

Создание перекрытий (галерей) над участками существующей железной дороги проводится с целью получения дополнительных площадей для строительства и благоустройства в черте города. Станет ли сортировочная станция под перекрытием большой площади более опасной при аварийных ситуациях с опасными грузами, является предметом данной работы. Из опасных грузов в данной статье рассматриваются только газообразные грузы.

Общая характеристика опасности сортировочных станций. Сортировочные станции предназначены для сортировки вагонов по направлениям следования и формирования из этих вагонов поездов. Кроме этого, на сортировочных станциях проводится осмотр и подготовка вагонов в техническом и коммерческом отношении, смена локомотивов и бригад, техническое обслуживание и экипировка локомотивов.

В состав станций входят приемо-отправочные и сортировочные парки с большим числом железнодорож-

УДК 656.212.5.08

Кандидаты техн. наук П. П. ШЕГЛОВ, В. И. ЖОЛОбОВ, ст. науч. сотр. С. К. АЛЕКСАНИЦ, стажер-исследователь А. В. ГАВРИЛОВА

ОСОБЕННОСТИ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЙ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ПЕРЕКРЫТИЕМ БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДИ (ГАЛЕРЕИ) И ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ОПАСНЫЕ ГРУЗЫ

ных путей. Для обеспечения бесперебойной работы по приему, сортировке и отправлению подвижного состава большая часть парков крупных станций автоматизирована.

Наибольшую пожарную опасность представляют сортировочные парки, где происходит значительное накопление вагонов; горючая нагрузка при этом может превышать 1000 кг/м². При нарушении правил безопасности при спуске вагонов с сортировочных горок, а также в процессе их торможения происходит сход подвижного состава, его повреждение. Соединение вагонов при спуске с горок с превышением установленных скоростей приводит к повреждению ваго-

нов, грузов, аварийному разливу и испарению опасных грузов.

Все особенности пожарной опасности технологического процесса сортировочных станций, находящихся под перекрытием большой площади, определяются наличием перекрытия и большого количества подвижного состава с различными грузами и проходящими пассажирскими поездами.

Такие сортировочные станции можно условно рассматривать как тоннели (железнодорожные, автомобильные), только большей площади, имеющие боль-

шое количество железнодорожных путей, на которых находится в отстое и движении значительное количество вагонов с различными грузами, в том числе и опасными. Высота перекрытия составляет 8...10 м и соответствует высоте железнодорожных тоннелей

Согласно [1, 2], опасность пожара в автотранспортном тоннеле обусловлена отсутствием диссипации генерируемой пожаром тепловой энергии (прежде всего лучистого тепла) в окружающую среду, что вызывает быстрое распространение зоны воздействия опасных факторов пожара на значительную часть сооружения: рост температуры в объеме тоннеля; блокирование путей эвакуации продуктами горения; заполнение токсичными продуктами горения прилегающих наземных территорий. При проектном пожаре скорость распространения дыма достигает 3,5 м/с, а условия, несовместимые с жизнью людей, могут сформироваться на длине тоннеля 200 м в течение 30 с.

Специфической, «железнодорожной», причиной пожара является крушение подвижного состава, сопровождающееся разрушением цистерн, сходом с рельсов, столкновением вагонов с опасными грузами или взрывом перевозимых грузов.

При пожаре горение развивается по длине тоннеля достаточно быстро, в результате чего происходит ин-

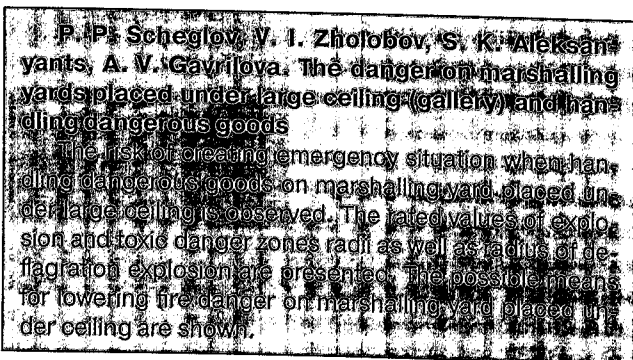


Таблица 1

Наименование тоннеля (страна)	Дата пожара	Место и причина пожара	Продолжительность пожара	Сведения о пострадавших
Коланд (США)	1945 г.	Загорание в тоннеле железнодорожного состава с сероуглеродом из-за нарушений правил перевозки	Тушение было невозможно до полного выгорания состава	Несколько человек
Югославия	1971 г.	Пожар вследствие неисправности дизельного двигателя локомотива	—	14 чел. погибли, 120 пострадали
Кродэ (Франция)	20.03.1971 г.	Тоннель длиной 226 м, столкновение нефтеналивного и грузового поездов из-за нарушения габарита подвижного состава	Трое суток до полного выгорания	2 чел. погибли
Хокуруку (Япония)	06.11.1972 г.	5,3 км от входа в 14-километровый тоннель. Загорание в курительном салоне пассажирского поезда	10 ч	30 чел. погибли, 714 травмированы
Конжер (США)	06.06.1974 г.	Сход с рельсов грузового поезда	80 ч	Пострадали несколько пожарных
Семмерингский (Австрия)	21.10.1977 г.	Столкновение пассажирских поездов. Загорание двух вагонов	2 ч	324 чел. пострадали
Трансбей (США)	17.01.1979 г.	1,5 км от входа в 5,8-километровый тоннель. Разрушение токоприемника о посторонний предмет	7,5 ч	1 пожарный погиб, 44 чел. ранены

тенсивное его задымление; разведка и тушение в этих условиях существенно осложняются, а иногда становятся невозможными.

Некоторые данные о пожарах в тоннелях, произошедших в различных странах, приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что продолжительность пожара в тоннелях довольно велика и составляет от 10 до 80 ч.

Такая продолжительность пожара связана, главным образом, с невозможностью применения пожарной техники из-за наличия плотного дыма, высокой среднеобъемной температуры и токсичности продуктов горения.

Выйти из создавшегося положения возможно только за счет оснащения тоннелей автоматической системой пожаротушения. Она должна обеспечить осаждение дыма, снижение среднеобъемной температуры и начальное тушение пожара. Это в свою очередь позволит вводить наружную передвижную технику пожаротушения.

Таким образом, приведенные в табл. 1 данные свидетельствуют, что пожары в тоннелях более опасны, чем на открытом пространстве.

Влияние перекрытия на характер изменения аварийной ситуации с газообразными грузами. Общий объем сортировочной станции под перекрытием в расчетах принят равным 4 800 000 м³ (ширина перекрытия — 300 м, длина — 2000 м, высота — 8 м).

При высоте вагонов от головки рельса до крыши 4,5 м объем свободного пространства с высотой 4,5 м составит: 4,5 × 300 × 2000 = 2 700 000 м³. Из этого объема от 30 до 50% занято вагонами, что составит от 810 000 до 1 350 000 м³. Таким образом, общий свободный объем под перекрытием будет составлять от 3 990 000 до 3 450 000 м³.

По своей природе газообразные грузы весьма разнообразны, в связи с чем для оценки их опасности выбраны грузы с различными свойствами: пропан, метан, сероводород, водород, хлор, аммиак.

Перевозка газообразных грузов осуществляется в сжатом и сжиженном состоянии.

Опасность возникает при истечении газа в результате отказа запорной арматуры, при возникновении пробоев и разливе сжиженного газа.

Вывавшийся газ, смешиваясь с воздухом, образует взрывоопасные и ядовитые смеси. При этом легкие газы (метан, водород, ацетилен, аммиак и др.) из-за наличия перекрытия не имеют возможности уйти в верхние слои атмосферы и также образуют взрывоопасные и токсичные смеси.

Радиусы взрывоопасных и токсичных зон (м) облаков, рассчитанные по приведенной ниже формуле (1) и зависимости радиусов от массы газа в смеси (кг) [3, 4], приведены в табл. 2, 3 соответственно:

$$R = 14,6 \left(\frac{m}{\rho C_{\text{нкпрп}}} \right)^{0,33}, \quad (1)$$

где m — масса газа, кг; ρ — плотность газа, кг/м³; $C_{\text{нкпрп}}$ — нижний концентрационный предел распространения пламени, ограничивающий область концентраций, превышающих его.

Из данных табл. 2 и 3 следует, что радиусы взрывоопасных и токсичных зон зависят от массы горючего газа в смеси и могут составлять большие величины. При этом радиусы токсичных зон превышают радиусы взрывоопасных зон этих же газов. Таким образом, небольшие залповые выбросы горючих и ядовитых газов могут привести к загрязнению значительных объемов пространства под перекрытием сортировочной станции.

Таблица 2

Наименование газа	Радиусы взрывоопасных зон, м, в зависимости от массы газа			
	50 кг	100 кг	1000 кг	5000 кг
Пропан	35,6	44,7	95,6	162,7
Сероводород	29,2	36,7	78,5	133,6
Метан	35,8	45,0	96,2	163,6
Аммиак	24,4	30,7	65,6	111,7
Водород	75,6	95,1	203,3	345,7

Таблица 3

Наименование газа	Радиусы токсичных зон, м, в зависимости от массы газа			
	50 кг	100 кг	1000 кг	5000 кг
Сероводород	110,6	139,1	297,4	505,8
Аммиак	75,6	94,9	203,1	345,4
Хлор	128,9	162,0	346,4	589,2

Процесс горения газов может носить диффузионный или кинетический характер в зависимости от условий смешения горючего газа с воздухом.

При горении газов образуются достаточно большие объемы продуктов горения. Так, при температуре окружающей среды 20 °С некоторые газы образуют следующие объемы продуктов горения, м³/кг:

Пропан	14,1
Метан.....	15,8
Водород.....	34,6
Аммиак.....	6,8
Сероводород.....	6,1

При теоретическом расчете в объеме продуктов горения кислород отсутствует. Опасность продуктов горения под перекрытием, если они даже не ядовиты (СО₂, N₂ и др.), заключается в снижении концентрации кислорода в воздухе до опасных значений. Например, каждая тонна пропана при горении образует 14096,2 м³ продуктов полного горения. В этом объеме кислород отсутствует. Следовательно, разбавляясь воздухом, продукты горения снижают концентрацию кислорода до опасных для человека значений (16,5...17%). Такие концентрации кислорода образуются при 6...6,5-кратном разбавлении продуктов горения воздухом. Возникающий объем продуктов горения от одной тонны пропана, смешиваясь с воздухом, образует опасную для человека по недостатку кислоро-

Таблица 4

Вещества, вид и способ их хранения	Значение коэф. X
Сжиженные под давлением газы	0,3...0,6
Газы, хранящиеся при постоянном давлении	1
Сжиженные путем охлаждения газы	0,1

да смесь объемом 84 577,2 м³ (14096,2×6), что составляет 2,1% общего свободного объема станции под перекрытием. При сгорании 10 т пропана будет загрязнено 21% общего объема.

Реальное диффузионное горение, как правило, протекает неполно. В продуктах горения содержится значительное количество продуктов неполного горения, многие из которых являются токсичными веществами. Так, в продуктах горения углеводородных газов может содержаться до 5% оксида углерода, что значительно увеличивает опасность для людей под перекрытием.

При дефлаграционном взрыве скорость выгорания газовой смеси непостоянна, но она ниже скорости звука. В расчетах давления при взрыве скорость выгорания взрывоопасной смеси принималась равной скорости звука — 340 м/с.

Радиус сгоревшей газовой смеси при дефлаграционном взрыве вычисляется по зависимости [4]

$$L_n = 101,7 \cdot 3 \sqrt{\frac{X \sigma Q}{M C_{\text{нкрп}}}}, \quad (2)$$

где L_n — радиус облака сгоревших газов, паров, м; σ — степень расширения сгоревших газов, паров, $\sigma = 4 + 4C_{\text{нкрп}}/C_{\text{стх}}$; $C_{\text{стх}}$ — стехиометрическая концентрация газа, пара, %; $C_{\text{нкрп}}$ — нижний концентрационный предел распространения пламени, %; M — молекулярная масса вещества; Q — масса вещества, участвующая во взрыве, т; X — коэффициент, зависящий от вида и способа хранения вещества, определяется по табл. 4.

Максимальное давление при взрыве зависит от скорости выгорания горючей смеси и вычисляется из выражения

$$P_{\text{max}} = 21,73 \frac{a^2}{1+a}, \quad (3)$$

где $a = \frac{\omega}{a_0}$; a_0 — скорость звука в сухом воздухе (340 м/с); ω — скорость распространения фронта пламени при взрыве (принимается от 38 до 340 м/с);

Так, радиусы сгоревших газовой смеси при дефлаграционном взрыве 1 т газа, рассчитанные по формуле (2), составляют, м:

Пропан.....	27,24
Метан.....	28,8
Сероводород.....	23,0
Аммиак.....	20,6
Водород.....	56,2

Радиус выгоревшей смеси зависит от массы горючего газа. Так, для 1 т пропана радиус дефлаграционного взрыва составляет 27,24 м, для 0,5 т — 21,4 м, для 0,1 т — 12,6 м. В связи с этим изменяется поражающее действие воздушной ударной волны.

Максимальное давление, рассчитанное по формуле (3) при скорости выгорания, равной скорости звука, составляет

$$P_{\text{max}} = 212,73 \frac{1^2}{1+1} = 106,4 \text{ кПа.}$$

Таблица 5

Коэффициенты B и C	Значения коэффициентов B и C , соответствующие величине коэффициента a										
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
B	0,588	0,567	0,687	0,546	0,467	0,595	0,497	0,362	0,476	0,432	0,257
C	1,146	1,146	1,0	1,048	1,14	1,115	1,002	1,061	1,149	1,09	1,004

Коэффициент a при скорости выгорания горючей смеси 340 м/с принят равным

$$a = \frac{\omega}{a_0} = \frac{340}{340} = 1,0.$$

Избыточное давление на фронте ударной волны при дефлаграционном взрыве на заданном расстоянии определяется из выражения:

$$\Delta P = \frac{P_{\max}}{1 + B \left(\frac{L}{L_n} - 1 \right)^C}, \quad (4)$$

где L — заданное расстояние от центра взрыва, м; B , C — коэффициенты (см. табл. 5).

Так, на расстоянии 100 м давление в воздушной ударной волне при взрыве смеси 1 т пропана с воздухом составляет

$$\Delta P = \frac{106,4}{1 + 0,476 \left(\frac{100}{28,1} - 1 \right)^{1,149}} = 43,1 \text{ кПа.}$$

На расстоянии 300 м давление в воздушной ударной волне составляет 13,8 кПа, на расстоянии 800 м — 4,6 кПа. Расчеты показывают, что небольшие массы пропана или другого горючего газа при дефлаграционном взрыве могут нанести материальный ущерб и травмы человеку на значительном расстоянии.

Воздушная ударная волна оказывает воздействие на человека и окружающие сооружения (табл. 6).

Таким образом, перекрытие способствует сохранению взрывоопасных концентраций газозвудушных смесей независимо от их плотности по воздуху. Кроме того, наличие многочисленного и разнообразного подвижного состава способствует сохранению опасных концентраций, препятствуя их рассеиванию.

Выводы. Возможные пути снижения пожарной опасности сортировочных станций:

1. Уменьшение источников зажигания при работе сортировочной станции. Тепловозы, проходящие под перекрытием или работающие под ним, должны быть оснащены искроулавливателями;

Таблица 6

Величина давления, кПа	Влияние воздушной ударной волны на человека
10 ... 20	Шум в ушах, неприятные ощущения
20 ... 40	Ушибы, вывихи, временное нарушение слуха, легкая контузия, потеря трудоспособности
40 ... 60	Контузия средней тяжести, повреждение органов слуха, кровотечение из носа и ушей, сильные вывихи конечностей. При отсутствии медицинской помощи возможен смертельный исход
61 ... 100	Тяжелая контузия, тяжелые переломы костей, сильные кровотечения из носа и ушей
100 и более	Смертельный исход

2. Ведение постоянного телевизионного контроля за состоянием цистерн с газообразными грузами;

3. Оборудование станции системами автоматического контроля обнаружения горючих и токсичных газов в воздухе и автоматической подачи тонкораспыленной воды для осаждения газов в случае их утечки, а в случае возникновения пожара — для осуществления процесса его локализации и тушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование передовых технологий пожаротушения для противопожарной защиты городских автотранспортных тоннелей / А. С. Чирко, А. В. Карпышев, М. Д. Сегаль, В. И. Степанчиков // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2004. № 2. С. 9...13.
2. Гришин А. Ф. Чрезвычайные ситуации в железнодорожных тоннелях и их последствия. Пожарная безопасность XXI века / Сборник трудов. 4-я Международная специализированная выставка. М., 27–30 сентября 2005 г.
3. Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справочник. Т. 1, 2. М.: Химия, 1990. 880 с.
4. Руководство по определению зон воздействия опасных факторов аварий со сжиженными газами, горючими жидкостями и аварийно химически опасными веществами на объектах железнодорожного транспорта / МПС. 1997. 124 с.

Кандидаты техн. наук П. П. ЩЕГЛОВ, В. И. ЖОЛОБОВ, инженеры С. К. АЛЕКСАНИЦ, Т. И. ШУБИНА

ПРОБЛЕМА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РОСПУСКЕ С СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРОК ЦИСТЕРН И КРЫТЫХ ВАГОНОВ С ГАЗООБРАЗНЫМИ ГРУЗАМИ ПОДКЛАССА 2.1

Многие опасные грузы, в том числе и газообразные, на перевозочных документах имеют штампель «С горки не спускать» [1, 2] или «С горки спускать осторожно». Это приводит к выполнению на сортировочных станциях дополнительного объема маневровых работ, снижению эффективности работы сортировочных горок, увеличению времени простоя вагонов на станциях, замедлению сроков доставки грузов. Накопление же вагонов с опасными грузами повышает пожароопасную ситуацию на станции. В связи с этим железные дороги неоднократно обращались в ОАО «РЖД» с предложениями о снятии запрета на роспуск вагонов с отдельными видами опасных грузов с целью ускорения их доставки и сокращения эксплуатационных расходов.

Критерии оценки опасности грузов, при наличии которых вагоны с опасным грузом нельзя спускать с сортировочной горки, отсутствуют.

Для решения проблемы снижения опасности газообразных грузов при маневровых работах, экстренном торможении и роспуске с сортировочных горок были проведены теоретические исследования опасности при аварийных ситуациях в процессе перевозок грузов класса 2.1 (негорючие и неядовитые газы).

P. P. Scheglov, V. I. Zholobov, S. K. Aleksanyants, T. I. Shubina. Problem of safety when sorting tank and covered cars with gaseous goods of 2.1 subclass from humps

The article is dedicated to evaluating gaseous goods hazard when emergency situations in order to reveal possibility of sorting cars with non-flammable and non-toxic gaseous goods of 2.1 subclass from humps.

Согласно ГОСТ 19433–88 газообразные грузы, составляющие класс 2, разделяются на четыре подкласса:

- 2.1 — негорючие и нетоксичные газы;
- 2.2 — ядовитые газы;
- 2.3 — горючие газы;
- 2.4 — ядовитые и горючие газы.

Физические свойства перевозимых грузов подкласса 2.1 приведены в табл. 1, некоторых грузов подкласса 2.3 — в табл. 2.

Из приведенных в табл. 1 и 2 данных видно, что при значительном различии в свойствах газов, их опасности для человека требования к роспуску с сортировочных горок во многих случаях одинаковы. Так, газообразные грузы подкласса 2.1 — негорючие и неядовитые газы имеют в большинстве своем те же штампели на перевозочных документах, что и грузы подкласса 2.3 и других подклассов.

При перевозке газообразных грузов в сжатом или сжиженном под давлением состояниях (независимо от природы газа) общая первичная опасность заключается в возможности разгерметизации емкости (баллона, контейнера, цистерны). Причинами разгерметизации могут быть:

- избыточное давление при заполнении баллонов сжатым газом;
- избыточное наполнение емкости сжиженным газом;
- неправильная упаковка баллонов в вагоне;
- повышенная скорость при роспуске с сортировочной горки;
- отсутствие защитных щитов у цистерн с газообразными грузами.

Таблица 1

Наименование газа (состояние при перевозке)	Мол. масса	$T_{кр}, ^\circ\text{C}$	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	Плотность по воздуху	$T_{кип}, ^\circ\text{C}$	Штампель на документах
Азот (сжатый)	28	–149,9	1,16	0,96	–195,8	Спускать с горки осторожно
Аргон (сжатый)	40	–122,5	1,66	1,4	–185,9	То же
Гелий (сжатый)	4,0	–267,9	0,16	0,14	–268,9	»
Закись азота (сжиженный)	44	36,4	1,83	1,5	–88,5	»
Октафторциклобутан (сжиженный)	200	—	8,3	6,89	–6	»
Сера шестифтористая (сжиженная)	146	45,5	6,07	5,03	–64,9 (возгорание)	»
Дифторхлорметан (сжиженный)	86,5	—	3,59	2,98	–40,8	»
Двуокись углерода (сжиженная)	44	31,0	1,83	1,5	–78,5 (возгорание)	»
Гексафторпропилен (сжиженный)	150	—	6,23	5,2	–29	»
Неон (сжатый)	20	–228,7	0,83	0,69	–246	»
Ксенон (сжиженный)	131	16,6	5,46	4,5	–108	»
Кислород (сжатый)	32	–118,4	1,33	1,1	–182,9	»

Таблица 2

Наименование газа (состояние при перевозке)	Молекулярная масса	$T_{кр}, ^\circ C$	Плотность, кг/м ³	Плотность по воздуху	$T_{кип}, ^\circ C$	Штемпель на документах
Ацетилен растворенный (сжатый)	26	35,2	1,08	0,89	-89,8	Спускать с горки осторожно
Бутадиен ингибированный (сжиженный)	54	173,5	2,25	1,86	10,8	То же
Бутан (сжиженный)	58	152	2,41	2,0	-0,5	»
Бутилен (сжиженный)	56	147,4	2,33	1,93	-6,3	»
Винилацетилен (сжиженный)	52		2,16	1,79	5,5	»
Винилхлорид (сжиженный)	62,5	156,5	2,59	2,13	-13,4	»
Водород (сжатый)	2	-239,9	0,083	0,0689	-252,7	»
Газы углеводородные (сжиженные)						»
Изобутан (сжиженный)	58	134,8	2,41	2,0	-11,7	»
Изобутилен (сжиженный)	56	144,7	2,33	1,93	-16,9	»
Метан (сжатый)	16	-82,3	0,66	0,55	-161,5	»
Метилхлорсилан						С горки не спускать
Пропан (сжиженный)	44	96,8	1,83	1,51	-42	Спускать с горки осторожно
Пропилен (сжиженный)	42		1,75	1,45	-47,7	То же
Псевдобутилен (сжиженный)	56		2,33	1,93		»

По опасности при аварийной ситуации газообразные грузы различных подклассов значительно различаются между собой. Различие заключается:

- в воздействии на организм человека;
- в способности загрязнять окружающую среду (воздух, воду, почву);
- образовывать взрывоопасные смеси с воздухом;
- образовывать ядовитые (токсичные) смеси с воздухом.

Первичная опасность при аварийной ситуации газообразного груза любого подкласса для человека появляется в момент разгерметизации емкости. Разгерметизация может сопровождаться физическим взрывом и разбросом осколков емкости на значительное расстояние. Освобождение сжиженного газа под давлением сопровождается взрывообразным вскипанием, при котором более 30% массы сжиженного газа превращается в газообразное состояние. При этом чем выше температура кипения газа, тем меньшая часть сжиженной массы превращается в газообразное состояние. Вылившийся сжиженный газ будет иметь температуру, равную его температуре кипения.

Так как грузы подкласса 2.1 являются веществами негорючими и неядовитыми, их опасность для человека проявляется в виде удушающего действия. Смешиваясь с воздухом, они снижают концентрацию кислорода до опасных значений.

Известно, что концентрация кислорода ниже 17% является опасной для человека.

Концентрация кислорода, %	Воздействие на человека
17	Увеличивается дыхательный объем, замедляется мышечная координация, внимание и мышление требуют больших усилий
14	Головокружение, головная боль, укороченное дыхание, быстрая утомляемость, учащается пульс
11	Тошнота, невозможность двигательной функции
8	Бессознательное состояние
6	Смерть в течение 6–8 мин

Например, при выходе азота из тары происходит его смешение с воздухом. При этом каждые 100 м³ азота, смешиваясь с воздухом, образуют объемы смесей с различным содержанием кислорода:

смесь, состоящая из 100 м³ азота и 91 м³ воздуха, содержит 10% кислорода;

смесь, состоящая из 100 м³ азота и 133 м³ воздуха, содержит 12% кислорода;

смесь, состоящая из 100 м³ азота и 320 м³ воздуха, содержит 16% кислорода;

смесь, состоящая из 100 м³ азота и 425 м³ воздуха, содержит 17% кислорода;

смесь, состоящая из 100 м³ азота и 950 м³ воздуха, содержит 19% кислорода.

Таким образом, чтобы удушающее действие за счет снижения концентрации кислорода проявлялось в меньшей степени, любой газ подкласса 2.1 (кроме кислорода) должен быть разбавлен воздухом минимум в отношении 1:3,5.

Согласно [3], при 14...15% кислорода в воздухе человек не испытывает особых болезненных явлений.

При утечке кислорода воздушная атмосфера обогащается окислителем-кислородом.

Кислород — бесцветный газ, без запаха, является основной составной частью воздуха (20,8% объемных долей). Растворимость в воде составляет 30 мл в 1 л воды при температуре 20 °С.

Кислород — негорючий газ, но энергично поддерживает горение. В атмосфере, обогащенной кислородом, горючие вещества становятся более опасными: легче загораются, имеют более низкую температуру самовоспламенения, более широкий диапазон концентрационных пределов распространения пламени, большую скорость выгорания и полноту горения. Трудногорючие и многие негорючие вещества в атмосфере становятся горючими.

Значения концентрационных пределов распространения пламени некоторых веществ в воздухе и кислороде приведены в табл. 3.

Таблица 3

Вещество	Концентрация веществ в следующих пределах			
	в воздухе, %		в кислороде, %	
	Нижний	Верхний	Нижний	Верхний
Метан	5	15	5,1	61
Пропан	2,1	9,5	2,1	57,5
Бутан	1,8	8,5	1,8	51

Таблица 4

Концентрация оксида углерода IV в воздухе, % в объемных долях	Воздействие на организм человека
0,5	Вредных воздействий не наблюдается в течение 8 ч Частое и тяжелое дыхание, воздухообмен увеличивается на 200% Терпимое предельное состояние Потеря координации, потеря сознания Смерть в течение часа
4,0	
7...9	
10...12	
15...20	

Минимальная энергия зажигания горючих веществ в атмосфере кислорода в несколько раз ниже, чем в воздухе. Например, у ацетилен в 400, у метана в 75, пропана в 130 раз.

Атмосфера, обогащенная кислородом, также представляет опасность для человека, как и обедненная им.

При выходе кислорода из тары происходит его смешение с воздухом, при котором концентрация кислорода в воздухе повышается.

При этом каждые 100 м³ кислорода, смешиваясь с воздухом, образуют объемы с различным повышенным содержанием кислорода:

- смесь, состоящая из 100 м³ кислорода и 1875 м³ воздуха, содержит 25% кислорода;
- смесь, состоящая из 100 м³ кислорода и 777 м³ воздуха, содержит 30% кислорода;
- смесь, состоящая из 100 м³ кислорода и 315 м³ воздуха, содержит 40% кислорода;
- смесь, состоящая из 100 м³ кислорода и 102 м³ воздуха, содержит 60% кислорода.

Согласно [3], пороговое значение максимального содержания кислорода для человека составляет 40...60%.

В баллонах в сжатом состоянии перевозятся газы: кислород, аргон, смесь аргона с кислородом, воздух, гелий, неон, азот.

Стандартный баллон имеет емкость 40 л, газ находится под давлением 150 атм. Испытательное давление баллонов составляет 300 атм. Такое давление в баллоне со сжатым газом может создаваться при температуре более 300 °С. Это возможно только в случае попадания баллона в зону пожара или при соударении с соседни-

ми баллонами или стенкой вагона, приводящем к разрушению целостности баллона.

При разгерметизации баллона с каким-либо сжатым удушающим газом в воздух поступит порядка 6 м³ газа. Такой объем газа, смешиваясь с воздухом, образует объемы с различным содержанием кислорода. При этом предельно низкое содержание кислорода для человека (14%) содержится в смеси объемом 18 м³, с содержанием 16% — 25,2 м³, с содержанием 17% — 31,5 м³. Все опасные концентрации, образующиеся при разгерметизации одного баллона, умещаются в объеме одного вагона. Это необходимо учитывать при вскрытии вагона.

При утечке сжатого кислорода атмосфера вагона обогащается кислородом. При этом 6 м³ кислорода создадут предельную опасную для человека концентрацию (40%) в объеме 24,9 м³.

В сжиженном состоянии под давлением в баллонах перевозятся: ксенон, гексафторпропилен, огнетушители углекислотные, углекислота, хладон 12 (дифтордихлорметан), хладон 612, ксенон, закись азота (оксид азота I).

Сжиженного газа в стандартном баллоне содержится примерно 50 кг в зависимости от плотности жидкой фазы. Такая масса, например, сжиженного углекислого газа, превращаясь в газообразное состояние, занимает объем 27,3 м³ при температуре 20 °С. Такой объем углекислого газа может создать с воздухом смесь объемом 190,8 м³, в котором концентрация кислорода будет составлять 18%, концентрация углекислого газа 9%. Опасность углекислоты для человека приведена в табл. 4.

Выводы. 1. При перевозке сжатых газов подкласса 2.1 в крытых вагонах в случае аварийной ситуации, связанной с разгерметизацией или разрушением одного баллона, опасная для человека удушающая концентрация создается только внутри вагона. Наименьшую опасность представляют газы, которые легче воздуха (гелий, неон, азот).

2. Разрушение баллона с сжатым газом вследствие повышенного давления может быть только при условии попадания вагона в зону пожара. При надлежащей упаковке баллонов в вагоне и нормативном наполнении их газом ограничение на розпуск с сортировочных горок можно снять.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила безопасности и порядок ликвидации аварийных ситуаций с опасными грузами при перевозке их по железным дорогам. № ЦМ-407 / МПС России, 1997. 433 с.
2. Правила перевозок опасных грузов железнодорожным транспортом. М.: Транспорт, 1997. 250 с.
3. Лазарев Н. В. Вредные вещества в промышленности. Т. III. М.: Химия, 1977. 300 с.

НАУКА ПРОИЗВОДСТВУ

Порожняя тара (цистерны, баллоны) после слива сжиженных газов представляет определенную опасность при транспортировании, в том числе при роспуске с сортировочных горок.

В Правилах перевозки опасных грузов железнодорожным транспортом [1] отмечается, что порожние баллоны (сосуды, специализированные контейнеры) из-под газов должны перевозиться как опасный груз на условиях, установленных для сжатых и сжиженных газов. При этом остаточное давление должно соответствовать нормам, установленным Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением [2].

В докладе на НТС МПС «О роспуске через сортировочные горки порожних цистерн после слива сжиженных газов» отмечается, что многие жидкие газы, перевозимые в цистернах в смеси с воздухом, взрывоопасны независимо от давления смеси в цистерне. Порожние цистерны из-под сжиженных газов явля-

турам кипения. Температуры кипения некоторых газов составляют, °С:

пропан.....	-42
этан.....	-85,1
хлор.....	-34,1
хлористый водород.....	-85,1
диметиловый эфир.....	-23,6
бутан.....	-0,5
изобутан.....	-117
бутадиен.....	-4,5

При падении давления до атмосферного жидкая фаза вскипает, и часть сжиженного газа мгновенно превращается в газообразное состояние.

УДК 656.25.073.4:661.9

Кандидаты техн. наук **П. И. ЩЕГЛОВ, В. И. ЖОЛОБОВ,**
инженеры **С. К. АЛЕКСАНИЦ, Т. И. ШУБИНА**

О ТРАНСПОРТИРОВАНИИ ПОРОЖНИХ ЦИСТЕРН ПОСЛЕ СЛИВА СЖИЖЕННЫХ И СЖАТЫХ ГАЗОВ

ются опасными и в ряде случаев даже опаснее груженых. Однако каких-либо фактов, расчетов о возможности образования взрывоопасных смесей в цистернах и окружающей среде не приводится.

Действительно ли порожние цистерны из-под сжиженных газов могут представлять большую опасность, а иногда быть более опасными, чем груженые?

Рассмотрению опасности порожней тары из-под сжиженных и сжатых газов посвящена данная статья.

Газообразные вещества транспортируют в сжатом, сжиженном под давлением, сжиженном охлажденном и растворенном под давлением состояниях.

Газы, сжиженные под давлением. В цистернах сжиженные под давлением газы при температурах перевозки (особенно в летний период) находятся в перегретом состоянии по отношению к их темпера-

Доля перехода сжиженного газа в газообразное состояние зависит *от температуры окружающей среды и природы газа*. Так, для пропана эта величина составляет:

Температура, окружающей среды, °С	Доля мгновенно испарившейся жидкой фазы, % масс
-30	7
-20	13
-10	19
0	25
+10	31
+20	37
+25	40

Если сжиженный под давлением газ сливался при температуре окружающей среды ниже его температуры кипения, то в цистерне могут быть остатки сжиженного газа. Этот остаток при повышении температуры перейдет в газообразное состояние. При этом каждый килограмм жидкого газа будет превращаться в определенный объем газа. Величина объема будет зависеть *от температуры окружающей среды и природы газа*. Расчеты показывают, что каждый килограмм сжиженного пропана, хлора, бутана при различных температурах образует следующие объемы газов (табл. 1).

Из табличных данных следует, что переход каждых 100 кг жидкой фазы в газовую при +20 °С в цис-

P. P. Scheglov, V. I. Zholobov, S. K. Aleksanyants, T. I. Shubina. On transportation of empty tank cars after discharging liquefied and compressed gases.

The evaluating hazard of empty liquefied gases tank cars is fulfilled. The corresponding propositions on strict observance of «Rules on presence of excessive residual pressure after discharge» are made. It is shown that in empty tank cars explosive gas concentration can't be generated.

Таблица 1

Температура окружающей среды, °С	Объем газовой фазы при испарении килограмма жидкой фазы газа, м ³		
	Пропан	Хлор	Бутан
10	0,52	0,32	0,40
20	0,54	0,34	0,41
30	0,56	0,35	0,43
40	0,58	0,36	0,44

терне объемом 60 м³ даст следующее приращение давления ΔP, ат:

для пропана..... 0,9
 » хлора..... 0,56
 » бутана..... 0,68

Таким образом, если в цистерне было нормальное давление после слива сжиженного газа при отрицательных температурах, то оставшиеся в цистерне 100 кг сжиженного газа (пропан, хлор, бутан), испаряясь, создадут допустимое давление согласно требованию Правил [2].

Имеет ли цистерна после слива сжиженного газа жидкую фазу и при каких температурах она исчезнет, если избыточное остаточное давление в цистерне, согласно [2], должно быть не менее 0,5 ат?

Требование Правил о величине избыточного допустимого давления является одним из основных, опираясь на которое возможно выявить наличие жидкой фазы в цистерне после слива и температуру, при которой она исчезает.

Для определения наличия жидкой фазы в цистерне из-под сжиженного газа, принимая избыточное остаточное давление 0,7 ат, необходимо вычислить давление газовой фазы при температурах близких к температуре кипения слитого жидкого газа. Расчет ориентировочного давления проводится по формуле

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{\Delta H_{\text{исп}}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right), \quad (1)$$

где ΔH_{исп} — теплота испарения сжиженного газа, кДж/моль; R — универсальная газовая постоянная (8,31 Дж/моль·град); P₁ — атмосферное давление, мм рт. ст. или кПа; P₂ — определяемое давление, ат, мм рт. ст. или кПа; T₁ — температура кипения вещества, К; T₂ — задаваемая температура, К, или по формуле Антуана

$$\lg P = A - \frac{B}{C+t} \quad (2)$$

или

$$\lg P = A - \frac{B}{T}, \quad (3)$$

где A, B, C — коэффициенты для данного газообразного вещества (справочные данные); t — температура, °С; T — температура, К.

Давление газовой фазы пропана, хлора, диметилового эфира, бутана при наличии жидкой фазы в зависимости от температуры представлено на рис. 1.

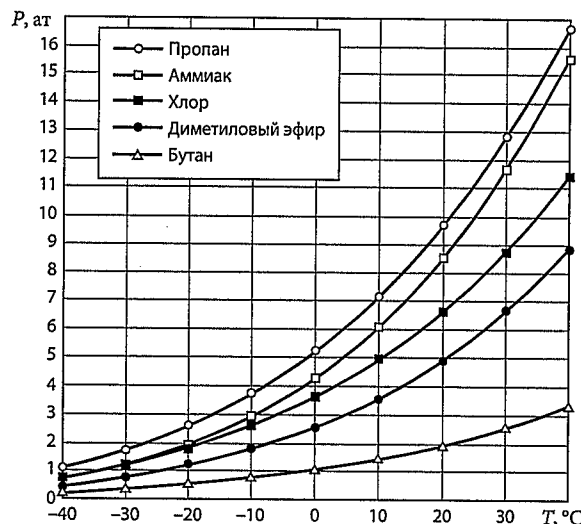


Рис. 1. Зависимость давления внутри цистерны от температуры при наличии жидкой фазы

Из рис. 1 видно, что при наличии жидкой фазы в цистерне при температурах окружающей среды, имеющих место при транспортировании, давление колеблется в широком интервале. Так, для пропана оно составляет от 1,2 до 16,5 ат, для аммиака от 0,5 до 15,5 ат.

После слива сжиженного газа в цистерне может оставаться жидкая фаза в зависимости от температуры окружающей среды. После слива сжиженного газа при низких температурах (зимний период) и требуемом избыточном остаточном давлении 0,5...0,7 ат в цистерне оставшаяся жидкая фаза с повышением температуры будет переходить в газообразную фазу.

Переход остатка жидкой фазы в газовую при постоянстве избыточного остаточного давления будет заканчиваться при определенной температуре для каждого газа.

При отсутствии жидкой фазы изменение давления от температуры будет подчиняться общему газовому закону:

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_1 V_1}{T_1}. \quad (4)$$

Изменение давления с дальнейшим повышением температуры будет носить другой характер (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что в точке исчезновения жидкой фазы меняется характер зависимости давления газовой фазы от температуры. При этом избыточное остаточное давление было принято равным 0,7 ат.

Так, для пропана при температурах выше минус 25 °С жидкой фазы не должно быть, если сохраняется избыточное давление 0,7 ат, так как при наличии жидкой фазы давление газовой фазы при температуре минус 20 °С составляет 2,5 ат, что выше избыточного остаточного давления. Температура, при которой исчезает жидкая фаза, для каждого газа будет своя. Так, для хлора она должна составлять минус 20 °С, для диметилового эфира — минус 10 °С, для бутана — плюс 20 °С.

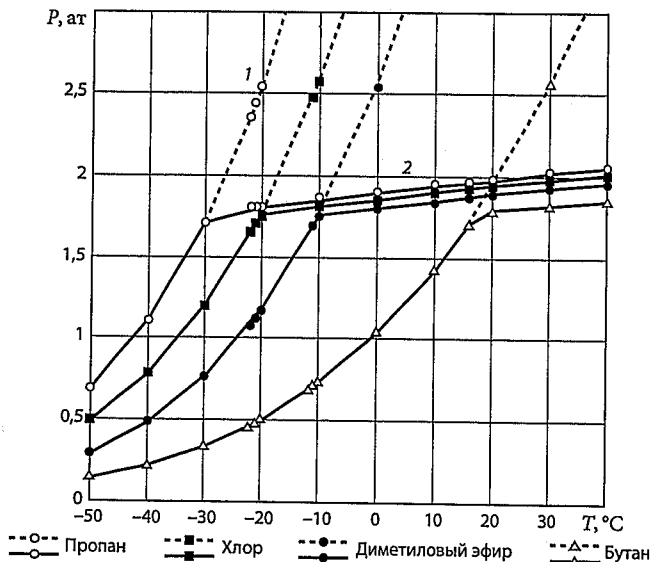


Рис. 2. Зависимость давления газовой фазы от температуры при наличии (1 — пунктир) и отсутствии (2 — сплошная линия) жидкой фазы

Если слив сжиженного под давлением газа проводился при положительных температурах, то для большинства газов, имеющих низкую температуру кипения, жидкой фазы быть не должно, если избыточное остаточное давление будет соответствовать нормативному значению.

При отсутствии жидкой фазы давление в цистерне при повышении температуры будет создаваться только за счет расширения газовой фазы.

При этом опасное давление в цистерне за счет расширения газа может создаваться только при высоких температурах (выше 500 °С). Так, ориентировочное давление для пропана в цистерне за счет расширения газовой фазы при различных температурах составляет:

Температура, °С	Давление, ат
20	2,01
50	2,21
100	2,70
500	5,30

Таким образом, если цистерна после слива не содержит жидкой фазы, давление в цистерне не может

Таблица 2

Наименование газа и его формула	Молекулярная масса	Температура, °С		Теплота испарения, кДж/моль	Плотность по воздуху
		кипения	критическая		
Азот, N ₂	28	-195,8	-149,9	5,59	0,96
Аргон, Ar	39,9	-185,9	-122,5	6,51	1,37
Водород, H ₂	2	-252,7	-239,9	0,92	0,068
Воздух	29	-193,1	-143,2	5,84	1,0
Кислород, O ₂	32	-182,9	-118,4	6,82	1,1
Криптон, Kr	84	-153,2	-63,7	9,05	2,89
Метан, CH ₄	16	-161,5	-82,3	8,17	0,55
Неон, Ne	20	-246,0	-228,7	1,79	0,69

представлять опасности при положительных температурах.

Взрывоопасная смесь (горючий газ + воздух) в цистерне с избыточным давлением образоваться не может. Если по какой-либо причине (негерметичность запорной арматуры, пробой цистерны и т. д.) избыточное давление станет равным нулю, то в цистерну за счет диффузии проникнет воздух и может образоваться взрывоопасная смесь. Однако, чтобы произошел взрыв образовавшейся смеси, необходим источник зажигания.

Газы сжиженные охлажденные. Газы сжиженные охлажденные имеют не только низкие температуры кипения, но и низкие критические температуры (табл. 2).

Эти газы при температурах выше критических могут существовать только в газовой фазе. Даже при низких температурах перевозки (-50 °С) при наличии жидкой фазы давление газовой фазы составляет значительные величины, ат:

- для кислорода..... 226,4
- » метана..... 81,8
- » криптона..... 67,2
- » аргона..... 5,4

По этой причине криогенные цистерны для перевозки таких газов имеют клапаны для сброса избыточного давления, которое не должно быть более 5 ат для кислорода. После слива сжиженных газов в цистерне жидкой фазы быть не должно, если избыточное остаточное давление будет соответствовать требованиям Правил [2].

Опасность порожних цистерн из-под сжиженных газов. Принимая во внимание отсутствие жидкой фазы (летний период) и наличие избыточного давления (ΔP = 0,7 ат), при аварийной ситуации из цистерны может быстро выйти $\frac{60 \text{ м}^3 \cdot 0,7 \text{ ат}}{1 \text{ ат}} = 42 \text{ м}^3$ газа. Остальная часть газа, имея атмосферное давление, выходить из цистерны будет за счет диффузии и внешних конвективных потоков.

Вышедший объем газа будет представлять опасность для человека в зависимости от физико-химических и токсичных свойств этого газа:

если газ легче воздуха, то вышедший объем газа уйдет в верхние слои атмосферы (водород, гелий, метан и т. д.);

если газ негорючий, тяжелее воздуха и неядовитый (кислород, закись азота, углекислый газ и т. д.), то вышедший объем газа может создать некомфортные условия для дыхания в зависимости от его концентрации;

если газ горючий и тяжелее воздуха (пропан, бутан, бутадиен и т. д.), то вышедший объем газа может создать в определенном радиусе взрывоопасную концентрацию.

Величина взрывоопасной зоны может быть рассчитана по формуле [3]

$$X_{\text{нкрп}} = 14,6 \left(\frac{M_p}{\rho C_{\text{нкрп}}} \right)^{0,33} \quad (5)$$

где $X_{\text{нкрп}}$ — расстояние по горизонтали от источника, ограниченное нижним концентрационным пределом распространения пламени, м; M_p — масса газа, поступившая в окружающее пространство, кг; $C_{\text{нкрп}}$ — нижний концентрационный предел распространения пламени, %; ρ — плотность газа, кг/м³.

Например, вышедшие 42 м³ пропана из цистерны при температуре 20 °С имеют массу 76,8 кг. Плотность пропана 1,83 кг/м³, нижний концентрационный предел распространения пламени равен 2 %. Подставляя данные в формулу (5), получим радиус взрывоопасной зоны:

$$X = 14,6 \left(\frac{76,8}{1,83 \cdot 2} \right)^{0,33} = 39,86 \text{ м.}$$

Таким образом, взрывоопасная концентрация вышедшим объемом пропана может создаваться в радиусе 39,86 м при скорости движения воздуха менее 0,5 м/с и состоянии атмосферы — инверсия;

если газ ядовитый и тяжелее воздуха (хлор, сернистый газ, хлороводород и т. д.), то вышедший объем создаст опасную атмосферу определенного радиуса в зависимости от токсичности газа. Например, вырвавшиеся из цистерны 42 м³ хлора имеют массу 124 кг. Плотность газообразного хлора при температуре 20 °С — 2,92 кг/м³. Опасная для жизни концентрация хлора при экспозиции 5...10 мин составляет 0,023 % объемных. Используя формулу (5), получим радиус токсичной зоны:

$$X = 14,6 \left(\frac{124}{2,95 \cdot 0,023} \right)^{0,33} = 174,1 \text{ м}$$

при состоянии атмосферы — инверсия и скорости ветра менее 0,5 м/с.

При других состояниях атмосферы (изотермия, конвекция) радиусы опасных зон значительно уменьшаются (от 4 до 15 раз).

Все отмеченные возможные радиусы взрывоопасных и токсичных зон не идут в сравнение с опасностью груженых цистерн.

Опасность порожних баллонов из-под сжатых газов с избыточным остаточным давлением 0,7 ат. В сжатом состоянии перевозят такие газы, как азот, аргон, инерген, кислород, водород, метан, трифторэтан и т. д.

Стандартный баллон для сжатых газов имеет объем 40 л, следовательно, при нарушении целостности баллона наружу в первый момент может быстро (залпом) выйти $(40 \cdot 0,7 \text{ ат}) / 1 \text{ ат} = 28 \text{ л}$ газа. Оставшийся объем газа, имея атмосферное давление, будет вы-

ходить наружу за счет диффузии. Вышедшие 28 л газа могут представлять опасность внутри вагона в зависимости от природы газа (ядовитый, неядовитый, легче или тяжелее воздуха). Вне вагона такой объем газа большой опасности представлять не будет.

Выводы. 1. Порожние цистерны из-под большинства сжиженных под давлением газов при сохранении избыточного остаточного давления не более 0,7 ат при положительных температурах не имеют жидкой фазы (исключение составляют бутан, бутадиев). При этом давление в цистерне с повышением температуры окружающей среды не представляет опасности. При наличии избыточного нормативного остаточного давления взрывоопасная концентрация газа внутри цистерны образоваться не может. Наиболее опасны цистерны из-под ядовитых газов, так как при разгерметизации остатки газовой фазы могут создать токсичную зону значительного радиуса в зависимости от состояния атмосферы.

2. В порожних цистернах из-под сжиженных охлажденных газов при температурах внешней среды выше их критических температур жидкой фазы не должно быть. Повышение давления в цистерне может происходить только за счет расширения газа.

3. Порожние баллоны из-под сжатых газов при остаточном давлении 0,7 ат могут представлять реальную опасность только внутри вагона. Если горючий газ легче воздуха (метан, водород, ацетилен и т. д.), то взрывоопасная концентрация горючего газа в случае его утечки из одного баллона образоваться может только внутри вагона. Поэтому перед входом в вагон необходимо его проветривать. Укладка порожних баллонов из-под горючих газов в вагоне должна соответствовать требованиям Правил перевозки опасных грузов по железным дорогам.

4. Требование Правил [2] о наличии избыточного остаточного давления в цистернах после слива сжиженного газа является актуальным и должно выполняться неукоснительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила перевозки опасных грузов железнодорожным транспортом. М.: Транспорт, 1997.
2. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. М.: Недра, 1989.
3. Руководство по определению зон воздействия опасных факторов аварий с сжиженными газами, горючими жидкостями и аварийно-химически опасными веществами на объектах железнодорожного транспорта / МПС, 1997.