

УДК 331.461:625.748.54

**ОЦЕНКА ИНДИВИДУАЛЬНОГО РИСКА
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПОРАЖАЮЩИХ ФАТОРАХ
НА ПРИМЕРЕ АЗС «БЕЛНЕФТЕХИМ» В ГОРОДЕ НОВОПОЛОЦК**

В.В. СЕРГЕЛЬ

(Представлено: канд. техн. наук, доц. А.Г. КУЛЬБЕЙ)

На примере АЗС «Белнефтехим» в городе Новополоцке рассчитаны радиусы опасных зон и условные вероятности поражения людей тепловым излучением при пожаре пролива, образовании «огненного» шара и взрыве. По полученным результатам можно сделать вывод, что торговый центр «Зодиак», построенный недалеко от рассматриваемой АЗС, находится на небезопасном расстоянии.

В нормативном документе ТКП 474-2013 «Категории помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» приведены методы расчета интенсивности теплового излучения и оценки индивидуального риска при различных поражающих факторах. Нами была проведена оценка возможных масштабов поражения для каждого из вариантов реализаций аварии на АЗС «Белнефтехим» в городе Новополоцке согласно [1].

Вблизи рассматриваемой АЗС построили торговый центр «Зодиак» на расстоянии приблизительно равном 54 м. На территории данной АЗС расположено 2 резервуара ёмкостью 200 м³. Также важным было рассмотреть вероятность поражения людей по дороге к торговому центру, расстояние до которой от АЗС, составляющем 16 м.

Доставка жидкого моторного топлива (ЖМТ) на АЗС осуществляется автомобильными цистернами (АЦ) преимущественно российского и белорусского производства (рис. 1), ёмкостные характеристики которых из них представлены в таблице 1.

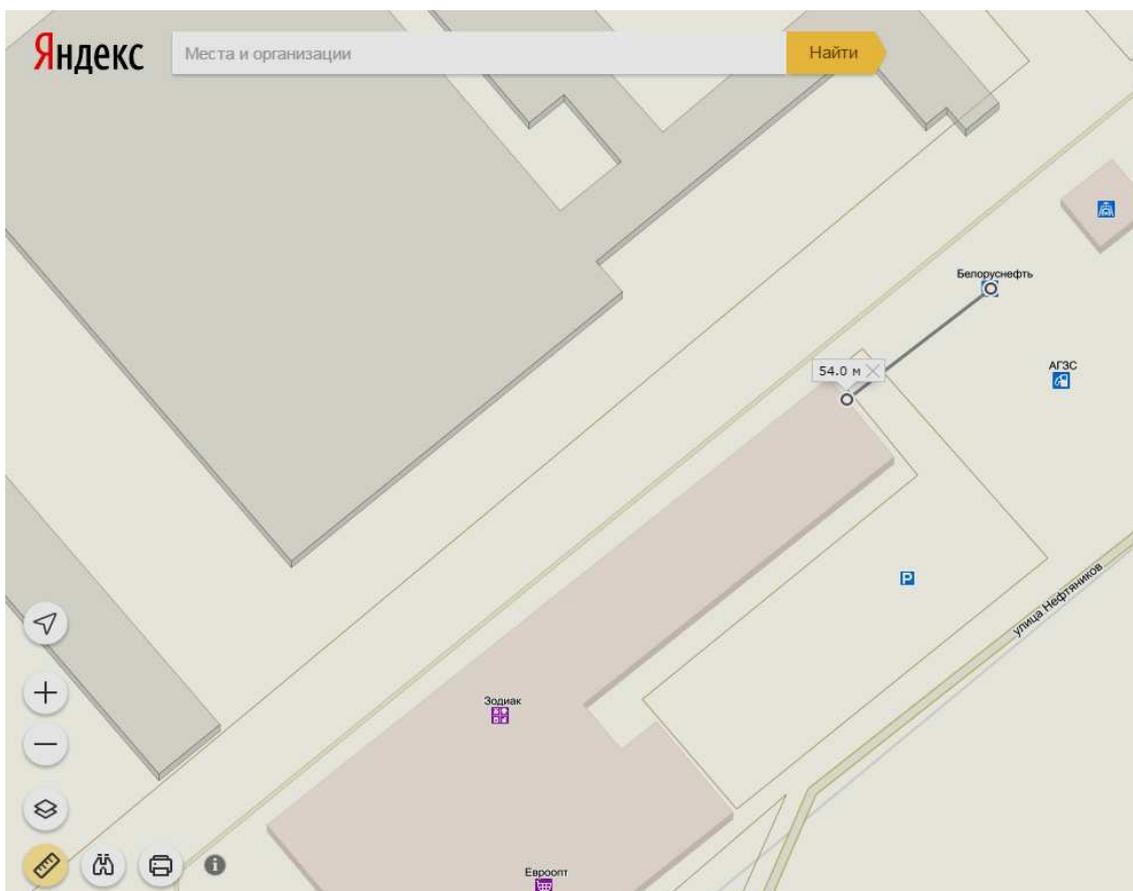


Рис. 1. План расположения АЗС «Белнефтехим»: расстояние от АЗС «Белнефтехим» до ТЦ «Зодиак»

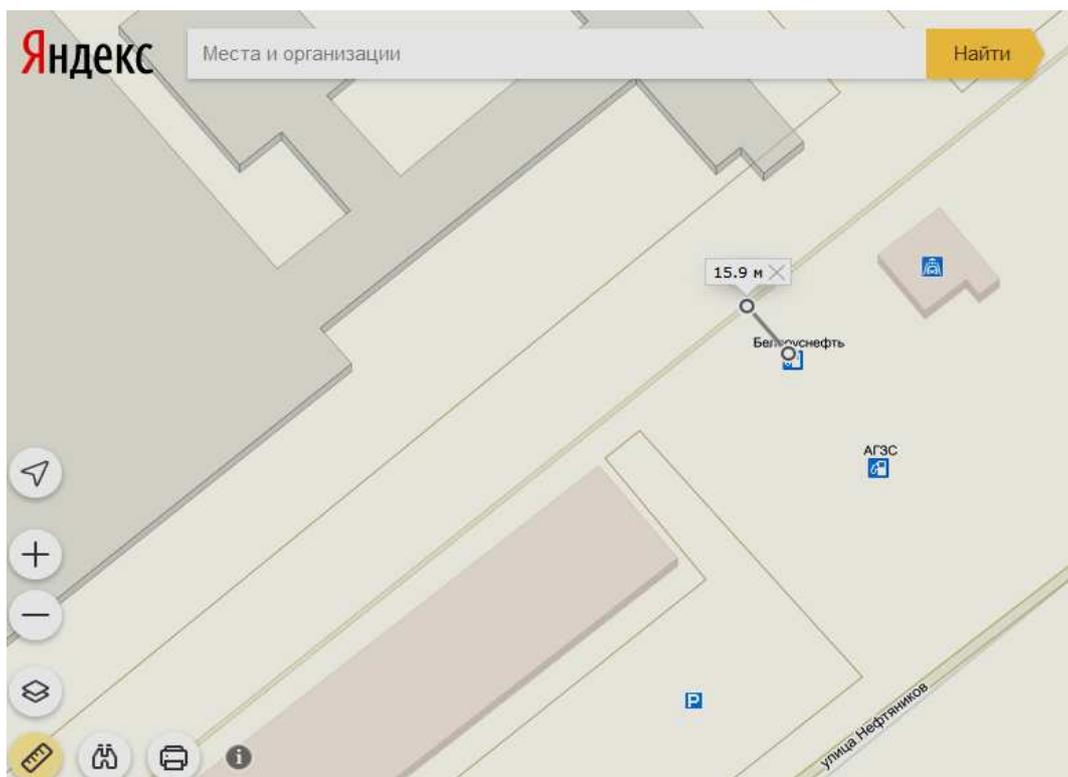


Рис. 2. Расстояние от АЗС «Белнефтехим» до дороги, ведущей к ТЦ «Зодиак»



а)



б)

Рис. 3. Автомобильные цистерны для доставки жидкого моторного топлива на АЗС:
а – автоцистерна АЦ-56141-010-30 на шасси МАЗ-533605-240-600; б – полуприцеп-цистерна ППЦ-33

Таблица 1

Характеристика АЦ для доставки ЖМТ на АЗС

Название АЦ	Тип транспортируемой жидкости	Объём цистерны
Автоцистерна АЦ-56141-06 на шасси МАЗ-533702-246-660	светлые нефтепродукты	11 м ³
Автоцистерна АЦ-12 на шасси УРАЛ	светлые нефтепродукты	12 м ³
Прицеп-цистерна ПЦ-86531	светлые нефтепродукты	15 м ³
Прицеп БЦМ-83.6	легковоспламеняющиеся жидкости класса 3 (бензин, дизельное топливо, керосин)	20 м ³
Полуприцеп-цистерна ППЦ-33	светлые нефтепродукты	33 м ³

В качестве легковоспламеняющейся жидкости для всех сценариев развития аварий рассмотрен бензин. При пожаре пролива рассмотрено несколько сценариев аварий, когда площадь пролива определялась исходя из пролива 1 м³, 5 м³, 10 м³, 15 м³, 20 м³ и 33 м³ (весь объём полуприцепа-цистерны ППЦ-33). Эти сценарии получили обозначение С_{№1}1; С_{№2}5; С_{№3}10; С_{№4}15; С_{№5}20; С_{№6}33.

Площадь испарения при разливе на горизонтальную поверхность определяется (при отсутствии справочных или иных экспериментальных данных) исходя из расчета, что 1 л смесей и растворов, содержащих 70 % и менее (по массе) растворителей, разливается на площади 0,10 м², а остальных жидкостей – на 0,15 м² [1, с. 19, прил. В, пункт В.1.3.4]).

Так, например, по сценарию С_{№1}1, при проливе 1 м³ бензина прогнозируемая площадь разлива составит: $S = 1000 \cdot 0,15 = 150 \text{ м}^2$.

Результаты расчёта площади разлива нефти для всех сценариев приведены в таблице 2.

Таблица 2

Площадь разлива нефти

Наименование сценария аварии	Площадь разлива, м ²
С _{№1} 1	150
С _{№2} 5	750
С _{№3} 10	1500
С _{№4} 15	2250
С _{№5} 20	3000
С _{№6} 33	4950

Для расчета интенсивности теплового излучения необходимо знать размеры пятна пролитого горючего вещества. При свободном разлитии нефти предположить форму пятна разлившегося нефтепродукта невозможно, поэтому принимается эквивалентное разлитие в форме круга, площадь которого принимается равновеликой площади разлива согласно таблице 2.

Определим эквивалентный диаметр пролива нефти (1). Для круга:

$$D_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{4S_{\text{эк}}}{\pi}}, \quad (1)$$

где $D_{\text{эк}}$ – эквивалентный диаметр пролива нефтепродукта, м; $S_{\text{эк}}$ – площадь эквивалентного круга, м².

Высота пламени H , м, вычисляется по формуле

$$H = 42 \cdot d \cdot \left(\frac{m}{\rho_{\text{в}} \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0,61}, \quad (2)$$

где m – удельная массовая скорость выгорания топлива, кг·м⁻²·с⁻¹; $\rho_{\text{в}}$ – плотность окружающего воздуха, кг·м⁻³; $g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м·с⁻².

Например, для сценария № 1 с площадью разлития 150 м²:

$$D_{\text{эк С№1}}^{\text{прыв}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 150}{\pi}} = 13,82 \text{ м};$$

$$H = 42 \cdot 13,82 \cdot \left(\frac{0,06}{1,225 \cdot \sqrt{g \cdot 13,82}} \right)^{0,61} = 20,63 \text{ м}.$$

Согласно проведенным расчетам, сведенным в таблицу 3, при пожаре пролива опасные зоны (находясь в которых есть условная вероятность поражения человека) для рассматриваемой АЗС составили (в качестве безопасной принята интенсивность теплового излучения 1,4 кВт/м²):

Таблица 3

Размеры опасных зон при возгорании

Наименование сценария аварии	Эффективный диаметр разлива, м	Высота пламени, м	Радиусы опасной зоны, м
С _{№1} 1	13,82	20,63	127
С _{№2} 5	30,91	36,08	251
С _{№3} 10	43,71	45,91	337
С _{№4} 15	53,54	52,86	400
С _{№5} 20	61,82	58,42	452
С _{№6} 33	79,41	69,52	559

Определим условную вероятность Q_{ni} поражения человека тепловым излучением в зависимости от его местонахождения.

Изначально необходимо рассчитать величину «пробит»-функции P_r по формуле (2):

$$P_r = -14,9 + 2,56 \ln(t \cdot q^{1,33}), \quad (3)$$

где t – эффективное время экспозиции, с; q – интенсивность теплового излучения, кВт·м⁻².

Расчет интенсивности теплового излучения q , кВт/м² для пожара пролива проводят по формуле (4):

$$q = 5,7 \cdot \varepsilon_{np} \cdot \left[\left(\frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{CB}}{100} \right)^4 \right] \cdot \Phi_{1\phi}, \quad (4)$$

где 5,7 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴); ε_{np} – приведенная степень черноты системы;

$$\varepsilon_{np} = \left(\frac{1}{\varepsilon_{\phi}} + \frac{1}{\varepsilon_{\epsilon}} - 1 \right)^{-1}, \quad (5)$$

ε_{np} – степень черноты факела; ε_{np} – степень черноты облучаемого вещества; T_{ϕ} – температура горения «огненного шара», К; T_{CB} – температура горючего вещества, К; $\Phi_{1\phi}$ – коэффициент облученности между излучающей и облучаемой поверхностями.

Коэффициент облученности между излучающей и облучаемой поверхностями вычисляется по формуле (для $r \geq a$ и $r \geq b$)

$$\Phi_{1\phi} = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}} \cdot \arctg \frac{b}{\sqrt{a^2 + r^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2 + r^2}} \cdot \arctg \frac{a}{\sqrt{b^2 + r^2}} \right), \quad (6)$$

где $a = H/2$; $b = d/2$; r – расстояние между излучающей и облучаемой поверхностями.

Величину эффективного времени экспозиции t для пожаров проливов можно найти как:

$$t = t_o + x/v, \quad (7)$$

где t_o – характерное время обнаружения пожара, с, (допускается принимать $t = 5$ с); x – расстояние от места расположения человека до зоны, где интенсивность теплового излучения не превышает 4 кВт·м⁻², м; v – скорость движения человека, м·с⁻¹ (допускается принимать $v = 5$ м·с⁻¹).

Для сценария № 1 на расстоянии 16 м:

$$a = 20,63/2 = 10,31 \text{ м};$$

$$b = 13,82/2 = 6,91 \text{ м};$$

$$\Phi_{1\phi} = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\frac{10,31}{\sqrt{10,31^2 + 16^2}} \cdot \arctg \frac{6,91}{\sqrt{10,31^2 + 16^2}} + \frac{6,91}{\sqrt{6,91^2 + 16^2}} \cdot \arctg \frac{10,31}{\sqrt{6,91^2 + 16^2}} \right) = 0,255;$$

$$\varepsilon_{np} = \left(\frac{1}{0,98} + \frac{1}{0,95} - 1 \right)^{-1} = 0,93;$$

$$q = 5,7 \cdot 0,93 \cdot \left[\left(\frac{1473}{100} \right)^4 - \left(\frac{313}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,255 = 63675,71 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2};$$

$$t = 5 + (75 - 16)/5 = 16,8 \text{ с};$$

$$P_r = -14,9 + 2,56 \cdot \ln(16,8 \cdot 63675,71^{1,33}) = 6,47.$$

С помощью таблицы В2 [1] определим условную вероятность поражения человека.

Так, при значении $P_r = 6,47$ значение $Q_{en} = 92,8 \% = 0,928$.

Результаты определения радиусов опасных зон и расчета условной вероятности поражения людей при реализации различных сценариев аварий приведены в таблицах 4 и 5 соответственно.

Таблица 4

Размеры опасных зон при возгорании

Наименование сценария аварии	Эффективный диаметр разлива, м	Высота пламени, м	Радиусы опасной зоны, м
C _{№1}	13,82	20,63	25
C _{№2} 5	30,91	36,08	63
C _{№3} 10	43,71	45,91	97
C _{№4} 15	53,54	52,86	125
C _{№5} 20	61,82	58,42	150
C _{№6} 33	79,41	69,52	208

Таблица 5

Условная вероятность поражения людей при пожаре пролива

Расстояние между излучающей и облучаемой поверхностями r , м, (выборочно)	Коэффициент облученности между излучающей и облучаемой поверхностями	Интенсивность теплового излучения q , Вт·м ⁻²	«Пробит»-функция P_r	Условная вероятность поражения Q_{env} , %
C _{№1}				
1	0,98792	246550,4	11,5	100
16	0,255	63675,71	6,47	92,8
29	0,096	24039,05	2,72	1,2
30	0,091	22621,72	2,48	0
54	0,030	7507,72	-2,35	0
C _{№2} 5				
1	0,998	248949	12,94	100
16	0,573	143039,3	10,82	100
54	0,108	26946,05	4,43	28,3
68	0,071	17734,31	2,68	1
69	0,069	17261,08	2,57	0
C _{№3} 10				
1	0,999	249284,4	11,08	100
16	0,708	176648,6	12,25	100
54	0,179	44561,09	7,04	97,6
98	0,062	15529,27	2,68	1
99	0,061	15236,98	2,59	0
C _{№4} 15				
1	0,999	249403,1	14,01	100
16	0,773	193008,6	12,98	100
54	0,234	58447,81	8,48	100
121	0,058	14434,96	2,72	1,2
122	0,057	14213,26	2,65	0
C _{№5} 20				
1	1	249465	14,29	100
16	0,813	202859,6	13,45	100
54	0,280	69931,14	9,44	100
141	0,055	13613,68	2,7	1,1
142	0,054	13433,33	2,63	0
C _{№6} 33				
1	1	249541,8	14,78	100
16	0,868	216628,5	14,19	100
54	0,371	92691,5	10,99	100
183	0,05	12415,43	2,7	1,1
184	0,049	12287,8	2,65	0

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что условная вероятность поражения людей при пожаре пролива на расстоянии 16 метров практически при всех сценариях развития аварий равна 100 % (на расстоянии 1 м – 92,8 %). Так, 100 % вероятность поражения людей существует на расстоянии 54 метров при проливе 15 м³, 20 м³ и 33 м³ топлива. При сценарии C_{№2}5 вероятность поражения людей равна 28,3 %, C_{№1} – 0 %.

Основным поражающим фактором при воздействии на человека «огненного шара» является предельно допустимая доза теплового излучения и интенсивность теплового излучения. Поражающие факторы при воздействии «огненного шара» будем определять согласно [1].

Расчет интенсивности теплового излучения «огненного шара» q , кВт/м² проводят по формуле (8):

$$q = 5,7 \cdot \epsilon_{np} \cdot \left[\left(\frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{CB}}{100} \right)^4 \right] \cdot \Phi_{1\phi}, \quad (8)$$

где T_{Γ} – температура горения «огненного шара» (допускается принимать 1500 К); T_{CB} – температура облучаемого вещества, К; $\Phi_{1\phi}$ – коэффициент облученности между излучающей и облучаемой поверхностями.

Коэффициент облученности между излучающей и облучаемой поверхностями вычисляется по формуле (для $r_2 \geq r_1$):

$$\Phi_{1\phi} = \frac{r_1}{r_2} \cdot \left(\arctg \frac{r_1}{\sqrt{r_2^2 + r_1^2}} \right), \quad (9)$$

где r_1 – радиус «огненного шара», м; r_2 – расстояние от облучаемого объекта до центра «огненного шара», м.

Радиус «огненного шара» определяется по формуле (10):

$$r_1 = 2,665 \cdot m^{0,327}, \quad (10)$$

где m – масса горючего вещества, кг.

Высоту центра «огненного шара» H определяют в ходе специальных исследований. Допускается принимать H равной r_1 .

Время существования «огненного шара» t_s , с, рассчитывают по формуле (11):

$$t_s = 0,92 \cdot m^{0,303}. \quad (11)$$

Принимая в качестве критериев опасного теплового воздействия «огненного шара» на человека предельно допустимую дозу теплового излучения – $1,2 \cdot 10^5$ Дж/м² (ожог 1-й степени), $2,2 \cdot 10^5$ Дж/м² (ожог 2-й степени) и $3,2 \cdot 10^5$ Дж/м² (ожог 3-й степени) и тепловые нагрузки для людей – 1,4 кВт/м², 7 кВт/м² и 10,5 кВт/м² определяем опасные зоны теплового излучения. В качестве безопасной принята интенсивность теплового излучения 1,4 кВт/м², при этом радиус опасной зоны составил 116 м.

Дозу теплового излучения Q , Дж/м², рассчитывают по формуле (12):

$$Q = q t_s, \quad (12)$$

где q – интенсивность теплового излучения «огненного» шара, Вт/м²; t_s – время существования «огненного шара», с.

Пример расчета условной вероятности поражения человека тепловым излучением при образовании «огненного» шара на расстоянии 54 м:

$$r_1 = 2,665 \cdot 132,6^{0,327} = 13,18;$$

$$\Phi_{1\phi} = \frac{13,18}{54} \cdot \left(\arctg \frac{13,18}{\sqrt{54^2 + 13,18^2}} \right) = 0,057;$$

$$\epsilon_{np} = \left(\frac{1}{0,98} + \frac{1}{0,95} - 1 \right)^{-1} = 0,93;$$

$$q = 5,7 \cdot 0,93 \cdot \left[\left(\frac{1200}{100} \right)^4 - \left(\frac{313}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,057 = 6226,16 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2};$$

$$t = 5 + (68 - 54)/5 = 7,8 \text{ с};$$

$$P_{\Gamma} = -14,9 + 2,56 \cdot \ln(7,8 \cdot 6226,16^{1,33}) = -3,41.$$

Для значения $P_{\Gamma} = -3,41$ значение $Q_{en} = 0 \%$.

Результаты расчета условной вероятности поражения людей при образовании «огненного» шара приведены в таблице 6.

Таблица 6

Условная вероятность поражения людей при образовании «огненного» шара

Расстояние между излучающей и облучаемой поверхностями r , м (выборочно)	Коэффициент облученности между излучающей и облучаемой поверхностями	Интенсивность теплового излучения q , Вт·м ⁻²	Дозу теплового излучения Q , Дж/м ²	«Пробит»-функция P_r	Условная вероятность поражения $Q_{оп}$, %
1	10,329	1132487	4580,91	16,5	100
16	0,466	51123,56	206,79	5,495	69
25	0,23	25209,06	101,97	2,77	1,3
26	0,215	23587,42	95,41	2,51	0
54	0,057	6226,16	25,18	-3,41	0

Таким образом, условная вероятность поражения тепловым излучением человека, идущего по дороге к торговому центру «Зодиак», равна 69 %.

Одним из наиболее тяжёлых поражающих факторов, которые могут возникнуть при возможной аварии на АЗС «Белнефтехим», является избыточное давление фронта ударной волны, которая образуется при взрыве. Расчет избыточного давления фронта взрывной волны производился согласно [1].

Определим зоны поражения избыточным давлением фронта взрывной волны с границами, определяемыми радиусами поражения R , центром которых является резервуар. Границы каждой зоны характеризуются значениями избыточных давлений по фронту ударной волны (ΔP).

Классификация зон по перепаду давлений во фронте ударной волны с принятыми для каждой зоны радиусами поражения R приведена в таблице 7.

Таблица 7

Характеристика зон поражения при избыточном давлении

Радиус поражения	ΔP , кПа	Характеристика зоны
R1	100	Полное разрушение (разрушение и обрушение всех элементов зданий и сооружений)
R2	53	50 % разрушение зданий (разрушение части стен и перекрытий верхний этажей, образование трещин в стенах, деформация перекрытий нижних этажей)
R3	28	Разрушение зданий без обрушения (разрушение главным образом второстепенных элементов: крыш, перегородок, оконных и дверных заполнений. Перекрытия, как правило, не обрушиваются. Часть помещений пригодна для использования после расчистки от обломков и проведения ремонта). Разрушаются резервуары нефтехранилищ
R4	12	Разрушение внутренних перегородок (разрушение оконных и дверных заполнений и перегородок. Нижние этажи полностью сохраняются и пригодны для использования после уборки мусора и заделки проёмов)
R5	3	Разрушение оконного стекла (малые повреждения – разбито не более 10 % стекол)

Воздействие избыточного давления взрыва на человека представлено в таблице 8.

Таблица 8

Характеристика действия ударной волны на человека

Радиус поражения	ΔP , кПа	Характеристика действия ударной волны
R6	65,9	Порог выживания (летальное травмирование людей)
R7	5	Порог повреждения (контузия лёгких, временная потеря управляемости)

Параметрами волны давления, являются избыточное давление в положительной фазе волны Δp и импульс положительной фазы волны i .

Избыточное давление в положительной фазе волны Δp , кПа, и импульс фазы волны i , Па·с рассчитывают по формулам (13), (15):

$$\Delta P = P_o \cdot (0,8 \cdot m_{np}^{0,33}/r + 3 \cdot m_{np}^{0,66}/r^2 + 5 \cdot m_{np}/r^3), \quad (13)$$

где P_o – атмосферное давление, (допускается принимать равным 101 кПа); r – расстояние от геометрического центра газопаровоздушного облака, м; m_{np} – приведенная масса газа или пара, кг, вычисляется по формуле (14):

$$m_{np} = (Q_{сг}/Q_o) \cdot M \cdot Z, \quad (14)$$

где $Q_{сг}$ – удельная теплота сгорания газа или пара, Дж·кг⁻¹; Z – коэффициент участия горючих газов и паров в горении (для наземных резервуаров принимаем $Z = 0,1$, для подземных резервуаров и для случа-

ев пролива в здании принимаем $Z = 0,3$); Q_o – константа, равная $4,52 \cdot 10^6$ Дж·кг⁻¹; M – масса горючих газов и (или) паров, поступивших в результате аварии в окружающее пространство, кг.

Величину импульса волны давления i , Па·с, вычисляют по вышеупомянутой формуле (15):

$$i = 123 \cdot m_{np}^{0,66}/r. \quad (15)$$

«Пробит»-функцию P_r допускается вычислять по формуле:

$$P_r = 5 - 0,26 \cdot \ln(V), \quad (16)$$

$$V = \left(\frac{17500}{\Delta P} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{i} \right)^{9,3}. \quad (17)$$

При взрыве одного из резервуаров опасная зона для рассматриваемой АЗС составит 96 м (согласно таблице 7).

Определим условную вероятность поражения человека тепловым излучением при образовании взрыва на расстоянии 54 м:

$$m_{np} = (43965 \cdot 10^3 / (4,52 \cdot 10^6)) \cdot 42 \cdot 0,3 = 122,56 \text{ кг};$$

$$i = 123 \cdot 122,56^{0,66} / 54 = 54,43 \text{ Па·с};$$

$$\Delta P = 101 \cdot (0,8 \cdot 122,56^{0,33} / 54 + 3 \cdot 122,56^{0,66} / 54^2 + 5 \cdot 122,56 / 54^3) \cdot 1000 = 10190,2 \text{ Па}.$$

$$V = \left(\frac{17500}{10190,2} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{54,43} \right)^{9,3} = 5717774,322.$$

$$P_r = 5 - 0,26 \cdot \ln(5717774,322) = 0,95.$$

Для значения $P_r = 0,95$ значение $Q_{en} = 0$ %.

Результаты расчета условной вероятности поражения людей при взрыве приведены в таблице 9.

Таблица 9

Условная вероятность поражения людей при взрыве

Расстояние между излучающей и облучаемой поверхностями r , м (выборочно)	Избыточное давление ΔP , Па	Импульс волны давления i , Па·с	V	«Пробит»-функция P_r	Условная вероятность поражения Q_{en} , %
1	69526538	2939,064	4,42545E-10	10,6	100
16	68077,56	183,692	69,87	3,9	13
26	29422,74	113,041	6385,74	2,72	1,2
27	27704,5	108,854	9070,72	2,63	0
54	10190,2	54,4271	5717774,322	0,95	0

При полученном перепаде давлений 10,19 кПа при взрыве в торговом центре «Зодиак» на расстоянии 54 м произойдет разрушение оконного стекла.

Рассматривая воздействие избыточного давления взрыва на человека, представленного в таблице 8, приходим к выводу, что при взрыве на рассматриваемой АЗС, вход в торговый центр «Зодиак» со стороны АЗС является опасной зоной, в которой ударная волна может вызвать контузию лёгких, разрыв барабанных перепонок, отбрасывание ударной волной и/или временную потерю управляемости. Что касается зоны дороги к торговому центру, то на ней возможно летальное травмирование людей.

При реализации сценария аварии обычно происходит комплексное воздействие всех указанных выше поражающих факторов на находящиеся поблизости объекты [3], что усугубляет возникающую ситуацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Категории помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности: ТКП 474-2013. – Минск, 2013.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.yaraw.com/catalog/?id=61>.
3. Кульбей, А.Г. Построение полей индивидуального риска для промышленных объектов / А.Г. Кульбей, И.А. Леонович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 8.