



Анализ взрывоопасных зон при заполнении цистерн нефтегрузами



Владимир СТРУЧАЛИН
Vladimir G. STRUCHALIN

Валентин ПОНОМАРЕВ
Valentine M. PONOMAREV



Владимир НАВЦЕНЯ
Vladimir Yu. NAVTSENYA

Стручалин Владимир Гайзович — старший преподаватель Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.
Пonomarev Валентин Михайлович — доктор технических наук, профессор МИИТ, Москва, Россия.
Навценя Владимир Юрьевич — доктор технических наук, профессор МИИТ, Москва, Россия.

Дается оценка возможности возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации цистерн с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями. Представлены расчетные данные размеров взрывоопасных зон, образующихся при погрузочных (наливных) операциях. Проведен анализ учитываемых параметров при разных внешних условиях. Рассматриваются варианты усиления мер по предупреждению чрезвычайных ситуаций, вызванных воспламенением паров содержащихся в цистернах жидкостей, а также недопущению присутствия потенциального источника искрообразования.

Ключевые слова: перевозка опасных грузов, цистерны, легковоспламеняющиеся жидкости, взрывоопасные зоны, искрообразование, чрезвычайные ситуации, предупреждение угроз.

Среди чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте особое место занимают пожары и взрывы, связанные с перевозкой легко воспламеняющихся (ЛВЖ) и горючих (ГЖ) жидкостей. Во время налива и слива нефтегрузов на станциях возникают потенциально опасные моменты, поскольку эти операции сопряжены с испарениями паров нефтепродуктов в открытое пространство. Люк-лаз цистерны, поданной на эстакаду под налив светлых нефтепродуктов, находится в открытом состоянии продолжительное время, что при неблагоприятных климатических условиях приводит к быстрому образованию взрывоопасной зоны.

Возможно также испарение паров ЛВЖ в помещение во время специальных операций на промывочно-пропарочных предприятиях по очистке и подготовке цистерн под перевозку нефтегрузов. На таких предприятиях нарушению правил пожарной безопасности способствует образование фрикционных искр, которые могут привести к воспламенению ЛВЖ и ГЖ, аварийным ситуациям.

Для обеспечения пожаровзрывобезопасности при эксплуатации, транспортировке, заправке, обслуживании наливных

Таблица 1 / Table 1

Физико-химические свойства ЛВЖ
Physico-chemical properties of HILs

Вид ЛВЖ Type of HIL	η	M , г/моль	p_n , кПа	A , B , C_A	T , с	ρ_n , кг/м ³	$C_{исп}$, % (об.)	$T_{осп}$, °C
Бензин Petroleum	1	95,3	40,41	4,2651 695,01 223,22	3600	4,239	1,1	-20
Керосин Kerosine		170,2	0,415	4,82177 1211,73 194,677		7,57	0,55	40
Дизельное топливо Diesel fuel		172,3	0,62	5,0781 1256,7 199,52		7,66	0,61	55
Спирт метиловый Methyl alcohol		46,07	31,6	8,22777 1660,454 245,818		2,05	2,2	13
Ксилол Xylene		106,17	2,924	6,17972 1478,16 220,535		4,723	1,1	23

цистерн необходимо знать о наличии взрывоопасных зон, их параметрах и особенностях приточно-вытяжной вентиляции. Размеры зон, ограниченных нижним концентрационным пределом распространения пламени (НКПР), при аварийном поступлении паров ненагретых ЛВЖ в открытое пространство для неподвижной воздушной среды зависят от ряда факторов: физико-химических свойств ЛВЖ, климатических условий, времени и площади испарения, массы поступивших в открытое пространство паров. Известна методика расчета опасных зон по НКПР [1], однако систематизированные данные, позволяющие характеризовать опасные зоны вокруг цистерн при различных технологических процессах, отсутствуют. Поэтому нашей целью является оценка размеров взрывоопасных зон, которая позволит анализировать предпосылки и предупреждать возникновение аварийной ситуации.

В расчетах рассмотрена четырехосная нефтебензиновая цистерна для перевозки нефти и светлых нефтепродуктов модели 15-Ц863. Были использованы наихудшие с точки зрения образования взрывоопасных зон климатические и иные условия, определяющие исход аварийной ситуации. В таблице 1 представлены физико-химические свойства ЛВЖ, важные для знания при процедурах заполнения котла цистерны открытым способом.

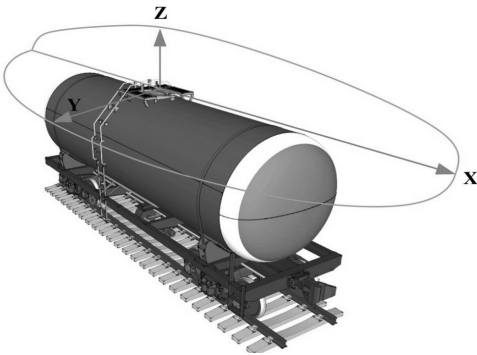


Рис. 1. Схематический вид размеров взрывоопасной зоны по трем осям.
Pic. 1. Schematic view of the size of explosion hazardous area on three axes.

Схематическое изображение размеров взрывоопасной зоны показано на рис. 1. Рассчитаем размеры зон для бензина, керосина, дизельного топлива, спирта и ксилола.

Интенсивность испарения W :

$$W = 10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{M} \cdot p_n, \tag{1}$$

где η – коэффициент, зависящий от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения, при 30 °C и 0,5 м/с $\eta=1$;

M – молярная масса, для бензина $M = 95,3$ г/моль;





Рис. 2. Схема перекрытия соседних взрывоопасных зон.

Pic. 2. Scheme of overlapping adjacent explosion hazardous areas.

p_n — давление насыщенного пара при расчётной температуре жидкости $t_p \cdot p_n$ определяется по формуле Антуана:

$$\lg p_n = A - \frac{B}{(t + C_A)}, \text{ кПа}, \quad (2)$$

где A, B, C_A — константы формулы Антуана, для бензина АИ-93 (ГОСТ 2084-67) $A = 4,2651, B = 695,01, C_A = 223,22$ [2];

t — расчетная температура °С, абсолютный максимум для Москвы (1879–2010 гг.) $t = 38,2$ °С.

Тогда

$$\lg p_n = 4,2651 - \frac{695,01}{(38,2 + 223,22)} = 1,6065, \text{ кПа}$$

отсюда $p_n = 40,41$ кПа.

$$W = 10^{-6} \cdot 1 \cdot \sqrt{95,3} \cdot 40,41 = 3,9449 \cdot 10^{-4} \text{ кг} / (\text{с} \cdot \text{м}^2).$$

Масса паров бензина, образующихся при испарении:

$$m_a = W \cdot F \cdot T, \text{ кг} \quad (3)$$

где W — интенсивность испарения, кг/см²;

F — площадь проёма, через который происходит испарение ЛВЖ, м²; $F = 0,255$ м² [3];

T — время, с; $T = 3600$ с.

Таким образом,

$$m_a = 3,9449 \cdot 10^{-4} \cdot 0,255 \cdot 3600 = 0,362 \text{ кг}.$$

Расстояния $X_{\text{нкпр}}, Y_{\text{нкпр}}, Z_{\text{нкпр}}$ для ЛВЖ, ограничивающие область концентраций, превышающих НКПР:

$$X_{\text{нкпр}} = Y_{\text{нкпр}} = 3,2 \sqrt{K} \left(\frac{p_n}{C_{\text{нкпр}}} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{m_n}{\rho_n p_n} \right)^{0,33}, \quad (4)$$

$$Z_{\text{нкпр}} = 0,12 \sqrt{K} \left(\frac{p_n}{C_{\text{нкпр}}} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{m_n}{\rho_n p_n} \right)^{0,33}, \quad (5)$$

где m_n — масса паров ЛВЖ, поступивших в открытое пространство за время полного

испарения, но не более 3600 с, кг;

p_n — давление насыщенных паров ЛВЖ при расчётной температуре, $p_n = 40,41$ кПа;

$C_{\text{нкпр}}$ — нижний концентрационный предел распространения пламени ГЖ или паров ЛВЖ, для бензина $C_{\text{нкпр}} = 1,1\%$ (об.);

ρ_n — плотность паров ЛВЖ при расчётной температуре и атмосферном давлении, кг/м³;

K — коэффициент, зависящий от времени испарения.

ρ_n рассчитывается по формуле:

$$\rho_n = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00361)}, \quad (6)$$

где M — молярная масса, г·моль; $M = 95,3$ г·моль; V_0 — молярный объём идеального газа; $V_0 = 22,4$ л/моль.

$$\rho_n = \frac{95,3}{22,4 \cdot (1 + 0,00361)} = 4,239, \text{ кг} / \text{м}^3.$$

K определяется по формуле: $K = \frac{T}{3600}$,

где T — продолжительность поступления паров ЛВЖ в открытое пространство, с; $T = 3600$ с.

Тогда

$$X_{\text{нкпр}} = Y_{\text{нкпр}} = 3,2 \sqrt{1} \left(\frac{40,41}{1,1} \right)^{0,8} \cdot$$

$$\cdot \left(\frac{0,362}{4,239 \cdot 40,41} \right)^{0,33} = 7,5;$$

$$Z_{\text{нкпр}} = 0,12 \sqrt{1} \left(\frac{40,41}{1,1} \right)^{0,8} \cdot$$

$$\cdot \left(\frac{0,362}{4,239 \cdot 40,41} \right)^{0,33} = 0,3$$

Для оценки взаимного влияния взрывоопасных зон рассчитаем их размеры при различной площади испарения, определя-

Таблица 2 / Table 2

Результаты расчетов для зон, ограниченных $C_{\text{нкр}}$ в открытом пространстве
The results of calculations for areas, limited by $C_{\text{нкр}}$ in open space

Вид ЛВЖ Type of HIL	W, кг/ (с·м²)	Площадь испарения/ evaporation square, F см²	m_a , кг/kg	Величина зоны в открытом пространстве, м The zone's size in open space, m	
				$X_{\text{нкр}} = Y_{\text{нкр}}$	$Z_{\text{нкр}}$
Бензин Petroleum	$3,9449 \cdot 10^{-4}$	0,255	0,362	7,5	0,3
		0,06 (1/4)	0,1	4,9	0,18
		0,03 (1/10)	0,04	3,62	0,14
		0,01 (1/20)	0,02	2,88	0,11
Керосин Kerosine	$5,414 \cdot 10^{-6}$	0,255	$4,97 \cdot 10^{-3}$	0,3	0,01
		0,06 (1/4)	$1,17 \cdot 10^{-3}$	0,2	$7,1 \cdot 10^{-3}$
		0,03 (1/10)	$5,9 \cdot 10^{-4}$	0,15	-
		0,01 (1/20)	$1,95 \cdot 10^{-4}$	0,1	-
Дизельное топливо Diesel fuel	$8,138 \cdot 10^{-6}$	0,255	$7,47 \cdot 10^{-3}$	0,4	0,01
		0,06 (1/4)	$1,76 \cdot 10^{-3}$	0,24	$9 \cdot 10^{-3}$
		0,03 (1/10)	$8,8 \cdot 10^{-4}$	0,2	-
		0,01 (1/20)	$3,0 \cdot 10^{-4}$	0,1	-
Спирт Spirit	$2,15 \cdot 10^{-4}$	0,255	0,2	3,8	0,14
		0,06 (1/4)	0,05	2,4	0,1
		0,03 (1/10)	0,02	1,8	0,07
		0,01 (1/20)	$7,74 \cdot 10^{-3}$	1,3	0,05
Ксилол Xylene	$3,013 \cdot 10^{-5}$	0,255	0,02	0,8	0,03
		0,06 (1/4)	$6,51 \cdot 10^{-3}$	0,6	0,02
		0,03 (1/10)	$3,25 \cdot 10^{-3}$	0,4	0,01
		0,01 (1/20)	$1,08 \cdot 10^{-3}$	0,3	0,01



Рис. 3. Схема взрывоопасных зон, которые не перекрываются при наливе.

Рис. 3. Scheme of explosion hazardous areas that are not overlapped at loading.

емой степенью открытия люка-лаза цистерны.

Результаты расчетов взрывоопасных зон в случае рассмотренных ЛВЖ сведены в таблицу 2.

Схематическое изображение перекрытия соседних взрывоопасных зон при наливе бензина показано на рис. 2.

Схематическое изображение взрывоопасных зон, которые не перекрываются при наливе, на рис. 3.

Результаты расчетов показывают, что среди ЛВЖ наиболее опасен бензин, так как взрывоопасная зона сопоставима с ли-

нейными размерами цистерны, что может привести к каскадному типу распространения пламени. Взрывоопасные зоны других веществ не существенны или при незначительном воздушном потоке отсутствуют.

Проведём оценку размеров взрывоопасных зон, ограниченных нижним концентрационным пределом распространения пламени при аварийном поступлении паров ЛВЖ в помещение. В расчетах приняты характерные размеры объёмно-планировочных решений для типовой промывочно-пропарочной станции.



Таблица 3 / Table 3

Данные для расчетов размеров взрывоопасных зон в закрытом помещении

Data for calculations of explosion hazardous areas' sizes indoor

Вид ЛВЖ Type of HIL	K_1	K	K_3		$V_{св}$ м ³	δ при $Q=0,05$		C_p % (об.)		C_p % (об.)
			при работающей вентиляции ventilation is ON	при неработающей вентиляции ventilation is OFF		при работающей вентиляции (ON)	при неработающей вентиляции (OFF)	при работающей вентиляции (ON)	при неработающей вентиляции (OFF)	
Бензин Petroleum	1,1958	1	0,3536	0,04714	1029,6	1,27	1,25	0,81	1,24	40
Керосин Kerosine								$7,17 \cdot 10^{-3}$	0,011	0,4
Дизельное топливо Diesel fuel								0,01	0,02	0,6
Спирт Spirit								0,75	1,13	31,1
Ксилол Xylene								0,05	0,08	2,9

Таблица 4 / Table 4

Результаты расчетов взрывоопасных зон для паров ЛВЖ в закрытом помещении

The results of calculations for explosion hazardous areas for HIL's vapors indoor

Вид ЛВЖ Type of HIL	Величина зоны, м Size of area, m					
	При работающей вентиляции Ventilation is on			При неработающей вентиляции Ventilation is off		
	$X_{икпр}$	$Y_{икпр}$	$Z_{икпр}$	$X_{икпр}$	$Y_{икпр}$	$Z_{икпр}$
Бензин Petroleum	0	0	0	15,26	6,24	1,33
Керосин Kerosine	0	0	0	0	0	0
Дизельное топливо Diesel fuel	0	0	0	0	0	0
Спирт Spirit	0	0	0	0	0	0
Ксилол Xylene	0	0	0	0	0	0

Расстояния $X_{икпр}$, $Y_{икпр}$ и $Z_{икпр}$ для бензина:

$$X_{икпр} = K_1 l (K_2 \ln \frac{\delta C_0}{C_{икпр}})^{0,5}, \quad (7)$$

$$Y_{икпр} = K_1 b (K_2 \ln \frac{\delta C_0}{C_{икпр}})^{0,5}, \quad (8)$$

$$Z_{икпр} = K_3 h (K_2 \ln \frac{\delta C_0}{C_{икпр}})^{0,5}, \quad (9)$$

где K_1 – коэффициент, для ЛВЖ принимается $K_1 = 1,1958$;

K_2 – коэффициент, зависящий от времени испарения;

K_3 – коэффициент; для ЛВЖ при отсутствии подвижности воздушной среды, $K_3 =$

0,04714, при подвижности воздушной среды $K_3 = 0,3536$;

h – высота помещения, м; $h = 6,5$ м;

l, b – длина и ширина помещения, м; $l, = 22$ м, $b = 9$ м;

δ – допустимые отклонения концентраций при задаваемом уровне значимости $Q(C > \bar{C})$, который выбирается исходя из особенностей технологического процесса; допускается принимать $Q(C > \bar{C})$ равным 0,05;

$C_{икпр}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени ГЖ или паров ЛВЖ, % (об.);

C_0 – предэкспоненциальный множитель, % (об.).

C_0 определяется по формулам:
при отсутствии подвижности воздуш-
ной среды для ЛВЖ

$$C_0 = C_n \left(\frac{m100}{C_n \rho_n V_{св}} \right)^{0,41}, \% (об.), \quad (10)$$

при подвижности воздушной среды для
паров ЛВЖ

$$C_0 = C_n \left(\frac{m100}{C_n \rho_n V_{св}} \right)^{0,46}, \% (об.), \quad (11)$$

где ρ_n — плотность паров, кг/м³;

m — масса паров ЛВЖ;

C_n — концентрация насыщенных паров

при расчетной температуре t_p , °С воздуха
в помещении, % (об.).

$V_{св}$ — свободный объем помещения, м³;

составляет 80% объема помещения,

$$V_{св} = 0,8 \cdot 6,5 \cdot 22,9 = 1029,6.$$

C_n определяется по формуле:

$$C_n = \frac{100 p_n}{p_0}, \% (об.), \quad (12)$$

где p_n — давление насыщенных паров при
расчетной температуре, кПа;

p_0 — атмосферное давление, кПа; $p_0 =$

101 кПа;

Таким образом,

$$C_n = \frac{100 p_n}{p_0} = \frac{100 \cdot 40,41}{101} = 40 \% (об.)$$

Тогда предэкспоненциальный множи-
тель C_0 составит:

при отсутствии подвижности воздуш-
ной среды

$$\begin{aligned} C_0 &= C_n \left(\frac{m100}{C_n \rho_n V_{св}} \right)^{0,41} = \\ &= 32,78 \left(\frac{0,362 \cdot 100}{40 \cdot 4,24 \cdot 1029,6} \right)^{0,41} = \\ &= 1,24 \% (об.); \end{aligned}$$

при подвижности воздушной среды

$$\begin{aligned} C_0 &= C_n \left(\frac{m100}{C_n \rho_n V_{св}} \right)^{0,46} = \\ &= 32,78 \left(\frac{0,362 \cdot 100}{40 \cdot 4,24 \cdot 1029,6} \right)^{0,46} = \\ &= 0,81 \% (об.). \end{aligned}$$

Расстояния $X_{икпр}$, $Y_{икпр}$ и $Z_{икпр}$ для бензина:
при работающей вентиляции

$$X_{икпр} = 1,1958 \cdot 22 \left(1 \cdot \ln \frac{1,27 \cdot 0,81}{1,1} \right)^{0,5} = -5,3;$$

$$Y_{икпр} = 1,1958 \cdot 9 \left(1 \cdot \ln \frac{1,27 \cdot 0,81}{1,1} \right)^{0,5} = -2,2;$$

$$Z_{икпр} = 0,3536 \cdot 6,5 \left(1 \cdot \ln \frac{1,27 \cdot 0,81}{1,1} \right)^{0,5} = -0,46;$$

при неработающей вентиляции

$$X_{икпр} = 1,1958 \cdot 22 \left(1 \cdot \ln \frac{1,25 \cdot 1,24}{1,1} \right)^{0,5} = 15,26;$$

$$Y_{икпр} = 1,1958 \cdot 9 \left(1 \cdot \ln \frac{1,25 \cdot 1,24}{1,1} \right)^{0,5} = 6,24;$$

$$Z_{икпр} = 0,04714 \cdot 6,5 \left(1 \cdot \ln \frac{1,25 \cdot 1,24}{1,1} \right)^{0,5} = 1,33 м.$$

Данные, необходимые для соответству-
ющих расчетов по ЛВЖ, представлены
в таблице 3, результаты расчетов взрыво-
опасных зон для паров в закрытом поме-
щении — в таблице 4.

Выводы

1. Значительные взрывоопасные зоны
в открытом пространстве при испарении
паров ЛВЖ возникают только для бен-
зина и спирта.

2. В случае с бензином возможно
перекрывание взрывоопасных зон, что
приведет к каскадному характеру рас-
пространения пламени.

3. Образование взрывоопасных зон
малых размеров у большинства рассмо-
транных ЛВЖ обусловлено использова-
нием открытого способа заполнения
цистерн и физико-химическими свой-
ствами самих жидкостей. Такие зоны
образуются только над люком-лазом
и не перекрываются соседними.

4. Расчеты показывают, что при рабо-
тающей вентиляции взрывоопасные
зоны в помещении не будут образова-
ться, а при отсутствии подвижности
воздушной среды взрывоопасная зона
возникает не только для бензина и срав-
нима с размерами помещения. Таким
образом, наличие работающей вентиля-
ции, использование которой необходи-





мо, сказывается только для паров бензина.

Проведенный анализ позволяет считать, что необходимо уделять большее значение вопросам искрообразующей способности материалов, так как из-за вероятных нарушений технологии и правил безопасности возникновение искры может привести к аварийным ситуациям. Опасность образования искр наиболее существенна для паров бензина, поэтому во взрывоопасных зонах сле-

дует предусмотреть отсутствие потенциально возможного источника зажигания.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 12.3.047-98 «Пожарная безопасность технических процессов. Общие требования. Методы контроля».
2. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. — Л.: Химия, 1982. — 263 с.
3. Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов: Справочное пособие / Под общ. ред. В. Н. Филиппова. — М.: Изд-во стандартов, 1993. — 126 с.

ANALYSIS OF EXPLOSION HAZARDOUS AREAS WHILE FILLING TANK-WAGONS WITH OIL CARGOES

Struchalin, Vladimir G. — senior lecturer of the department of safety management in the technosphere of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

Ponomarev, Valentine M. — D. Sc. (Tech.), professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

Navtsenya, Vladimir Yu. — D. Sc. (Tech.), professor of the department of safety management in the technosphere Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

ABSTRACT

In the article the authors esteem the likelihood of accidents emergence during the use of tank-wagons with highly inflammable and flammable liquids. Calculation data of explosion hazardous areas sizes are given, which are formed during loading (bulk) operations. The authors provide an analysis of relevant parameters for different environments. Additionally, options are considered to strengthen measures to prevent emergency situations caused by ignition of vapors of liquids, contained in tank-wagons, as well as prevent the presence of a potential source of spark formation.

ENGLISH SUMMARY

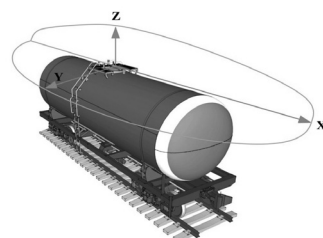
Background.

Increase in oil production and its refining sets to rail transport increased requirements for the development of the growing volume of oil cargo transportation by accelerating the turnover. Intensification of hazardous processes, productivity growth in order to obtain greater profits requires strengthening measures to prevent emergency situations.

Fires and explosions associated with the transportation of highly inflammable (HIL) and flammable (FL) liquids occupy a special place in the list of emergency situations on rail transport. During loading and unloading of oil cargo potentially hazardous situations occur at railway stations associated with vapors of HIL in open space. This happens because the tank-wagon's manhole, which is spotted to overhead crossing in order to be loaded with light oil products using open method, is in the open state for a long time, which under unfavorable climatic conditions leads to the rapid formation of the explosive zone.

Evaporation of HIL's vapors is also possible in the room during special operations at railcar wash facilities for cleaning and preparation of oil cargo tank-wagons for transportation. At such enterprises violation of fire prevention rules leads to formation of frictional sparks, which can lead to ignition of HIL and FL and emergency situations.

Pic. 1.
Schematic
view of
the size of
explosion
hazardous
area on three
axes.



Objective.

The aim of the article is to assess the size of explosion hazardous areas, which will make it possible to analyze measures of emergency situations' prevention.

Methods.

The authors use methods of analysis, comparison and mathematical calculations.

Results.

To ensure fire-explosion safety during operation, transportation, refueling, maintenance of bulk tanks it is necessary to be aware of the presence of explosion hazardous areas, their parameters and combined extract-and-input ventilation's features. Zone sizes, limited by lower flammability limit (LFL) in case of emergency admission of HIL's unheated vapors in open space for stationary air environment depend on several factors: the physicochemical properties of HIL, climatic conditions, time and area of evaporation, mass of vapors received in open space. Method of calculating the hazardous area by LEL [1] is known, but systematic data to characterize the hazardous zones around the tank-wagons during various processes are absent. Therefore, the aim of the article is to assess the size of explosion hazardous areas, which will make it possible to analyze measures of emergency situations' prevention.

The calculations considered tetraaxial oil and petrol tank-wagon for transportation of oil and light oil products, model TS863-15. The worst in terms of the formation of explosive zones climatic and other conditions were used that determine the outcome of an emergency situation.

Schematic view of the extent of the explosion hazardous zone is shown in Pic 1.