 0.227789
Fh = 0.821855
Угловой коэффициент Fq = 0.852838
Коэф.пропускани = 0.998002
Ef = 32.06
q = 27.2874

```

Программа расчета вероятности поражения человека при пожаре пролива.

```

#include <iostream>
#include <math.h>
using namespace std;
const double PI = 3.1415;
const double G = 9.81;

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*PI);
return (s);    } // =====

double Eff(int cod, double d) // Возвращает Ef по коду топлива и d пролива
{ double diam[] = {10, 20, 30, 40, 50}; // диаметр пролива, м
  double EfliqNaturalGas[] = {220, 180, 150, 130, 120}; // (СПГ) кВт/м2
  double EfliqPetroleumGas[] = {80, 63, 50, 43, 40}; // (СУГ(пропан-бутан)
кВт/м2
  double Efpetrol[] = {60, 47, 35, 28, 25}; //бензин кВт/м2
  double EfdieselFuel[] = {40, 32, 25, 21, 18}; //дизельное топливо
кВт/м2
  double Eftabl[] = { 0,0,0,0,0};
  double Ef = 0;
  for (int i=0; i<5; i++) {
  switch (cod) {
    case 1: Eftabl[i] = EfliqNaturalGas[i]; break;
    case 2: Eftabl[i] = EfliqPetroleumGas[i]; break;
    case 3: Eftabl[i] = Efpetrol[i]; break;
    case 4: Eftabl[i] = EfdieselFuel[i]; break;
    default: std::cout <<" Mistake cod = " << cod << "\n"; } ; }
  if (d <= diam[0]) return (Eftabl[0]) ;
  if (d >= diam[4]) return (Eftabl[4]) ;
  double ddd;
  for (int k=0; k<4; k++) { // Линейная аппроксимация
    if ((d >= diam[k]) and (d < diam[k+1])) { ddd = Eftabl[k+1]-Eftabl[k];
      Ef = ddd*(d-diam[k])/(diam[k+1]-diam[k]) + Eftabl[k]; return (Ef); }
  }
  std::cout <<" Mistake d = " << d << "\n";
  return (10); // Завершение с ошибкой
} // =====

double mf(int cod) // Возвращает массовую скорость выгорания по коду
{ switch (cod) {
  case 1: return(0.08);
  case 2: return(0.1);
  case 3: return(0.06);
  case 4: return(0.04);
  default: std::cout <<" Mistake cod = " << cod << "\n"; } ;
} // =====

double qff(double d_capacity, double r, double w0, int cod, double p_air, double
p_gasVap )// Функция расчета интенсивности теплового излучения
{ double Fn;
  Fn = PI* pow(d_capacity,2)/4; // Площадь пролива
// std::cout <<" Площадь пролива Fn = " << Fn <<" ,м " << "\n";
  double d;
  d = pow(4*Fn/PI,0.5); // эффективный диаметр пролива
// std::cout <<" Диаметр пролива d = " << d <<" ,м " << "\n";
  double m_strait = mf(cod); // массовая скорость выгорания кг/(м*м*с)
// std::cout <<" Скорость выгорания m_strait = " << m_strait <<" ,кг/(м*м*с) " <<
"\n";
  double u_k = w0/pow(m_strait*G*d/p_gasVap,0.333); // Параметр u*
// std::cout <<" Параметр u* = " << u_k << "\n";
  double L;
  if (u_k >=1) { L = 55*d*pow(m_strait/(p_air*sqrt(G*d)),0.67)*pow(u_k,0.21); }
  else { L = 42*d*pow(m_strait/(p_air*sqrt(G*d)),0.61); } ;
// std::cout <<" Длина пламени = " << L <<" ,м " << "\n";
  double angle, cosAngle;
  if (u_k < 1) { cosAngle = 1; }

```

```

    else { cosAngle = pow(u_k, -0.5); } ;
    angle = acos(cosAngle);
// std::cout <<" Угол = "<< angle <<"      cos(Угла)="<< cosAngle << "\n";
    double X = r+0.5*d;
// std::cout << " Расстояние до реципиента риска      " <<X<<"\n";
// Расчет факторов облученности
    double a = 2*L/d;
    double b = 2*X/d;
    double A = sqrt(a*a+(b+1)*(b+1)-2*a*(b+1)*sin(angle));
// std::cout << "a= " <<a<<" b= "<<b<<" A= "<<A<<"\n";
    double B = sqrt(a*a+(b-1)*(b-1)-2*a*(b-1)*sin(angle));
    double C = sqrt(1+(b*b-1)*cos(angle)*cos(angle));
    double D = sqrt((b-1)/(b+1));
// std::cout << "B = " <<B<<" C= "<<C<<" D= "<<D<<"\n";
    double E = a*cos(angle)/(b-a*sin(angle));
    double F = sqrt(b*b-1);
// std::cout << "E = " <<E<<" F= "<<F<<"\n";
    double Fv1 = (1.0/PI);
    double Fv2 = -E*atan(D);
    double Fv3 = E*((a*a+(b+1)*(b+1)-2*b*(1+a*sin(angle)))/(A*B))*atan(A*D/B);
    double Fv4 = (cos(angle)/C)*(atan((a*b-F*F*sin(angle))/(F*C))+
atan((F*F*sin(angle))/(F*C)));
    double Fv = Fv1 * ( Fv2+ Fv3 +Fv4);
// std::cout << "Fv = " <<Fv<<"\n";
    double Fh1 = (1.0/PI);
    double Fh2 = atan(1.0/D);
    double Fh3 = (sin(angle)/C)*(atan((a*b-F*F*sin(angle))/(F*C))+
atan((F*F*sin(angle))/(F*C)));
    double Fh4 = ((a*a+(b+1)*(b+1)-2*(b+1+a*b*sin(angle)))/(A*B)) * atan(A*D/B);
    double Fh = Fh1 * ( Fh2+ Fh3 -Fh4);
// std::cout << "Fh = " <<Fh<<"\n";
    double Fq = sqrt(Fv*Fv+Fh*Fh);
// std::cout << " Угловой коэффициент Fq = "<< Fq<<"\n";
    double tay = exp(-1.0E-4*(X-0.5*d));
// std::cout << " Коэф.пропускани = "<< tay <<"\n";
    double Ef = Eff(3,d);
// std::cout << " Ef = "<< Ef<<"\n";
    double q = Ef*Fq*tay;
// std::cout << " q = "<< q <<"\n";
    return q;}

```

```

double fff(double d_capacity, double xxx, double w0, int cod, double p_air, double
p_gasVap)

```

```

{ double delta = qff(d_capacity, xxx, w0, cod, p_air, p_gasVap ) -4;
return delta; } // Уравнение для поиска xxx соответствующего q = 4 кВт/м2

```

```

int main()

```

```

{
    double d_capacity = 34.2; // Диаметр емкости с топливам, м
    double r = 20; // Расстояние до реципиента риска от границы пожара, м
    double w0 = 20; // Скорость ветра м/с
    int cod =3; // Бензин
    double p_air = 1.15; // Плотность воздуха кг/м3
    double p_gasVap= 3.196; // Плотность паров бензина при темпер. кипения кг/м3
    double q_r;
    q_r = qff(d_capacity,r, w0, cod, p_air, p_gasVap);
    std::cout << " Интенсивность излучения q_r = "<< q_r<<" ,кВт/м2" <<"\n";
// Эффективное время экспозиции
    double t0 = 5, u_mid = 5; // t0,с ; u_mid, м/с
// Поиск зоны безопасности
    double disSafetyZone= d_capacity/2; // Начальное расстояние до зоны
    double ddis = 1.0; // метр
    for (int k=1; k<200; k++ )
        { if (fff(d_capacity, disSafetyZone, w0, cod, p_air, p_gasVap) < 0)

```

```

        { std::cout << " Положение зоны безопасности    "<< disSafetyZone <<" ,м
\n";break;} else { disSafetyZone+=ddis;} }
    double time = t0+ (disSafetyZone - r) /u_mid;
    std::cout << " Эффективное время экспозиции = "<< time << " ,с"<<"\n";
    double Pr = -14.9+2.56*log(time*(pow (q_r,1.3333)));
    std::cout <<" Пробит      Pr =  "<< Pr << "  "<<"\n";
    double P=ff(Pr-5);
    std::cout <<" Вероятность P = "<<P    << "\n";
    return 0;}

```

Результаты работы программы

```

Интенсивность излучения q_r = 27.2874 ,кВт/м2
Положение зоны безопасности    81.1 ,м
Эффективное время экспозиции = 17.22 ,с
Пробит      Pr = 3.67159
Вероятность P = 0.0921625

```