

УДК 614.841.12

## ОЦЕНКА РИСКА, СОЗДАВАЕМОГО ТОВАРНО-СЫРЬЕВЫМ ПАРКОМ СО СЖИЖЕННЫМИ УГЛЕВОДОРОДНЫМИ ГАЗАМИ

Ильюшонок А.В., к.ф.-м.н., доцент,  
Дмитриченко А.С., к.т.н., доцент,  
Лодята С.А.

*Проведен анализ риска товарно-сырьевого парка со сжиженными углеводородными газами. Выполнена оценка риска для товарно-сырьевого участка Белорусского газоперерабатывающего завода.*

Аварии и катастрофы последнего времени приводят к выводу: двигаясь по пути технического прогресса, человек подвергает себя все возрастающему риску. Техносфера, созданная человеком для защиты от внешних воздействий, сама становится источником опасности. Общепринятой количественной мерой уровня опасности, создаваемой технологическим объектом, является оценка риска [1, 2]. Оценка риска позволяет дифференцировать техногенные объекты по уровню потенциальной опасности, которую они представляют для человека и окружающей природной среды. Одними из наиболее распространенных потенциально-опасных объектов для Республики Беларусь являются товарно-сырьевые парки со сжиженными углеводородными газами (СУГ). Анализ и оценка индивидуального риска, создаваемого такими объектами, явились целью данной работы.

Согласно [3] индивидуальный риск – это вероятность (частота) появления опасных факторов пожара и взрыва в определенной точке пространства. Индивидуальный риск – это мера возможности наступления негативных последствий для здоровья человека в результате воздействия поражающих факторов. Чаще всего определяется вероятность гибели одного человека (в допущении, что он все время находится в данной точке пространства) за год.

Если в течение года на рассматриваемом объекте может произойти  $n$  опасных событий (инициирующих аварий), то величина индивидуального риска рассчитывается по формуле [3 – 5]

$$R = \sum_{i=1}^n Q_{ABi} \cdot Q_{\Pi i}, \quad (1)$$

где  $Q_{ABi}$  – вероятность возникновения  $i$ -й инициирующей аварии,  $Q_{\Pi i}$  – условная вероятность поражения человека, находящегося на заданном расстоянии от места возникновения аварии. С учетом того, что одна и та же авария, связанная с проливом СУГ, может развиваться по нескольким вет-

вям (горение пролива, образование огненного шара, сгорание облака с развитием избыточного давления [3]) с возникновением ряда поражающих факторов (тепловое излучение, ударные волны), соотношение для оценки риска принимает вид

$$R = \sum_{i=1}^n Q_{ABi} \cdot \sum_{j=1}^{m_i} (Q_{\Phi ij} \cdot Q_{\Pi ij}) , \quad (2)$$

где  $Q_{\Phi ij}$  – вероятность развития  $i$ -й аварии по  $j$ -й ветви логической схемы с возникновением  $j$ -го поражающего фактора,  $m_i$  – количество сценариев развития  $i$ -й аварии,  $Q_{\Pi ij}$  – условная вероятность поражения человека, находящегося на заданном расстоянии от места возникновения аварии,  $j$ -м поражающим фактором при развитии аварии  $i$ -го типа по  $j$ -й ветви логической схемы. Условная вероятность поражения человека тем или иным поражающим фактором вычисляется с использованием пробит-функций [2 – 6]. Следовательно, для расчета индивидуального риска необходимо определить вероятности возникновения инициирующих аварий и вероятности развития этих аварий по различным ветвям дерева событий.

Аварийные ситуации на товарно-сырьевых парках связаны с выходом СУГ в атмосферу. Их можно разделить на три типа по стадиям технологического процесса, а именно, ситуации возникающие при приеме, хранении и выдаче СУГ потребителям. Рассмотрим типичные аварийные ситуации.

### 1. Прием СУГ в резервуар от железнодорожной цистерны.

*Ситуация 1.1.* Разгерметизация железнодорожной цистерны. Частоту такого события примем равной  $1 \cdot 10^{-4}$  год<sup>-1</sup> [7].

*Ситуация 1.2.* Разгерметизация трубопровода между железнодорожной цистерной и резервуаром. Частота возникновения утечки в этом случае определяется частотой отказа трубопровода и составляет  $5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup> [8]. При такой ситуации происходит истечение СУГ до срабатывания запорной арматуры. Согласно [8], в 10 % случаев происходит полный разрыв трубопровода, а в 90 % – выброс его содержимого через отверстие в стенке.

### 2. Хранение СУГ в резервуаре.

*Ситуация 2.1.* Разгерметизация резервуара. Основной причиной разгерметизации резервуара может быть разрушение резервуара вследствие его износа. Частота события может быть принята  $10^{-6}$  год<sup>-1</sup> для двустенных резервуаров и  $10^{-4}$  год<sup>-1</sup> для одностенных резервуаров [8].

### 3. Выдача СУГ в железнодорожную цистерну.

*Ситуация 3.1.* Разгерметизация трубопровода между резервуаром и железнодорожной цистерной. Ситуация аналогична 1.2.

*Ситуация 3.3.* Разгерметизация железнодорожной цистерны. Ситуа-

ция аналогична 1.1.

Все приведенные аварийные ситуации состоят из событий, приведенных в таблице 1.

Таблица 1.

## Информация по частотам аварий на складах с СУГ

Событие	Частота	Источник
1. Разгерметизация резервуара:		
а) двухстенного	$1 \cdot 10^{-6}$ год <sup>-1</sup>	[8]
б) одностенного	$1 \cdot 10^{-4}$ год <sup>-1</sup>	[8]
2. Разгерметизация железнодорожной цистерны	$1 \cdot 10^{-4}$ год <sup>-1</sup>	[7]
3. Разгерметизация трубопровода между железнодорожной цистерной и резервуаром	$5 \cdot 10^{-6}$ м <sup>-1</sup> ·год <sup>-1</sup> (90% случаев - выброс содержимого через отверстие в стенке трубопровода до тех пор, пока утечка не будет остановлена; 10% случаев - полный разрыв трубопровода)	[8]

В результате аварий происходит вскипание перегретой жидкости и образование из нее охлажденных до температуры кипения газовой фазы аэрозольных капель, пролив жидкой фазы на подстилающую поверхность, растекание, кипение и испарение жидкой фазы с поверхности, интенсивное смешение с воздухом, рассеяние газокапельного облака СУГ (первичное и вторичное облако). При наличии источника зажигания происходит воспламенение облака и (или) жидкой фазы, горение пролива и облака топливно-воздушной смеси (ТВС), воздействие ударных волн, открытого пламени и теплового излучения на людей и близлежащие объекты. Если масса разлива больше тонны, горение облака может перерасти в огненный шар. При этом событии облако, переобогащенное топливом и неспособное объемно детонировать, горит вокруг своей оболочки и вытягивается вверх. Поднимаясь, оно принимает форму гриба, ножка которого – сильновосходящие конвективные потоки. Это течение может всасывать предметы, зажигать их и разбрасывать на большие расстояния.

Оценку риска выполним для случаев хранения пропана и его отпуска в железнодорожные цистерны на товарно-сырьевом участке Белорусского газоперерабатывающего завода (г. Речица, Гомельской области).

Хранение пропана осуществляется в горизонтальных емкостях объемом по 200 м<sup>3</sup> каждая в количестве 10 штук. Регламентированное заполнение емкости – 83 % по объему. Налив пропана в железнодорожные цис-

терны обеспечивается двумя сливо-наливными эстакадами № 1 и № 2 на 40 и 32 стояка соответственно. Полный объем железнодорожной цистерны – 54 м<sup>3</sup>, полезный – 45 м<sup>3</sup>. Данные о наливке пропана в железнодорожные цистерны приведены в таблице 2. Подача пропана от места хранения до эстакад осуществляется по трубопроводу длиной 210 м и внутренним диаметром 400 мм. Производительность перекачивающего насоса – 120 м<sup>3</sup>/час, напор – 70 м вод.ст. Время быстрогодействия электроприводной задвижки – 3 мин. Плотность жидкого пропана  $\rho = 530 \text{ кг/м}^3$ .

Таблица 2.

## Информация о технологических операциях на объекте

№ эстакады	Число ж/д цистерн при одной операции	Продолжительность операции, час	Число операций в год
1	22	4,2	159
2	30	6,0	117

В случае реализации события 1 в воздухе оказывается все содержимое резервуара,  $M_1 = 88\ 000 \text{ кг}$ . Общая частота разгерметизации резервуара составляет  $Q_1 = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1} \cdot 10 = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ .

В случае реализации события 2 в воздухе оказывается все содержимое железнодорожной цистерны,  $M_2 = 23\ 900 \text{ кг}$ . Общая частота разгерметизации железнодорожной цистерны составляет

$$Q_2 = Q_{\text{отказ ж.д.}} \cdot Q_{\text{ж.д.}}, \quad (3)$$

где  $Q_{\text{ж.д.}}$  – частота нахождения железнодорожной цистерны на сливо-наливной эстакаде. Эту частоту определяем на основании данных таблицы 2:

$$Q_{\text{ж.д.}} = (22 \cdot 4,2 \cdot 159 + 30 \cdot 6 \cdot 117) / (24 \cdot 365) = 4,1.$$

Тогда  $Q_2 = 4,1 \cdot 10^{-4}$ .

В случае реализации события 3 возможны две ветви дерева событий: выброс содержимого через отверстие в стенке трубопровода до тех пор, пока утечка не будет остановлена (90% случаев) или полный разрыв трубопровода (10% случаев). В первом варианте количество вытекшего из трубопровода СУГ можно оценить по формуле для истечения жидкости через небольшое отверстие [9]:

$$M = 0,62\tau\rho S\sqrt{2(P - P_a) / \rho} = 0,62\tau\rho S\sqrt{2gH}, \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность СУГ, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  — площадь сечения отверстия, м<sup>2</sup>;  $\tau$  — время истечения СУГ;  $P$  — давление в трубопроводе, Па;  $P_a$  — атмосферное давление, Па;  $H$  — гидравлический напор в трубопроводе, м;  $g$  — ускорение свободного падения ( $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>). Принимая эквивалентный диаметр отверстия в трубопроводе равным 20 мм, а время истечения  $\tau$  равным времени срабатывания запорной арматуры 3 мин (т.к. после срабатывания задвижек давление в аварийном участке достаточно быстро приближается к атмосферному, и масса газа, вышедшая в интервале от срабатывания запорной арматуры до наложения аварийного банджа незначительна), получим  $M_{3,1} = 688$  кг. Как видно, масса газа, вытекающего при образовании небольшого отверстия, существенно меньше 1000 кг и, как будет показано ниже, массы, вытекающей при полном разрыве трубопровода. При таких массах образование огненного шара невозможно, основной сценарий развития аварии — факельное горение, не представляющее особой опасности для человека. Поэтому, этой ветвью развития аварии можно пренебречь в сравнении с полным разрушением трубопровода.

В случае полной разгерметизации трубопровода масса продукта определяется как сумма массы, вытекшей до отключения аварийного участка (по производительности соответствующего насоса за время быстрого действия запорной арматуры) и массы в геометрическом объеме аварийного участка:

$$M_3 = M_H + M_T, \quad (5)$$

где  $M_H$  — масса, вытекшая до отключения аварийного участка,

$$M_H = \rho \cdot t_{3АДВ} \cdot q, \quad (6)$$

где  $\rho$  — плотность газа в жидкой фазе,  $t_{3АДВ}$  — время быстрого действия запорной арматуры,  $q$  — производительность насоса,  $M_T$  — масса в геометрическом объеме аварийного участка.

$$M_T = \rho \cdot \pi \sum r_i^2 \cdot L_i, \quad (7)$$

где;  $r_i$  — внутренний радиус,  $L_i$  — длина участков трубопровода между запорными задвижками. Имеем  $M_3 = 17140$  кг.

Принимая во внимание, что полный разрыв трубопровода происходит в 10% случаев, частоту такого события на единицу длины можно при-

нять равной  $5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ . Следовательно, общая частота полного разрыва трубопровода  $Q_3 = 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ . Результаты расчетов для различных ситуаций приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Результаты расчетов

№ события	Частота на единицу, год-1	Количество/длина/ время работы	Общая частота, год-1	Масса СУГ, кг
1	$1 \cdot 10^{-4}$	10 шт.	$1 \cdot 10^{-3}$	88000
2	$1 \cdot 10^{-4}$	$(22 \cdot 4.2 \cdot 159 + 30 \cdot 6 \cdot 117) / (24 \cdot 365) = 4,1$ часа	$4,1 \cdot 10^{-4}$	23900
3	$5 \cdot 10^{-7} \cdot \text{м}^{-1}$	210 м	$1,05 \cdot 10^{-4}$	17140

Возможные ветви дерева событий при дальнейшем развитии аварии с возникновением опасных поражающих факторов, определенные на основании [3], приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Ветви дерева событий для аварий

Сценарий аварии	Частоты реализации ветвей
1. Огненный шар	0,70
2. Горение пролива	0,03
3. Сгорание облака с развитием избыточного давления	0,02

Величину индивидуального риска  $R_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) для каждой аварийной ситуации рассчитываем по формуле

$$R_i = Q_{ГП} \cdot Q_{ПТИ} + Q_{ОШ} \cdot Q_{ПОШ} + Q_{Д} \cdot Q_{ПД}, \quad (8)$$

где  $Q_{ГП}$  – вероятность развития аварии с возникновением горения пролива ( $Q_{ГП} = 0,03 \cdot Q_{МН}$ ;  $Q_{МН}$  – вероятность реализации ситуации);

$Q_{ПТИ}$  – условная вероятность поражения человека, находящегося на за-

- данном расстоянии, тепловым излучением при горении пролива;  
 $Q_{ОШ}$  – вероятность развития аварии с возникновением огненного шара ( $Q_{ПВ} = 0,7 \cdot Q_{MN}$ );  
 $Q_{ПОШ}$  – условная вероятность поражения человека, находящегося на заданном расстоянии, тепловым излучением огненного шара;  
 $Q_{Д}$  – вероятность развития аварии с развитием избыточного давления ( $Q_{Д} = 0,02 \cdot Q_{MN}$ );  
 $Q_{ПД}$  – условная вероятность поражения человека, находящегося на заданном расстоянии, избыточным давлением.

Условные вероятности поражения человека тепловым излучением и избыточным давлением рассчитываем согласно [4]. Результаты расчетов приведены на рис. 1 - 6.

Как видно из рисунков, наибольшее значение имеет риск при авариях на стадии хранения пропана. Для всех трех ситуаций основную опасность на ближних расстояниях представляет развитие аварии с возникновением огненного шара, а на дальних – сгорание облака с развитием избыточного давления. В силу этого, кривые суммарного риска имеют четко выраженный горизонтальный участок, после которого начинается достаточно пологий спад. Для горизонтальных участков вероятность поражения человека тепловым излучением огненного шара равна 1.

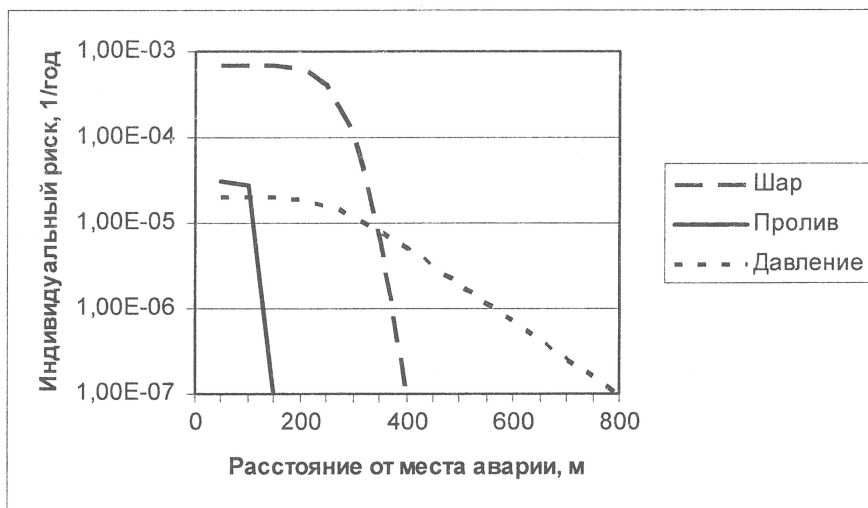


Рис. 1. Индивидуальный риск для разных ветвей развития аварии при разгерметизации резервуара с СУГ

Для определения общего индивидуального риска, создаваемого товарно-сырьевым парком с СУГ, необходимо производить суммирование рисков от различных источников аварийных ситуаций. Простое суммирование значений рисков от различных ситуаций, определенных для одного и того же расстояния от места аварии, достаточно некорректно. Это связано

с тем, что источники аварийных ситуаций сильно разнесены в пространстве, например, расстояние от места хранения пропана до наливных эстакад превышает 200 м. В силу этого, для определения общего индивидуального риска, создаваемого товарно-сырьевым парком с СУГ, необходимо производить суммирование рисков от различных источников аварийных ситуаций с учетом пространственных координат этих источников, что требует применения ГИС-технологий.

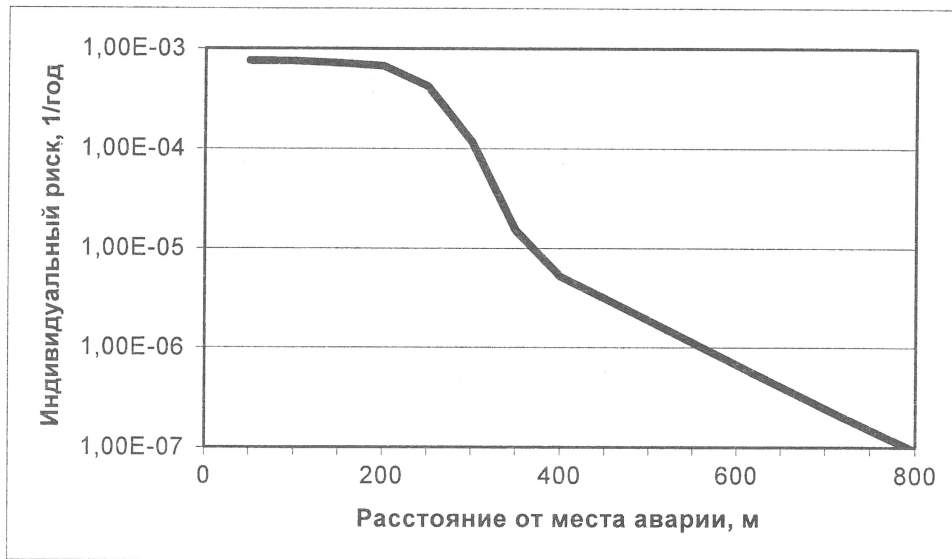


Рис. 2. Суммарный индивидуальный риск при разгерметизации резервуара с СУГ

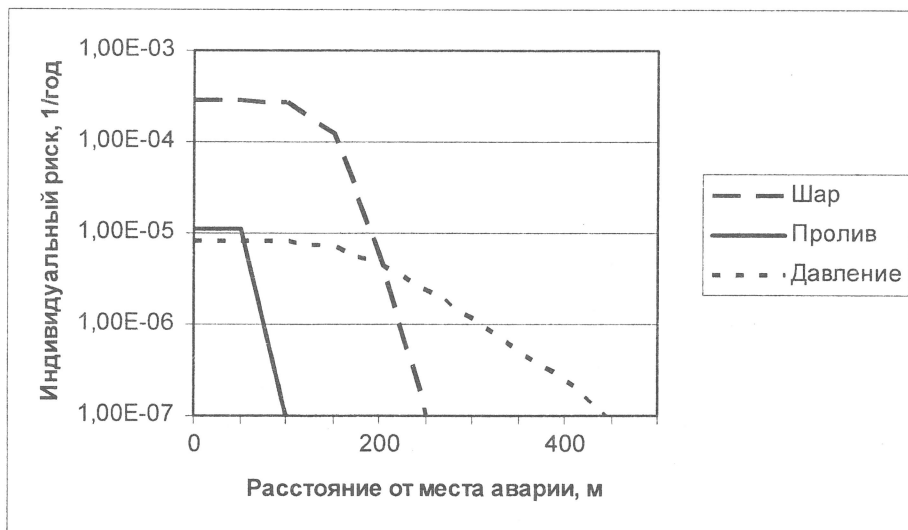


Рис. 3. Индивидуальный риск для разных ветвей развития аварии при разгерметизации железнодорожной цистерны с СУГ





Рис. 4. Суммарный индивидуальный риск при разгерметизации железнодорожной цистерны с СУГ

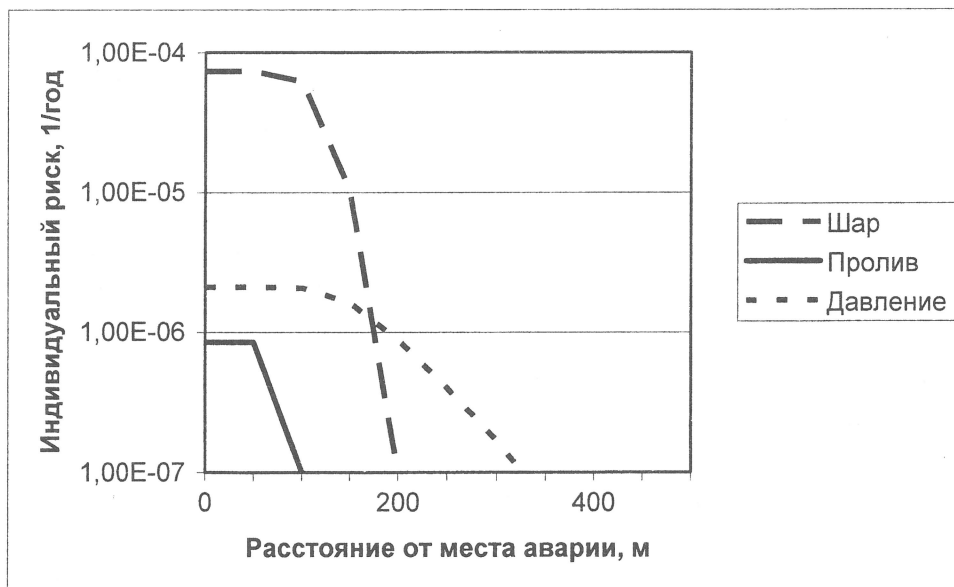


Рис. 5. Индивидуальный риск для разных ветвей развития аварии при разгерметизации трубопровода с СУГ



Рис. 6 Суммарный индивидуальный риск при разгерметизации трубопровода с СУГ

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колодкин В.М., Мурин А.В., Петров А.К., Горский В.Г. Количественная оценка риска химических аварий. Ижевск: "Удмурдский университет", 2001.
2. Владимиров В.А., Измалков В.И., Измалков А.В. Оценка риска и управление техногенной безопасностью. – М.: "Деловой экспресс", 2002.
3. ГОСТ 12.3.047-98 Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. Москва. Издательство стандартов, 1998.
4. НПБ 5-2000 Нормы пожарной безопасности Республики Беларусь. Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. Минск, 2001.
5. Нормы пожарной безопасности. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. НПБ 105-03. Москва. ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003.
6. Шебеко Ю.Н., Малкин В.Л., Смолин И.М., Колосов В.А., Смирнов Е.В., Паршин А.С. Методы оценки поражающих факторов крупных пожаров и взрывов на наружных технологических установках. // Пожаровзрывобезопасность, 1999, т.8, №4. - С.18-28.
7. Абросимов А.А. Управление промышленной безопасностью. – М.: КМК Лтд., 2000.
8. Сафонов В.С., Одишария Г.Э., Швыряев А.А. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. М.: 1996.
9. Прозоров И.В., Николадзе Г.И., Минаев А.В. Гидравлика, водоснабжение и канализация городов. М.: 1975.