

УДК 622.692.24:656.085.6

ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ПОДЗЕМНЫХ ЕМКОСТЯХ НЕФТИ, НЕФТЕПРОДУКТОВ

CONSEQUENCES ASSESSMENT OF EMERGENCY FUEL-AIR EXPLOSIONS IN UNDERGROUND OIL AND OIL PRODUCTS TANKS

В.Е. Зиновьев

инженер 1-й категории отдела методологии промышленной, пожарной безопасности и охраны труда ООО «НИИ Транснефть», г. Москва

V.E. Zinovev

1st Category Engineer of the Department of the Industrial, Fire and Labor Safety Methodology, LLC «Transneft R&D», Moscow, Russian Federation
ZinovevVE@niitnn.transneft.ru



Е.С. Плотникова

инженер 1-й категории отдела методологии промышленной, пожарной безопасности и охраны труда ООО «НИИ Транснефть», г. Москва

E.S. Plotnikova

1st Category Engineer of the Department of the Industrial, Fire and Labor Safety Methodology, LLC «Transneft R&D», Moscow, Russian Federation
PlotnikovaES@niitnn.transneft.ru



А.Э. Гончар

начальник отдела разработки планов ликвидации разливов нефти ООО «НИИ Транснефть», г. Москва

A.E. Gonchar

Head of the Department of Oil Spill Response Plan Development, LLC «Transneft R&D», Moscow, Russian Federation
GoncharAE@niitnn.transneft.ru



Аннотация: В работе представлен порядок оценки последствий взрывов топливно-воздушных смесей (ТВС) в подземных емкостях нефти, нефтепродуктов, а именно зон действия воздушно-ударной волны (ВУВ), дальности разлета вторичных осколков и размеров образующейся после взрыва воронки в грунте.

Ключевые слова: подземный взрыв, оценка последствий, зоны поражения, емкости нефти.

Abstract: The article presents an order of consequences assessment of fuel-air explosions in underground oil and oil products tanks, specifically: air impact wave coverage areas, range of fragment dispersion and sizes of a blasting cone in the ground.

Key words: underground explosion, consequences assessment, damage areas, oil tanks.

Подземные емкости широко применяются на объектах организаций системы «Транснефть» (ОСТ) для хранения нефтепродуктов на топливозаправочных пунктах, для хранения аварийного запаса нефтепродук-

тов для дизельных электростанций, в качестве резервных аварийных емкостей, для сброса нефти и нефтепродуктов в системах сглаживания волн давления.

В соответствии с РД 03-418-01 «Методические указания по про-

ведению анализа риска опасных производственных объектов (ОПО)» [1] количественная оценка риска аварий требует рассмотрения всех возможных сценариев развития аварийных ситуаций на ОПО. Однако анализ литера-

турных источников, нормативной и нормативно-правовой документации в области оценки последствий взрывов позволил выявить, что в настоящее время отсутствует единый порядок оценки последствий взрывов в подземных емкостях. Расчеты для аварий с подземными емкостями проводятся по методикам, предназначенным для надземных емкостей, что, очевидно, ведет к завышению значений возможного материального и гуманитарного ущерба.

Целью данной работы является разработка единого порядка расчета последствий взрыва в подземных емкостях нефти, нефтепродуктов.

На основе имеющихся данных в литературных источниках, в нормативных и нормативно-правовых документах авторами был разработан порядок расчета последствий взрыва подземных емкостей, позволяющий определить параметры взрыва и оценить степень воздействия поражающих факторов на здания, сооружения и людей не только от образующейся ВУВ, но и от осколочного действия взрыва.

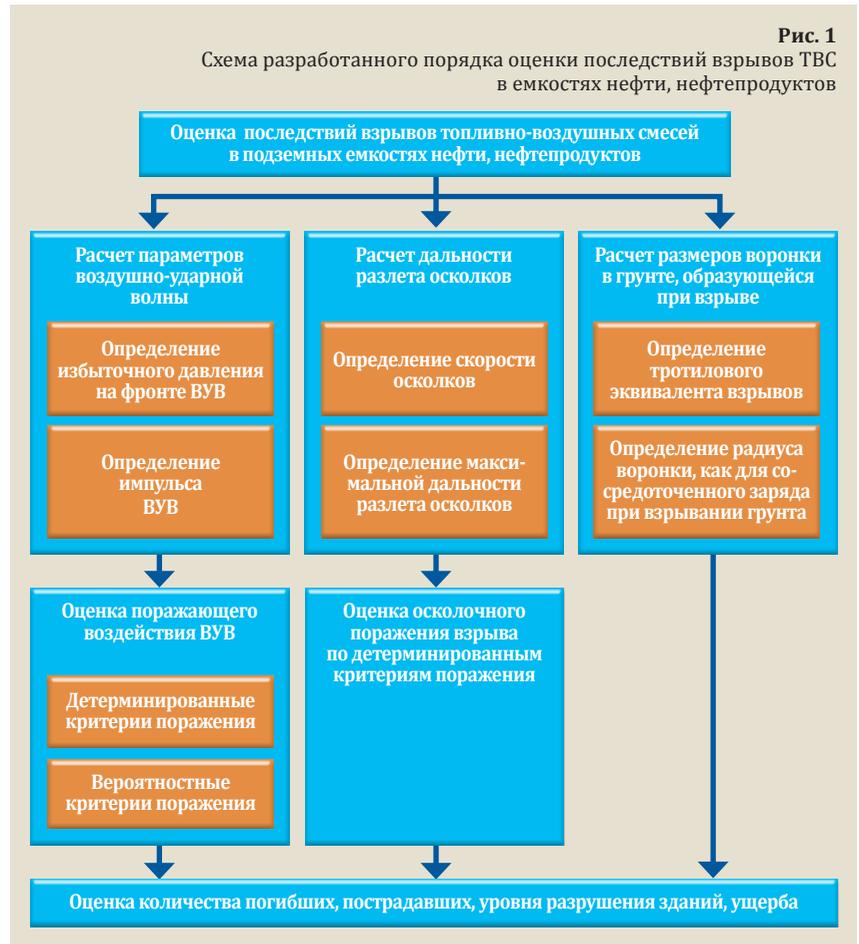
В качестве поражающих факторов рассматриваются:

- 1) воздействие воздушной ударной волны взрыва;
- 2) осколочное действие взрыва;
- 3) разрушения от образующейся при взрыве воронки.

Расчет зон поражающих факторов при взрыве ТВС в подземной емкости производился исходя из следующих предпосылок и допущений:

- а) концентрация горючего компонента в ТВС соответствует стехиометрической смеси, т.е. максимально возможному количеству сгораемого горючего.
- б) рассматривается взрыв подземной емкости под слоем грунта не более 3 м;
- в) масса ТВС в емкости определяется исходя из номинального объема емкости;
- г) во взрывном процессе участвует вся масса горючего, выделившегося в облако;

д) при оценке зон поражения осколками не учитываются первичные и закрепленные вторичные осколки.



На рис. 1 представлена схема разработанного порядка оценки последствий взрывов ТВС в емкости нефти, нефтепродуктов.

В ходе проведенного анализа изучены теоретические и экспериментальные данные в области исследования подземных взрывов зарубежных [2, 3] и отечественных специалистов Министерства обороны [4–7], горнодобывающей [8] и нефтяной промышленности [1, 9–11].

Расчет параметров ВУВ Определение избыточного давления на фронте ВУВ

Анализ результатов исследования подземных взрывов [4] позволил выявить основные начальные условия реализации взрыва, которые определяют параметры его воздействия: толщина слоя грунта, толщина стенок емкости, плотность грунта, плотность стенки емкости, расстояние от емкости до объекта, объем емкости.

Избыточное давление на фронте ВУВ рассчитывается по эмпирической зависимости [11]

$$\Delta P_{\phi}(R) = 37,5 \rho_{\text{ст}} \alpha_{\text{ст}} \sqrt[3]{B} \left[\frac{\sqrt[3]{V_{\text{емк}}}}{R} \right]^{2,07}, \text{ кПа}, \quad (1)$$

где

$$B = \frac{\sqrt[3]{V_{\text{емк}}}}{\left(\Delta h_{\text{гр}} + \delta_{\text{ст}} \frac{\rho_{\text{ст}}}{\rho_{\text{гр}}} \right)}, \quad (2)$$

$\alpha_{\text{ст}}$ – эмпирический коэффициент (для углеводородных ТВС рекомендуется принимать значение $\alpha_{\text{ст}}$ равным 3,46); $\Delta h_{\text{гр}}$ – толщина слоя грунта, м; $\delta_{\text{ст}}$ – толщина стенок емкости, м; $\rho_{\text{гр}}$ – плотность грунта, кг/м³; $\rho_{\text{ст}}$ – плотность стенки емкости, кг/м³; R – расстояние от емкости до объекта, м; $V_{\text{емк}}$ – объем емкости, м³.

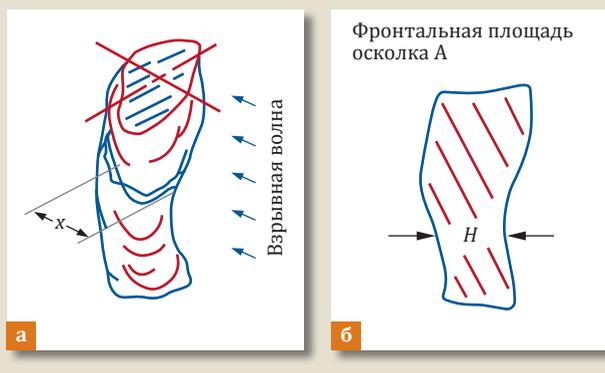
Определение импульса ВУВ

Импульс падающей волны при взрыве облака ТВС рассчитывается с помощью соотношения для длительности фазы сжатия [9]

$$i = \frac{\Delta P_{\phi}(R) \sqrt[3]{k E e^{(0,0106 + 0,448 \ln R - 0,026 (\ln R)^2)}}}{10^5}, \text{ Па·с}, \quad (3)$$

Рис. 2

Примерная форма вторичного осколка: а – пространственное изображение; б – вид спереди [3]



где k – доля энергии волны давления, учитывающая затраты на разрушение емкости (допускается принимать равной 0,5) [12]; E – эффективный энергозапас, Дж.

Эффективный энергозапас в данном случае определяется по формуле [9]

$$E = m_{п} \cdot q_{п}$$

или

$$E = V_{емк} \cdot q_{п} \cdot \rho_{стх} \quad (4)$$

где $m_{п}$ – масса ТВС в емкости, кг; $q_{п}$ – удельная теплота сгорания газа или пара (для нефти и бензина рекомендуется принимать равной 46 740 000 Дж/кг); $\rho_{стх}$ – плотность исходной стехиометрической смеси (для нефти и бензина принимается равной 1,275 кг/м³).

Расчет дальности разлета осколков

Определение скорости осколков

На основании анализа опытных данных, представленных в работах У. Бейкера и П. Уэстайн, при оценке зон поражения осколками, образующимися в результате взрыва ТВС в подземной ем-

кости, допускается не учитывать первичные и закрепленные вторичные осколки.

Основную опасность осколочного действия подземного взрыва представляют вторичные незакрепленные осколки (камни и другие элементы грунта). Чтобы оценить действие взрывной волны на незакрепленный вторичный осколок, необходимо знать скорость, которую незакрепленный вторичный осколок может приобрести в результате взрыва.

По известной зависимости давления, действующего на тело со стороны газового потока, от времени можно рассчитать скорость, приобретаемую осколком.

Для ударных волн уравнение движения осколка решено в работе Бейкера и др. [3]. Для приведенной скорости осколка его можно представить в следующем виде

$$\bar{U} = \frac{M U a_0}{P_0 A (KH + X)} \quad (5)$$

где M – масса осколка, кг; \bar{U} – приведенная скорость осколка; A – площадь поперечного сечения

тела, м²; P_0 – атмосферное давление ($P_0 = 101\,325$ Па); a_0 – скорость звука в воздухе, м/с; K – постоянная, $K = 4$ (или 2) – для вторичного осколка, находящегося на поверхности земли (соответственно, в воздухе); H – минимальный поперечный размер тела в среднем сечении, м; X – расстояние от фронтальной точки на поверхности тела до наибольшего по площади его поперечного сечения (рис. 2), м.

Для определения приведенной скорости осколка необходимо рассчитать приведенное давление

$$\bar{P} = \frac{\Delta P_{\phi}(R)}{P_0} \quad (6)$$

Значение скорости, которую может приобрести в результате воздействия ВУВ от взрыва незакрепленный вторичный осколок, оценивается с помощью графиков на рис. 3, где по оси ординат отложены значения безразмерного давления (см. формулу 6), а по оси абсцисс – значения приведенного импульса ВУВ

$$\bar{i} = \frac{C_D i a_0}{\Delta P_{\phi}(KH + X)} \quad (7)$$

где C_D – коэффициент лобового сопротивления тела, принимается в соответствии с табл. 1 [3].

По зависимостям, представленным на рис. 3, путем интерполяции между ближайшими кривыми находим соответствующее значение безразмерной скорости вторичного осколка.

Затем из формулы (5) рассчитывается соответствующее значение скорости вторичного осколка [3]

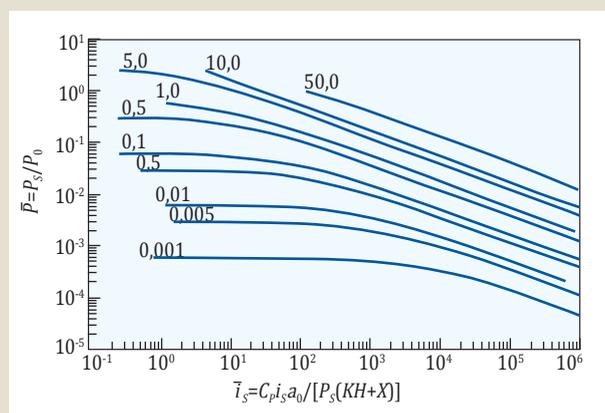
$$U = \frac{\bar{U} P_0 A (KH + X)}{M a_0}, \text{ м/с.} \quad (8)$$

В дальнейшем используются обозначения, приведенные на рис. 4, где изображена плита, движущаяся со скоростью U с углом атаки α_1 . Площадь наибольшей несущей поверхности обозначена A_1 , а коэффициенты подъемной силы и лобового сопротивления – C_{L1} и C_{D1} ; соответственно, для наименьшей несущей поверхности – A_2 , C_{L2} и C_{D2} .

Метод расчета максимальной дальности разлета осколков базируется на следующих предположениях и допущениях:

Рис. 3

Зависимость безразмерного давления от приведенного импульса волны при различных значениях приведенной скорости вторичного осколка (цифрами над кривыми обозначены соответствующие значения приведенной скорости осколка \bar{U}) [3]



а) осколок движется в одной плоскости и может вращаться вокруг вертикальной оси;

б) большинство осколков имеют неправильную форму и коэффициент подъемной силы C_L , равный 0 (соответственно, C_{LD} близок к нулю);

в) для некоторых видов вторичных осколков (плиты, пластины) влияние подъемной силы существенно.

Значения коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления приведены в табл. 2.

Определение максимальной дальности разлета осколков

При определении максимальной дальности разлета осколков:

1) вычисляется отношение подъемной силы к силе сопротивления

$$C_{LD} = \frac{C_{L1}A_1 + C_{L2}A_2}{C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2}; \tag{9}$$

2) находится приведенная скорость осколка с учетом действия силы сопротивления

$$\bar{U} = \frac{\rho_0(C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2)U^2}{Mg}, \tag{10}$$

где U – начальная скорость осколка, м/с; ρ_0 – плотность потока, кг/м³; g – ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/с²;

3) определяется на рис. 5 кривая с ближайшим значением параметра C_{LD} , затем по известному значению приведенной скорости осколка (на горизонтальной оси графика) определяется безразмерная дальность разлета. Если исходное значение параметра C_{LD} находится между приведенными на графике величинами, то для определения искомой дальности разлета можно воспользоваться линейной интерполяцией;

4) определяется максимальная дальность разлета осколков [3]

$$R = \frac{\bar{R}M}{\rho_0(C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2)}, \text{ м.} \tag{11}$$

Расчет размеров воронки в грунте, образующейся при взрыве

Определение тротилового эквивалента

При оценке повреждений, вызванных взрывной волной,

Табл. 1
Коэффициенты сопротивления C_D для тел различной формы [3]

Форма тела и ориентация	C_D
Правильный круговой цилиндр (длинный стержень), ось которого перпендикулярна направлению потока	1,2
Шар	0,47
Длинный цилиндр, ось которого параллельна направлению потока	0,82
Диск или квадратная пластина, плоскость которых перпендикулярна направлению потока	1,17
Куб, одна из граней которого перпендикулярна потоку	1,05
Куб, натекание на ребро	0,3
Длинная прямоугольная пластина, лобовое натекание на узкую грань	2,05
Длинная прямоугольная пластина, натекание на длинное ребро	1,56
Узкая полоска, плоскость которой перпендикулярна потоку	1,93

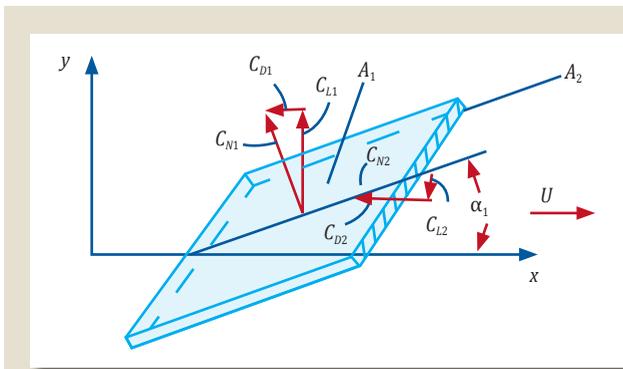


Рис. 4
Геометрия сил, действующих на летящую квадратную плиту [3]

воздействие взрывной волны от произвольного взрыва приравнивается к тому, которое вызывает взрыв некоторой эквивалентной массы тротила. Метод энергетического моделирования

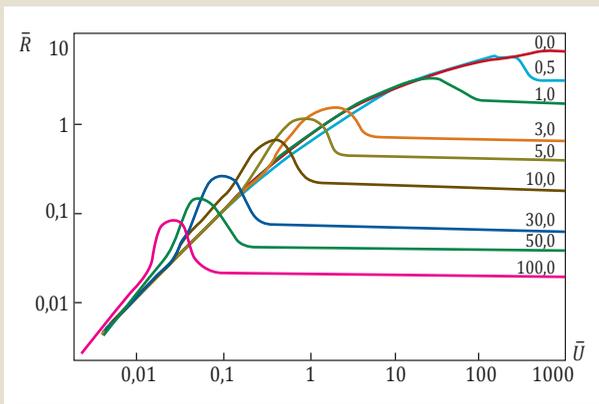
Сахса принимается в настоящей оценке, так как данный метод позволяет учитывать направление распространения взрывной волны, изменение начального давления, скорость звука невоз-

Табл. 2
Коэффициенты подъемной силы и лобового сопротивления [3]

№ п/п	Угол атаки, α_1 , градус	C_{L1}	C_{L1}	C_{L2}	C_{L2}
1	0	0	0	0	2,05
2	10	0,42	0,075	-0,36	2,02
3	20	0,8	0,29	-0,7	1,93
4	30	1,11	0,64	-1,03	1,78
5	40	1,3	1,09	-1,32	1,57
6	50	0,75	0,9	-1,3	1,09
7	60	0,59	1,01	-1,11	0,64
8	70	0,4	1,1	-0,8	0,29
9	80	0,2	1,15	-0,42	0,075
10	90	0	1,17	0	0
11	100	-0,2	1,15	0,42	0,075
12	110	-0,4	1,1	1,8	0,29
13	120	-0,56	1,01	1,11	0,64
14	130	-0,75	0,9	1,8	1,09
15	140	-1,3	1,09	1,32	1,57
16	150	-1,11	0,64	1,03	1,78
17	160	-0,8	0,29	0,7	1,93
18	170	-0,42	0,075	0,36	2,02

Рис. 5

Универсальные зависимости для оценки дальности полета осколков (цифрами над кривыми обозначены соответствующие значения параметра C_{LD}) [3]



мощенной среды, а также позволяет различать взрывы зарядов разной формы.

Взрыв ТВС является химическим по природе, и его эффективность определяется в процентах ТНТ, т.е. как отношение тротилового эквивалента взрыва к рассчитанному по известной теплоте реакции и массе реагентов максимальному тротилово-му эквиваленту

$$M_{\text{ТНТ}} = k \frac{0,4E}{0,9Q_{\text{ТНТ}}}, \quad (12)$$

где E – энергия газа, участвующего в аварии, Дж; $Q_{\text{ТНТ}}$ – удельный тепловой эквивалент тротила на единицу массы, $Q_{\text{ТНТ}} = 4,24 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Формула (12) учитывает затраты энергии на разрушение емкости и затраты энергии на образование воронки в грунте.

Определение радиуса воронки как для сосредоточенного заряда при взрывании грунта

Наиболее сильное разрушительное и метательное действие подземного взрыва наблюдается в направлении ближайшей к заряду свободной поверхности. В этом направлении взрываемый грунт оказывает наименьшее сопротивление действию взрыва. Расстояние от центра заряда до ближайшей к нему свободной поверхности, ограничивающей

массив грунта, называется линией наименьшего сопротивления (ЛНС). Со стороны ближайшей свободной поверхности ЛНС является одновременно и глубиной залегания емкости (h).

Разрушительное действие взрыва характеризуется показателем действия взрыва (n), представляющим собой отношение радиуса (r) (половины ширины) воронки к линии наименьшего сопротивления

$$n = \frac{r}{h}. \quad (13)$$

Образование воронки при взрыве подземной емкости происходит аналогично образованию котлована при действии взрыва заложенного в грунт заряда. Поэтому для определения радиуса воронки используем соотношение для сосредоточенного заряда при взрывании грунта [6]

$$M_y = \frac{M_{\text{ТНТ}}}{fh^3}, \quad (14)$$

где f – удельный расход ВВ, зависящий от свойств грунта (кг/м³), принимается в соответствии с табл. 3; M_y – коэффициенты, зависящие от показателей действия взрыва n ; h – глубина залегания емкости, м.

С помощью табл. 4 и рассчитанного значения коэффициента M_y определяем значение показателя действия взрыва (n).

Определив методом интерполяции значение показателя действия взрыва (n), используя формулу (13), находим радиус (r) воронки, образованной при взрыве подземной емкости.

Оценка поражающего воздействия ВУВ

Детерминированные критерии поражения

Предложенные в разделе «Определение скорости осколков» данной работы зависимости позволяют определить основные параметры ВУВ (давление и импульс) и на их основе провести оценку поражающего действия взрыва ТВС в подземной емкости в соответствии с РД 03-409-01 «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» [9]. Детерминированные и вероятностные

Табл. 3

Значение удельного расхода взрывчатого вещества f [6]

Наименование грунтов и скальных пород	Значение f , кг/м ³
Свеженасыпанная рыхлая земля	0,37-0,47
Растительный грунт	0,47-0,81
Супесок	0,80-1,10
Суглинок	0,97-1,19
Песок плотный или влажный	1,19-1,27
Глина	1,17-1,28
Сыпучий песок	1,51-1,69
Крепкие глина, лесс, мел, гипс, туфы трещиноватые, плотная тяжелая пемза, конгломерат и брекчии на известняковом цементе	1,28-1,50
Песчаник на глинистом цементе, сланец глинистый, известняк, мергель, плотная карбоновая глина	1,28-1,64
Песчаник на известковом цементе, доломит, известняк, магнезит, крепкий мергель	1,28-1,78
Крепкие песчаники и известняки	1,36-2,00
Гранит, гранодиорит	1,78-2,28
Кварцит	1,78-2,00
Базальт, андезит	1,78-2,28
Порфирит	2,00-2,15
Бетон строительный	2,00-2,60
Железобетон (выбивание бетона)	6,8

критерии оценки поражающего действия волны давления при этом полностью согласуются с полученными параметрами ВУВ и позволяют определить количество пострадавших людей и уровни разрушения зданий.

Детерминированные критерии поражения людей (в том числе находящихся в здании) избыточным давлением ВУВ приведены в табл. 5.

Вероятностные критерии поражения

В качестве вероятностного критерия поражения используется понятие пробит-функции Pr . Соотношения между величиной Pr и условной вероятностью поражения человека приведены в табл. 6.

При отсутствии в табл. 6 необходимых данных значения условной вероятности поражения человека $Q_{dj}(\alpha)$ в зависимости от значения пробит-функции Pr определяется по формуле [9]

$$Q_{dj}(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr-S} \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU.$$

Для воздействия волны давления на человека, находящегося вне здания, формулы для пробит-функции имеют вид [9]

$$Pr = 5,0 - 5,74 \ln S,$$

$$S = \frac{4,2}{P} + \frac{1,3}{\bar{i}}, \quad \bar{P} = \frac{\Delta P}{P_0}, \quad \bar{i} = \frac{I^+}{P_0^{1/2} m^{1/3}},$$

где m – масса тела человека (допускается принимать равной 70 кг), кг; $I^+ = \bar{i}$ – импульс волны давления, Па·с.

Пробит-функции для разрушения зданий имеют вид:

- для тяжелых разрушений

$$Pr = 5,0 - 0,26 \ln V,$$

$$V = \left(\frac{17500}{\Delta P}\right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I^+}\right)^{9,3};$$

- для полного разрушения

$$Pr = 5,0 - 0,22 \ln V, \quad (15)$$

$$V = \left(\frac{40000}{\Delta P}\right)^{7,4} + \left(\frac{460}{I^+}\right)^{11,3}. \quad (16)$$

При оценке условной вероятности поражения человека, находящегося в здании, следует использовать пробит-функцию, определяемую по формулам (15, 16).

Табл. 4

Значения коэффициентов M_y и показателя n [6]

M_y	0,43	0,54	0,92	1,59	2,59	3,94	5,65	7,77	10,3	16,65
n	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0

Табл. 5

Константы для определения радиусов зон поражения ВУВ [9]

Характеристика действия ударной волны	I , Па·с	R , Па
Разрушение зданий		
Полное разрушение зданий	770	70 100
Граница области сильных разрушений: 50–75 % стен разрушено или находится на грани разрушения	520	34 500
Граница области значительных повреждений: повреждение некоторых конструктивных элементов, несущих нагрузку	300	14 600
Граница области минимальных повреждений: разрывы некоторых соединений, расчленение конструкций	100	3600
Полное разрушение остекления	0	7000
50-процентное разрушение остекления	0	2500
10-процентное и более разрушение остекления	0	2000
Поражение органов дыхания незащищенных людей		
50-процентное выживание	440	243 000
Порог выживания (при меньших значениях смертельное поражение людей маловероятно)	100	65 900

Оценка осколочного поражения взрыва по детерминированным критериям поражения

В табл. 7 представлена информация по поражающему действию на человека осколков непроникающего типа. Детерминированные критерии показывают значения скорости осколков опасного фактора взрыва, при которых наблюдается тот или иной уровень поражения людей. Необходимо отметить, что поражающее действие осколков определяется только массой и скоростью осколков.

В табл. 5 данные приведены только для одного значения массы осколка (4,54 кг), но можно предположить, что чем больше масса осколка при той же скорости, тем тяжелее будет ранение, нанесенное осколком [3].

На рис. 6 показаны границы области поражающего действия осколков в зависимости от их массы и скорости, по данным Алерса [2]. При массе осколков, превышающей 4,54 кг, поражающее действие осколков здесь получается более умеренным, чем по данным табл. 5. Числами у каждой из линий на рис. 6 показаны

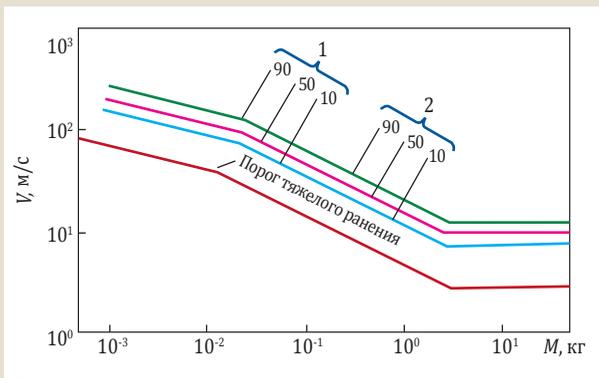
Табл. 6

Связь вероятности поражения с пробит-функцией [9]

P , %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		2,67	2,95	3,12	3,25	3,38	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,86	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Рис. 6

Поражающее действие осколков на внутренние органы и конечности человека в зависимости от их скорости V и массы M ; указаны вероятности (%): 1 – летального исхода, 2 – тяжелого ранения [3]



ны вероятности (в процентах) летального исхода и получения тяжелого ранения при попадании в человека осколков с указанными на осях графика параметрами. Если при данной массе осколка его скорость окажется ниже линии, соответствующей порогу тяжелых ранений, то можно ожидать, что ранение будет сравнительно легким.

На основании анализа опытных данных, представленных в работах У. Бейкера и П. Уэстайн, можно пренебречь классификацией критериев осколочного повреждения зданий и принимать для зданий, попадающих в зону разлета осколков, умеренный (частичный) уровень повреждений.

Пример расчета. Сравнение результатов

Разработанный порядок оценки реализован в качестве расчетного модуля в программе Microsoft Excel. Модуль позволяет провести вышеуказанные расчеты и интегрировать полученные результаты в общий расчет количественных показателей риска на опасном производственном объекте.

В качестве примера проведем оценку последствий взрыва паров бензина в подземном стальном резервуаре объемом 12,5 м³ с толщиной стенки 5·10⁻³ м, расположенном на глубине 1 м на расстоянии 2 м от центра резервуара.

Порядок расчета

Используя формулы (1) и (2), получаем значение избыточного давления на фронте ВУВ

$$\Delta P_{\phi}(R) = 37,5 \rho_{\text{стх}} \alpha_{\text{ст}} \times \sqrt[3]{\frac{3 \sqrt{V_{\text{емк}}}}{\left(\Delta h_{\text{гр}} + \delta_{\text{ст}} \frac{\rho_{\text{ст}}}{\rho_{\text{гр}}}\right)}} \cdot \left[\frac{3 \sqrt{V_{\text{емк}}}}{R}\right]^{2,07} = 37,5 \cdot 1,275 \cdot 3,46 \sqrt[3]{\frac{3 \sqrt{12,5}}{\left(1 + 5 \cdot 10^{-3} \frac{7800}{2850}\right)}} \times \left[\frac{\sqrt[3]{12,5}}{2}\right]^{2,07} = 297 \text{ кПа.}$$

На рис. 7 представлена зависимость избыточного давления на фронте волны от расстояния до объекта, полученная с помощью расчетного модуля.

Определяем эффективный энергозапас по формуле (4) $E = V_{\text{емк}} \cdot q_{\text{н}} \cdot \rho_{\text{стх}} = 12,5 \cdot 46 \cdot 740 \cdot 000 \cdot 1,275 = 7,4 \cdot 10^8 \text{ Дж.}$

Импульс падающей волны при взрыве облака ТВС рассчитывается с помощью формулы (2)

$$\bar{i} = \frac{\Delta P_{\phi}(R) \sqrt[3]{k} E e^{(0,0106 + 0,448 \ln R - 0,026 (\ln R)^2)}}{10^5} = \frac{297000 \sqrt[3]{0,5 \cdot 74 \cdot 10^8} e^{(0,0106 + 0,448 \ln 2 - 0,026 (\ln 2)^2)}}{10^5} = 3192,3 \text{ Па·с.}$$

Для определения приведенной скорости осколка по формуле (6) находим приведенное давление

$$\bar{P} = \frac{\Delta P_{\phi}(R)}{P_0} = \frac{297000}{101325} = 2,97.$$

Принимая в качестве вторичного осколка куб на поверхности земли со стороной 10 см, одна из граней которого перпендикулярна потоку, находим значение приведенного импульса ВУВ (7)

$$\bar{i} = \frac{C_p i a_0}{\Delta P_{\phi}(KH+X)} = \frac{1,05 \cdot 3192,3 \cdot 340}{297000 \cdot (4 \cdot 0,1 + 0)} = 9,6.$$

Согласно рис. 8 путем интерполяции между ближайшими кривыми $\bar{V} = 10$ и $\bar{V} = 50$ находим соответствующее значение безразмерной скорости вторичного осколка.

Затем из формулы (5) определяем соответствующее значе-

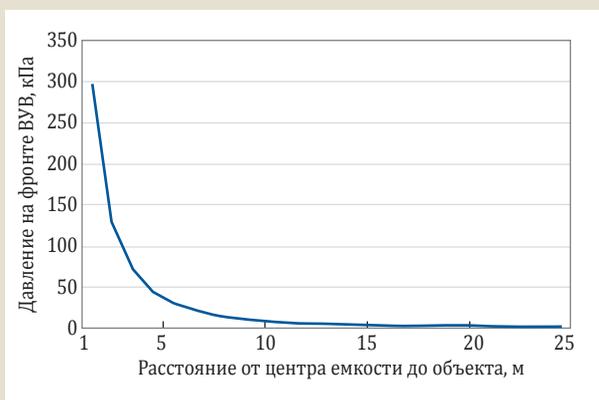
Табл. 7

Экспериментальные критерии поражающего действия непроникающего типа вторичных осколков массой 4,54 кг в зависимости от скорости осколка V [3]

Результат	V , м/с	Степень опасности
Сотрясение мозга	3,05	Практически безопасно Порог опасности
	4,57	
Пролонг черепа	3,05	Практически безопасно Порог опасности 100-процентное поражение
	4,57	
	7,01	

Рис. 7

Зависимость избыточного давления на фронте волны от расстояния до объекта



ние скорости вторичного осколка (8) (м/с)

$$U = \frac{\bar{U} P_0 A (KH + X)}{Ma_0} = \frac{48 \cdot 101325 \cdot 0,01 \cdot (4 \cdot 0,1 + 0)}{4,5 \cdot 340} = 12,6 \text{ м/с.}$$

Для определения максимальной дальности полета осколка по формуле (9) вычисляем отношение подъемной силы к силе сопротивления (угол атаки принимаем равным 30°) (м/с)

$$C_{LD} = \frac{C_{L1} A_1 + C_{L2} A_2}{C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2} = \frac{1,11 \cdot 0,01 - 1,03 \cdot 0,01}{0,64 \cdot 0,01 + 1,78 \cdot 0,01} = 0,033.$$

По формуле (10) находим приведенную скорость осколка с учетом действия силы сопротивления, принимая плотность потока равной 1,275 кг/м³

$$\bar{U} = \frac{\rho_0 (C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2) U^2}{Mg} = \frac{1,275 \cdot (0,64 \cdot 0,01 + 1,78 \cdot 0,01) \cdot 12,6^2}{4,5 \cdot 9,8} = 0,11.$$

Выбираем на рис. 9 кривую с ближайшим значением параметра C_{LD} , затем по известному значению приведенной скорости осколка 0,11 (на горизонтальной оси графика) определяется безразмерная дальность разлета – 0,11.

С помощью формулы (10) определяем максимальную дальность полета осколка (11)

$$R = \frac{\bar{R} M}{\rho_0 (C_{D1} A_1 + C_{D2} A_2)} = \frac{0,11 \cdot 4,5}{1,275 (0,64 \cdot 0,01 + 1,78 \cdot 0,01)} = 16,1 \text{ м.}$$

На рис. 10 представлена зависимость дальности полета осколка от первоначального расстояния от центра емкости до вторичного осколка.

Определим размеры воронки, образующейся при взрыве ТВС, в рассматриваемой в данной задаче подземной емкости для нефти.

Для этого используем формулу (12)

$$M_{ТНТ} = k \frac{0,4E}{0,9Q_{ТНТ}} = 0,5 \frac{0,4 \cdot 7,7 \cdot 10^8}{0,9 \cdot 4,27 \cdot 10^6} = 38,83.$$

Далее для определения радиуса воронки используем формулу (14) для сосредоточенного заряда при взрывании грунта

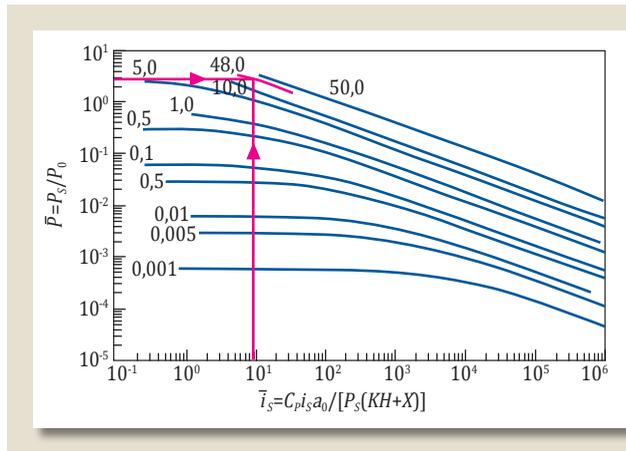


Рис. 8
Зависимость безразмерного давления от приведенного импульса волны при различных значениях приведенной скорости вторичного осколка

$$M_y = \frac{M_{ТНТ}}{fh^3} = \frac{38,83}{1,23 \cdot 2,0^3} = 5,93,$$

где f – удельный расход ВВ, зависящий от свойств грунта (кг/м³), принимаем равным 1,23 для глины.

С помощью табл. 4 и рассчитанного значения коэффициента M_y определяем методом интерполяции значение показателя действия взрыва $n=2,5$.

Используя формулу (13), находим радиус воронки, образованной при взрыве подземной емкости: $r = n \cdot h = 2,5 \cdot 2,0 = 5,0$ м.

Таким образом, используя критерии оценки поражающего действия взрыва ТВС в подземной емкости, получаем следующие зоны действия поражающих факторов.

1. По детерминированным критериям поражения волной давления:

- поражение органов дыхания незащищенных людей (50-процентное выживание) прогнозируется на расстоянии 2 м от эпицентра взрыва ($\Delta P = 243$ кПа);
- порог выживания (при меньших значениях смертельные по-

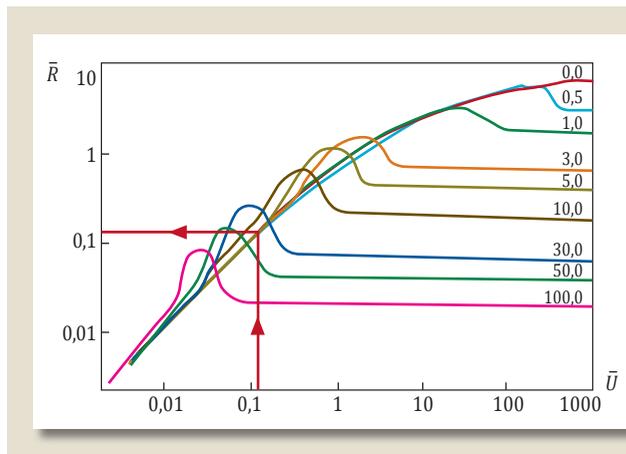


Рис. 9
Универсальные зависимости для оценки дальности полета осколка (цифрами над кривыми обозначены соответствующие значения параметра C_{LD})

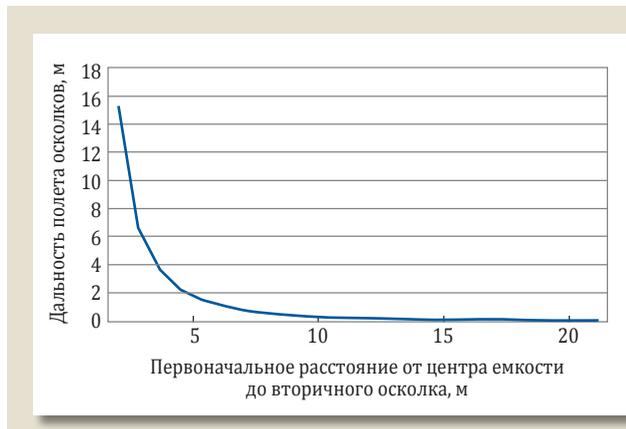


Рис. 10
Зависимость дальности полета осколка от первоначального расстояния от центра емкости до вторичного осколка

Рис. 11

Ситуационный план с зонами действия поражающих факторов при взрыве ТВС в подземной емкости

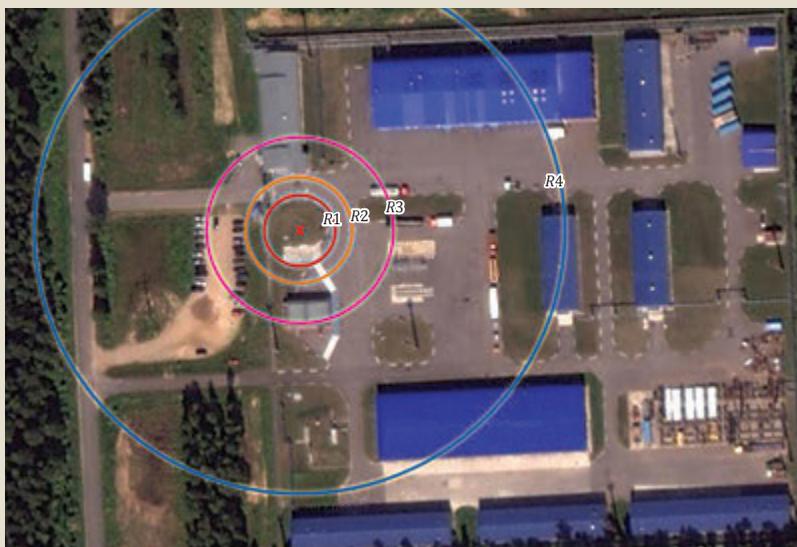


Условные обозначения зон действия поражающих факторов:

- R1 – радиус воронки в грунте, образующейся при взрыве, полное разрушение зданий – 5 м;
- R2 – граница области значительных повреждений (повреждение некоторых конструктивных элементов, несущих нагрузку), $\Delta P = 14,6$ кПа – 8 м;
- R3 – радиус зоны разлета осколков и возможного ранения людей – 16 м;
- R4 – граница области минимальных повреждений (разрывы некоторых соединений, расчленение конструкций, разрушение остекления), $\Delta P = 3,6$ кПа – 17 м.

Рис. 12

Ситуационный план с зонами действия поражающих факторов при взрыве ТВС в подземной емкости



Условные обозначения зон действия поражающих факторов:

- R1 – полное разрушение зданий ($\Delta P = 70,6$ кПа, $i = 2,4$ кПа·с) – 13,4 м;
- R2 – граница области сильных разрушений ($\Delta P = 35,0$ кПа, $i = 1,6$ кПа·с) – 19,9 м;
- R3 – граница области значительных повреждений ($\Delta P = 14,8$ кПа, $i = 0,9$ кПа·с) – 34,2 м;
- R4 – граница области минимальных повреждений ($\Delta P = 3,6$ кПа, $i = 0,3$ кПа·с) – 97,7 м.

ражения людей маловероятны), $\Delta P = 65,9$ кПа, достигается на 4 м;

- полное разрушение зданий, $\Delta P = 70,1$ кПа, наблюдается на расстоянии 4 м.

- граница области сильных разрушений (50–75 % стен разрушено или находится на грани разрушения), $\Delta P = 34,5$ кПа – 5 м;

- граница области значительных повреждений (повреждение некоторых конструктивных элементов, несущих нагрузку), $\Delta P = 14,6$ кПа – 8 м;

- граница области минимальных повреждений (разрывы некоторых соединений, расчленение конструкций, разрушение остекления), $\Delta P = 3,6$ кПа – 17 м.

2. По критериям осколочно-го поражения.

Принимая среднюю массу осколка равной 4,5 кг, получаем, что максимальный радиус зоны разлета и возможного ранения людей составит 16 м. Здания и сооружения, находящиеся в данной зоне, получают минимальные повреждения.

Радиус воронки в грунте, образующейся при взрыве, составит 5 м.

На рис. 11 представлен ситуационный план с зонами действия поражающих факторов для данной аварии, полученными по предлагаемой методике.

В настоящее время ввиду отсутствия методики оценки последствий взрывов ТВС в подземных емкостях на практике часто используют РД 03-409-01 «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей», принимая при этом в качестве условия сильное загроможденное пространство взрыва.

На рис. 12 представлен ситуационный план с зонами действия поражающих факторов для данной аварии, полученными по методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (программа «Токси + Risk»).

Представленные результаты отражают консервативность применения «Методики оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» [9], которая дает завышенные зоны действия поражающих факторов и, как следствие, большие значения возможного материального и гуманитарного ущерба.

Выводы

В работе предлагается отсутствующий в настоящее время в нормативно-правовой документации порядок оценки последствий взрывов ТВС в подземных емкостях нефти, нефтепродуктов, который включает в себя расчет:

- 1) избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушной ударной волны при взрыве ТВС в подземной емкости;
- 2) дальности разлета вторичных незакрепленных осколков;
- 3) размеров воронки, образующейся при взрыве в грунте.

Предлагаемый порядок оценки способствует решению актуальной проблемы – снижению значений прогнозируемых материального и гуманитарного ущербов от аварий с подземными емкостями, которые в настоящее время рассчитываются по консервативным методикам.

Одним из достоинств представленной методики является простота ее применения, несмотря на сложность исследуемого явления подземного взрыва.

В ходе работы создан расчетный модуль в программе Microsoft Excel, апробированный и позволяющий повысить эффективность работы экспертов в области оценки рисков аварий на ОПО ОСТ.

Разработанные процедуры проведения анализа риска могут применяться ОСТ и подрядными организациями, участвующими в разработке:

- деклараций промышленной безопасности ОПО МН (МНПП) ОСТ;
- планов по ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов;
- паспортов безопасности ОПО;
- планов локализации и ликвидации аварийных ситуаций;

• иных работах, связанных с проведением количественной оценки риска на ОПО с подземными емкостями хранения нефти, нефтепродуктов.

Типовые проектные решения, регламентирующие в ОАО «АК «Транснефть» размещение подземных емкостей с учетом возможности их воздействия на соседние объекты в случае взрыва, основаны на соблюдении определенных расстояний между емкостями и соседними объектами [13, 14]. К дополнительным проектным решениям, направленным на снижение тяжести последствий от взрыва топливо-воздушной среды, в подземных емкостях следует отнести установку подземных емкостей в железобетонных саркофагах [15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов.
2. Ahlers E. B. Fragment Hazard Study. Minutes of the Eleventh Explosives Safety Seminar. Memphis, Tennessee, 1969.
3. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П., Кулеш Дж., Стрелов Р. Взрывные явления. Оценка и последствия. В 2-х книгах. М.: Мир, 1986.
4. Адушкин В. В., Спивак А. А. Геомеханика крупномасштабных взрывов. М.: Недра, 1993.
5. Губкин К. Е. О подобии взрывов // Известия АН СССР, Физика Земли. 1978. № 10. С. 49–60.
6. Обеспечение мероприятий и действий сил ликвидации чрезвычайных ситуаций: учебник в 3-х частях: книга 1. Способы и средства инженерного обеспечения ликвидации чрезвычайных ситуаций / под общ. ред. С. К. Шойгу / Г. П. Саков [и др.]. М.: ЗАО «ПАПИРУС», 1998.

REFERENCES

- [1] RD 03-418-01. Guiding document. Methodological instructive regulations on carrying-out the risk analysis of hazardous facilities. (Russian Federation).
- [2] Ahlers E. B. Fragment Hazard Study. Minutes of the Eleventh Explosives Safety Seminar. Memphis, Tennessee, 1969.
- [3] Baker W., Koks P., Westain P., Kulesh G., Strelow R., Explosive phenomena. Consequences assessment. In 2 vol., M.: Mir Publ., 1986.
- [4] Adushkin V.V., Spivak A.A., Geomechanics of large-scale explosions. M.: Nedra Publ., 1993, (Russian Federation).
- [5] Gubkin K.E. About the similarity of explosions. Izvestia AN SSSR, Fizika Zemli Publ., 10(1978), 49–60.
- [6] Ensuring of actions and effect of forces of emergency response: manual in 3 vol.: Book 1. Ways of engineering assistance in cases of emergency response. Ed.: S.K. Shoygu, G.P. Sakov et al., M.: JSC «PAPIRUS» Publ., 1998, (Russian Federation).

7. Приказ МЧС РФ от 10.07.2009 г. № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».

8. ОР-03.100.30-КТН-400-09. Методика определения экономической эффективности научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ.
9. РД 03-409-01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей.
10. РД 39-30-182-79. Методика расчета безопасных расстояний при взрывах на выброс в мягких грунтах при капитальном и аварийном ремонте магистральных нефтепроводов.
11. РБ Г-05-039-96. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия (утверждены Постановлением Госатомнадзора России от 31.12.1996 г. № 100).

[7] Order of The Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters of July 10, 2009 No. 404 «On the approval of the definition technique on the estimated values of fire risks on industrial facilities», (Russian Federation).

- [8] OR-03.100.30-КТН-400-09. Guiding document. Technique of definition of R&D and technological works economic efficiency, (Russian Federation).
- [9] RD 03-409-01. Guiding document. Technique of consequences assessment of emergency fuel-air explosions. (Russian Federation).
- [10] RD 39-30-182-79. Guiding document. Method of calculation of safe distances at explosions on emission in soft soils at capital and emergency repairs of the trunk oil pipelines, (Russian Federation).
- [11] RB G-05-039-96. Guiding document. Guidance on the analysis of hazardous emergency explosions and definition of their mechanical action parameters (approved by the Decree of The RF

12. ПБ 09-540-03. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств (утверждены Постановлением Госгортехнадзора России от 05.05.2003 г. № 29).

13. РД-91.200.00-КТН-175-13. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Нефтеперекачивающие станции. Нормы проектирования.
14. ОР-91.010.30-КТН-116-12. Типовые требования к разработке и содержанию раздела «Мероприятия по обеспечению пожарной безопасности» проектной документации на объекты магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов организаций системы «Транснефть».
15. ОТТ-23.020.01-КТН-216-10. Емкости и резервуары горизонтальные. Общие технические требования.

Gosatomnadzor of December 31, 1996 No. 100), (Russian Federation).

- [12] PB 09-540-03. Guiding document. General guidelines on explosion safety for explosive and flammable, chemical, petrochemical and petroleum-refining plants (approved by the Decree of The RF Gosgortekhnadzor of May 05, 2003 No. 29), (Russian Federation).
- [13] RD-91.200.00-КТН-175-13. Guiding document. Oil and oil products trunk pipeline transport. Oil pumping stations. Design regulations, (Russian Federation).
- [14] OR-91.010.30-КТН-116-12. Guiding document. The requirements on the development and content of the column «Actions for ensuring the fire safety» of the project documentation on the facilities of oil and oil products trunk pipelines of the organizations of the system «Transneft», (Russian Federation).
- [15] OTT-23.020.01-КТН-216-10. Guiding document. Horizontal reservoirs and tanks. General specifications, (Russian Federation).