

УДК 62.001.25

Научная специальность: 2.10.3

<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-6-40-57>

ISSN 1812-5220

© Проблемы анализа риска, 2023

Сравнение последствий воздействия поражающих факторов сценариев эскалации аварии на резервуаре с жидким сероводородом

Колесников Е.Ю.*,**Коренькова А.М.,****Румянцева Н.В.,**

Санкт-Петербургский
политехнический университет
имени Петра Великого,
194064, Россия,
Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 29

Аннотация

Действующий риск-ориентированный подход в области управления промышленной безопасностью, включающий сценарный подход, предполагает количественную оценку риска наиболее опасных и наиболее вероятных сценариев аварий опасных производственных объектов. Большая часть возможных аварийных сценариев сопровождается единственным поражающим фактором, однако существуют сценарии, сопровождающиеся не одним, а несколькими поражающими факторами. Нормативно-методические документы обычно рассматривают только один подобный сценарий аварии, а именно – BLEVE, реализующийся при разрушении оболочки емкостного оборудования под давлением, нагретой пламенем или тепловым потоком извне. Однако возможна и другая разновидность эскалационного сценария, когда оболочка резервуара, содержащего перегретую жидкость, под давлением паров при температуре окружающей среды разрушается вследствие механического удара (например, крупным летящим обломком). Руководящие документы по промышленной безопасности для количественной оценки аварийного риска по шкале показателей риска требуют оценивать и ранжировать сценарии аварии: а) по вероятности; б) по размеру ущерба. Если поражающих факторов у сценария аварии несколько, то необходимо сравнение этих факторов между собой по степени опасности. Этому недостаточно исследованному вопросу и посвящена настоящая статья. В ней по критерию условной вероятности смертельного поражения людей, находящихся на открытой местности, выполнены сравнительный анализ и ранжирование опасности поражающих факторов двух эскалационных сценариев аварии на резервуаре с сероводородом: а) BLEVE; б) разрушения резервуара при температуре окружающей среды.

Ключевые слова: резервуар с сероводородом; авария; сценарии горячего и холодного BLEVE; оценка поражающих факторов.

Для цитирования: Колесников Е.Ю., Коренькова А.М., Румянцева Н.В. Сравнение последствий воздействия поражающих факторов сценариев эскалации аварии на резервуаре с жидким сероводородом // Проблемы анализа риска. 2023. Т. 20. № 6. С. 40–57.
<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-6-40-57>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Comparison of Consequences of Impact Factors of Accident Escalation Scenarios at Tank with Liquid Hydrogen Sulfide

Evgeny Yu. Kolesnikov*,
Anastasia M. Korenkova,
Nina V. Rumjanceva,
Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University,
Polytechnicheskaj str., 29,
St. Petersburg, 194064, Russia

Abstract

The current risk-oriented approach in the field of industrial safety management, including a scenario approach, involves a quantitative assessment of the risk of the most dangerous and most likely accident scenarios of hazardous production facilities. Most of the possible emergency scenarios are accompanied by a single damaging factor, however, there are scenarios accompanied not by one, but by several damaging factors. Regulatory guidelines usually consider only one such accident scenario, namely BLEVE, which occurs when the containment of capacitive equipment is destroyed under pressure, heated by a flame or heat flow from outside. However, another kind of escalation scenario is possible when the shell of a tank containing superheated liquid under vapor pressure at ambient temperature is destroyed due to a mechanical impact (for example, a large flying debris). Management documents on industrial safety for quantitative assessment of emergency risk on the scale of risk indicators require to evaluate and rank accident scenarios: a) by probability; b) the amount of damage. If there are several damaging factors in the accident scenario, this requires a comparison of these factors with each other in terms of the degree of danger. The present article is devoted to this insufficiently researched issue. In it, according to the criterion of the conditional probability of fatal damage to people in open areas, a comparative analysis and ranking of the hazard of damaging factors of two escalation scenarios of an accident on a tank with hydrogen sulfide were performed: a) BLEVE; b) destruction of the tank at ambient temperature.

Keywords: hydrogen sulfide tank; accident; hot and cold BLEVE scenarios; assessment of damaging factors.

For citation: Kolesnikov E.Yu., Korenkova A. M., Rumjanceva N.V. Comparison of consequences of impact factors of accident escalation scenarios at tank with liquid hydrogen sulfide // Issues of Risk Analysis. 2023;20(6):40–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-6-40-57>.

The authors declare no conflict of interest.

Содержание

Введение

1. Поражающие факторы сценариев эскалации аварии
2. Краткие сведения о сероводороде
3. Сравнительный анализ поражающих факторов сценария BLEVE на резервуаре с жидким сероводородом

Заключение

Литература

Введение

Хранение и транспортирование опасных веществ относятся к числу технологических операций повышенной аварийной и пожарной опасности. Разгерметизация емкостного или линейного оборудования приводит к аварийной утечке этих веществ, которые, в свою очередь, создают предаварийные ситуации. При соблюдении некоторых условий (например, отказ или отсутствие систем противоаварийной защиты) последние могут превратиться в аварию с реализацией по одному из возможных сценариев: а) если вещество горючее и имеются подходящие источники зажигания — пожаровзрывоопасный сценарий; б) если вещество токсичное — сценарий с ингаляционным поражением.

Большая часть возможных аварийных сценариев сопровождается единственным поражающим фактором (воздушной взрывной волной, тепловым излучением, загрязнением воздуха и/или воды). Однако в некоторых сценариях поражающих факторов несколько — два, три и даже четыре. Таким образом, для более полной оценки аварийной опасности объекта необходимо сравнение этих поражающих факторов между собой по степени опасности. Этому недостаточно исследованному вопросу и посвящена статья.

1. Поражающие факторы сценариев эскалации аварии

Самыми тяжелыми по своим последствиям, как правило, оказываются сценарии, объединенные в группу под названием «эскалация аварии по механизму домино», при которых поражающие факторы аварии на одном из опасных объектов, воздействуя на соседние объекты, вызывают возникновение аварии на одном или нескольких из них.

Наиболее разрушительным действием обладают сценарии аварии типа BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion, взрыв кипящей жидкости с расширяющимся паром). BLEVE определяется как взрывной выброс расширяющегося облака пара и капель кипящей жидкости, когда сосуд, содержащий газ под давлением, разрушается. Чтобы произошел подобный взрыв, сосуд должен быть:

- а) либо нагрет тепловым излучением, исходящим от близлежащего пожара или его пламени — BLEVE;
- б) либо разрушен при попадании в него обломков оболочки соседнего резервуара или избыточным

давлением паров из-за ослабления его стенок вследствие коррозии — «холодное разрушение».

Последовательность событий при BLEVE такова: в начальной фазе сценария вследствие нагрева стенок резервуара давление паров внутри него начнет расти, пока не достигнет установленного порога срабатывания (уставки) предохранительного клапана. При достижении давлением в паровом пространстве резервуара этого значения клапан откроется и начнет выпускать в атмосферу паровую фазу горючего вещества, а струя паров ударит вверх, поскольку предохранительный клапан смонтирован в верхней части резервуара. Эта паровая струя мгновенно загорится от пламени или мощного теплового потока пожара, образуя факел (факельное горение). Поражающий фактор начальной фазы единственный — поток теплового излучения.

Дальнейшее развитие событий вариативно:

а) если пропускной способности предохранительного клапана достаточно для сброса давления пара, возрастающего вследствие испарения жидкой фазы из-за притока тепла извне, давление в резервуаре будет оставаться примерно равным. Факельное горение будет продолжаться до тех пор, пока либо не испарится и не выгорит вся жидкая фаза, либо не прекратится приток тепла к резервуару;

б) если пропускной способности предохранительного клапана окажется недостаточно, давление в паровом пространстве резервуара начнет возрастать. При некотором давлении резервуарная оболочка, ослабленная нагревом, не выдержит давления и разрушится. Давление внутри резко упадет до атмосферного, в оставшейся части жидкой фазы произойдет взрыв BLEVE, при котором она мгновенно превратится в переобогащенное парокапельное облако, содержащее капли с характерным размером 100 мкм.

В силу недостаточности окислителя (кислорода) внутри облака оно начнет ярко гореть по периферии, нагреваясь и всплывая в атмосфере под действием сил плавучести. Эту фазу сценария аварии называют «огненным шаром».

Важной особенностью сценария BLEVE является наличие у него трех поражающих факторов:

- а) разлетающихся обломков резервуарной оболочки;
- б) воздушной ударной волны, сопровождающей разрушение сосуда под давлением;

в) теплового излучения огненного шара.

Поскольку в отсутствии источника зажигания огненный шар не образуется, то холодное разрушение резервуара сопровождается только двумя поражающими факторами:

- а) разлетающиеся обломки резервуарной оболочки;
- б) воздушная ударная волна, сопровождающая разрушение сосуда под давлением.

Однако при наличии ветра переобогащенное облако опасного химического вещества (ОХВ) будет переноситься ветровым потоком, постепенно рассеиваясь в атмосфере под действием турбулентной диффузии. Далее возможно возникновение еще двух поражающих факторов:

в) если содержащееся в резервуаре опасное вещество токсично, дрейф облака создаст зону химического заражения местности;

г) а если на пути облака окажется источник зажигания подходящей энергии, «Методика...» [1] прогнозирует альтернативное развитие событий:

г1) либо ПВО сгорит в дефлаграционном режиме без образования волн избыточного давления (так называемый сценарий «пожара-вспышки», при котором поражающим фактором являются горячие продукты сгорания паровоздушной смеси);

г2) либо произойдет объемный взрыв облака с образованием воздушной взрывной волны.

В этой статье в качестве ОХВ рассматривается сероводород, транспортируемый в жидкой фазе под давлением собственных паров в железнодорожном вагоне-цистерне.

2. Краткие сведения о сероводороде

Сероводород (химическая формула H_2S) — бесцветный газ с характерным, очень неприятным запахом тухлых яиц. Сероводород токсичен, коррозионно-активен и взрывопожароопасен. Он является отходом нефтепереработки, используется в химической промышленности как сырье для производства ряда серосодержащих веществ. Объем производства и потребления сероводорода в России в последние годы оценивается в несколько миллионов тонн в год.

Сероводород перевозится по железной дороге в герметичных вагонах-цистернах, предназначенных для транспортировки сжиженных газов. Принимаем, что используются вагоны-цистерны марки 15–204 с параметрами котла:

- геометрический объем — 46 м^3 , полезный — $39,1 \text{ м}^3$;
- рабочее давление — $2,1 \text{ МПа}$;
- масса нетто — 23500 кг .

Согласно ДОПОГ (Международное соглашение о перевозке опасных грузов, ратифицированное Россией постановлением Правительства РФ от 03.02.1994 № 76 [2]) сероводороду присвоен класс опасности 2TF — токсичен, пожароопасен (причем в достаточно широком диапазоне концентраций).

Перечислим основные физико-химические характеристики сероводорода:

- а) параметры пожароопасности [3]:
 - температура самовоспламенения — $246 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - концентрационные пределы распространения пламени в воздухе — $4,3\text{--}46\%$ (об.);
 - минимальная энергия зажигания — $0,068 \text{ мДж}$;
- б) параметры токсичности:
 - класс опасности — 2;
 - ПДК атмосферного воздуха населенных мест: максимально разовая — $0,008 \text{ мг/м}^3$;
 - ПДК воздуха рабочей зоны — 10 мг/м^3 .

Сероводород высокотоксичен. При его вдыхании возникают: ощущение жжения, кашель, затрудненное дыхание, одышка, боль в горле.

3. Сравнительный анализ поражающих факторов сценария BLEVE на резервуаре с жидким сероводородом

В силу того, что температура кипения сероводорода при атмосферном давлении равна $-60,6^\circ\text{C}$, в нормальных условиях (в качестве температуры атмосферного воздуха примем 293 К) в резервуаре вагона-цистерны его жидкая фаза будет находиться под давлением насыщенных паров и являться перегретой жидкостью.

Как и принято в России, при оценке промышленной и пожарной опасности объектов, в частности, вероятности поражения объектов-мишеней различными поражающими факторами аварии на нем, будем использовать исключительно математические модели аварийных процессов, разрешенные к применению для этих целей соответствующими ведомствами (Ростехнадзором и МЧС России, соответственно), а именно:

- а) воздушной ударной волной (ВУВ) — «Методикой ...» [1];

б) летящими осколками — Руководством по безопасности [4];

в) тепловым излучением огненного шара — «Методикой ...» [1].

Эскалация аварии по сценарию BLEVE в рассматриваемом случае возможна на условной железнодорожной станции, когда вследствие разгерметизации одного из вагонов-цистерн возникает пожар пролива, пламя или тепловое излучение которого воздействует на соседние вагоны-цистерны.

В таблице представлены принятые для расчетов исходные данные:

В среде электронных таблиц MS Excel поочередно была рассчитана условная вероятность смертельного поражения людей, находящихся на открытой местности, вследствие воздействия на них следующих поражающих факторов:

а) воздушной ударной волны (барическое поражение);

б) попадания осколка резервуара (осколочное поражение);

в) воздействия теплового излучения огненного шара (поражение тепловым потоком).

Таблица. Исходные данные для расчетов

Table. Input data for calculations

Параметр	Численное значение
Объем резервуара $V_{рез}$, м ³	46
Рабочее давление резервуара, Па	$2,1 \cdot 10^6$
Плотность материала оболочки резервуара (сталь) $\rho_{об}$, кг/м ³	7800
Масса оболочки резервуара $m_{об}$, кг	23500
Количество осколков, на которые распадается оболочка резервуара $N_{оск}$	10
Масса одного осколка $N_{оск}$, кг	2350
Параметры человека, моделируемого цилиндром при поражении осколками: радиус $r_{чел}$, м высота $h_{чел}$, м	0,25 1,8
Атмосферное давление P_0 , Па	10^5
Температура атмосферного воздуха T_0 , К	293
Скорость ветра u , м/с	3,4
Молярная масса сероводорода μ , кг/моль	0,034
Плотность жидкой фазы сероводорода $\rho_{ж}$, кг/м ³	960
Удельная теплота испарения жидкой фазы сероводорода ΔH_b , Дж/кг	$5,5 \cdot 10^5$
Удельная теплоемкость паровой фазы при постоянном давлении (при температуре 300 К) C_p , Дж/кг·К	1026
Удельная теплоемкость жидкой фазы $C_{рж}$, Дж/кг·К	2240
Температура кипения сероводорода при атмосферном давлении T_b , К	212,6
Универсальная газовая постоянная R , Дж/моль·К	8,314
Светимость огненного шара $E_{ощ}$, кВт/м ²	350
Коэффициенты сероводорода при расчете пробит-функции токсического поражения, [7]: a b n	-31,42 3,008 1,43

1. Оценка поражения человека воздушной ударной волной. Расчет производился с использованием раздела V Приложения № 3 «Методики...» [1].

Для расчета давления насыщенных паров сероводорода, находящихся в паровом пространстве резервуара, можно исходить из рекомендации Руководства Американского института инженеров химической промышленности [5], согласно которому в качестве избыточного давления $P_{изб}$ в резервуаре в момент взрыва при BLEVE может быть принята величина, в 2,5 раза превышающая рабочее (избыточное) давление резервуара. С учетом $P_{раб} = 1,1 \cdot 10^6$ Па:

$$P_{взр} = 2,5 \cdot P_{раб} = 5,35 \cdot 10^6 \text{ Па.} \quad (1)$$

Следовательно, абсолютное давление насыщенных паров сероводорода в этот момент составит $5,45 \cdot 10^6$ Па.

Согласно номограмме рис. 1, представленного на сайте [6], давление насыщенных паров сероводорода достигнет величины 54,5 бар при температуре в резервуаре 343 К.

Для оценки параметров ВУВ (избыточного давления в ее фронте и импульса положительной фазы) необходимо оценить общую массу сероводорода (жидкой и паровой фаз), находящегося под давлением в резервуаре непосредственно перед взрывом. Это можно сделать лишь экспертно, поскольку заведомо не известно, сколько сероводорода в паровой фазе успеет выйти из резервуара через предохранительный клапан до момента разрушения резервуарной оболочки. Из консервативных соображений принимаем, что масса жидкой фазы составит 95% от ее максимального содержания, которое согласно требованиям промышленной безопасности по объему равно 85% от вместимости резервуара.

Тогда

$$m_{ж.ф} = 0,95 \cdot 0,85 \cdot V_{рез} \cdot \rho_{ж.ф} = 0,95 \cdot 0,85 \cdot 46 \cdot 960 = 35660 \text{ кг.} \quad (2)$$

Масса сероводорода в паровом пространстве резервуара объемом $V_{п.п}$, м³ может быть оценена по закону Менделеева-Клапейрона

$$m_{п.ф} = \frac{P_{взр} \cdot V_{п.п} \cdot \mu}{R \cdot T_{взр}} = \frac{5,45 \cdot 10^6 \cdot 46 \cdot (1 - 0,95 \cdot 0,85) \cdot 0,034}{8,314 \cdot 343} = 570 \text{ кг.} \quad (3)$$

Итого, совокупная масса m_{H_2S} , кг, парокапельного облака сероводорода после взрыва BLEVE составит примерно $3,62 \cdot 10^4$ кг.

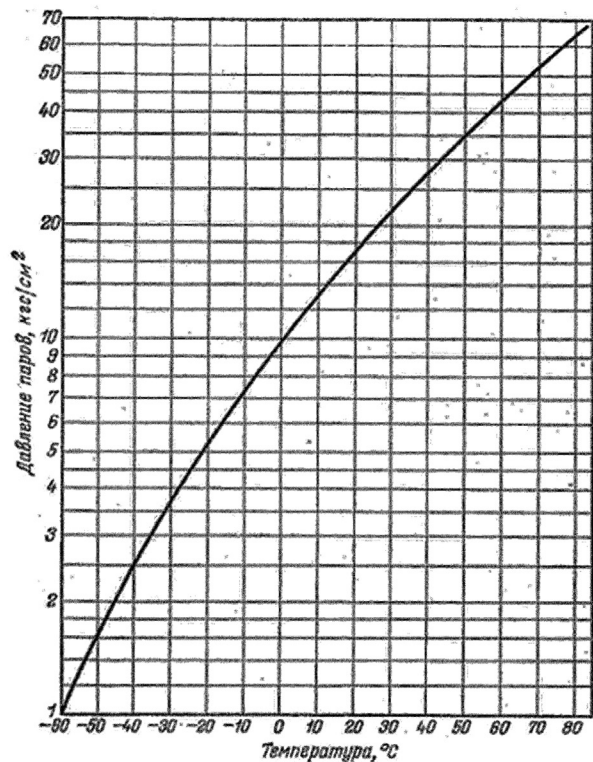


Рис. 1. Зависимость давления насыщенных паров сероводорода от температуры

Figure 1. Dependence of saturated hydrogen sulfide vapor pressure on temperature

Согласно модели раздела V Приложения № 3 «Методики...» [1] эффективная энергия $E_{эф}$ Дж, взрыва сосуда под давлением может быть оценена по соотношению:

$$E_{эф} = \kappa \cdot C_p \cdot m_{H_2S} \cdot (T_{взр} - T_b) = 0,5 \cdot 1026 \cdot 3,62 \cdot 10^4 \cdot (343 - 213) \approx 2,42 \cdot 10^9 \text{ Дж,} \quad (4)$$

где:

κ — доля эффективной энергии взрыва, расходуемая на создание ВУВ (допускается принимать равной 0,5);

C_p — удельная теплоемкость паров сероводорода при постоянном давлении, 1026 Дж/кг×К.

Троительный эквивалент $m_{тр}$, кг, взрыва:

$$m_{тр} = \frac{E_{эф}}{4,52 \cdot 10^6} = 536 \text{ кг.} \quad (5)$$

Согласно [1], зависимость избыточного давления фронта ΔP , Па, ВУВ от расстояния X , м, до эпицентра взрыва может быть оценена по соотношению:

$$\Delta P(X) = P_0 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{m_{np}^{0,33}}{X} + 3 \cdot \frac{m_{np}^{0,66}}{X^2} + 5 \cdot \frac{m_{np}}{X^3} \right). \quad (6)$$

Аналогично, зависимость импульса I , Па·с, положительной фазы ВУВ от расстояния X , м, до эпицентра взрыва:

$$I(X) = 123 \cdot \frac{m_{np}^{0,66}}{X}. \quad (7)$$

Смертельное поражение воздушной ударной волной людей, находящихся на открытой местности, в результате ее метательного действия (т.н. «взрывного ветра») из-за удара человека головой о твердую поверхность при падении согласно [7] может быть оценено в вероятностной постановке. Прежде оценки условной вероятности $P_{гиб}$ гибели человека следует рассчитать значение пробит-функции Pr :

$$Pr = 5 - 2,44 \ln Y, \quad (8)$$

где:

$$Y = \frac{7380}{\Delta P} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{\Delta P \cdot I}. \quad (9)$$

Вероятность $P_{гиб}$ человека по известной величине Pr может быть найдена с помощью стандартной функции ошибок (ФОШ) в электронных таблицах MS Excel:

$$P_{гиб} = 0,5 \cdot \left[1 + \text{ФОШ} \left(\frac{Pr - 5}{\sqrt{2}} \right) \right]. \quad (10)$$

Расчет показал, что условная вероятность смертельного поражения человека ВУВ, рассчитанная по (10), незначительна, уже на удалении 14 м от эпицентра взрыва она составляет всего $1,5 \cdot 10^{-8}$. Таким образом, поражающий фактор «воздушная взрывная волна» сценария BLEVE согласно нормативной модели уже на небольшом расстоянии от эпицентра взрыва не представляет угрозы для людей на открытой местности.

II. Оценка поражения человека летящими обломками оболочки резервуара. Прежде следует сделать ремарку о том, что такому поражающему фактору в основных отечественных нормативно-методических документах КОР [1, 7] не только не уделено достаточного внимания, он просто проигнорирован. И это обстоятельство представляется довольно странным,

особенно с учетом того, что по сведениям [5] более всего погибло пожарных, занятых тушением пожаров на объектах химической промышленности, именно вследствие попадания в них тяжелых фрагментов оборудования, разбрасываемых взрывом.

В модели [4] принято, что угол вылета осколка оболочки резервуара носит вероятностный характер (подчиняется равномерному распределению), а абсолютное значение его начальной скорости U_0 , м/с, детерминировано и может быть оценено.

На первом этапе вычислим величину начальной скорости U_0 , м/с, разлета фрагментов оболочки наземного резервуара цилиндрической формы (котла вагона-цистерны), изготовленного из хрупких сталей:

$$U_0 = 2,87 \cdot \left(\frac{P_{взр} \cdot P_{об} \cdot V_{рез}}{m_{об}} \right)^{0,564} = 2,87 \cdot \left(\frac{54,5 \cdot 7800 \cdot 46}{23500} \right)^{0,564} = 127,3 \text{ м/с}. \quad (11)$$

Примечание: в [11] $[P_{взр}] = \text{бар}$.

Затем оценим площадь S_{cp} , м², среднего миделя обломка, под которым понимают математическое ожидание площади его проекции на плоскость, нормальную к направлению полета:

$$S_{cp} = \left(\frac{m_{оск}}{\rho_{об}} \right)^{2/3} = \left(\frac{2350}{7800} \right)^{2/3} = 0,45 \text{ м}^2. \quad (12)$$

Далее следует вычислить безразмерный параметр W , описывающий движение осколка:

$$W = \frac{2 \cdot m_{оск} \cdot g}{C_x \cdot S_{cp} \cdot \rho_v \cdot U_0^2} = \frac{2 \cdot 2350 \cdot 9,8}{0,2 \cdot 0,45 \cdot 1,2 \cdot 127,3^2} = 26,3, \quad (13)$$

где:

g — ускорение свободного падения — 9,8 м/с²;

C_x — коэффициент сопротивления воздуха обломка. Для обломка резервуарной оболочки, как плохо обтекаемого тела, C_x принят равным 0,2;

ρ_v — плотность окружающего воздуха, кг/м³, при температуре T_0 , К:

$$\rho_v = \rho_{ст} \cdot \frac{T_{ст}}{T_0} = 1,225 \cdot \frac{288}{293} = 1,2 \text{ кг/м}^3, \quad (14)$$

$\rho_{ст}$ — «стандартная» плотность воздуха — 1,225 кг/м³;

$T_{ст}$ — «стандартная» температура — 288 К.

При заданных значениях исходных параметров величина W в данной модели постоянна.

Модель [4] позволяет оценить:

а) максимальную дальность $L_{\max}$, м, разлета осколков:

$$L_{\max} = \frac{3 \cdot U_0^2 \cdot W^{0,87}}{g \cdot (3 \cdot W^{0,87} + 2)} = \frac{3 \cdot 127,3^2 \cdot 26,3^{0,87}}{9,8 \cdot (3 \cdot 26,3^{0,87} + 2)} = 1592 \text{ м}; \quad (15)$$

б) угол $\theta_{\max}$ вылета осколка, при котором она достигается. Для случая $W > 4,6$ согласно [4]:

$$\theta_{\max} = 45^\circ, \text{ или } 0,86 \text{ рад}. \quad (16)$$

Модель вводит нормированную дальность полета осколка:

$$\bar{L} = \frac{L}{L_{\max}}, \quad (17)$$

где: L — расстояние, м, полета осколка от аварийного резервуара до объекта-мишени (человека).

Функция плотности вероятности нормированной дальности $\bar{L}$ полета осколка, пригодная до расстояний $\bar{L} < 0,992$, в модели [4] аппроксимирована бета-функцией:

$$f(x) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} \cdot x^{\alpha-1} \cdot x^{\beta-1}, \quad (18)$$

у которой $x = \bar{L}$, а параметр $B(\alpha, \beta)$ может быть рассчитан через значения гамма-функции своих аргументов:

$$\frac{1}{B(\alpha, \beta)} = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)}. \quad (19)$$

Анализ модели [4] показал, что в ней $\alpha = 1,5$, тогда $\Gamma(1,5) = 0,89$; $\beta = 0,6$. Следовательно, $\Gamma(0,6) = 1,49$, $(\alpha + \beta) = 2,1$, тогда $\Gamma(2,1) = 1,05$.

В итоге:

$$f(\bar{L}) = \frac{1,05}{0,89 \cdot 1,49} \cdot \frac{\sqrt{\bar{L}}}{(1 - \bar{L})^{0,4}} = 0,793 \cdot \frac{\sqrt{\bar{L}}}{(1 - \bar{L})^{0,4}}. \quad (20)$$

Условную вероятность $P_{\text{гиб.ч}}(\bar{L}, W)$ смертельного поражения человека при попадании в него осколка при движении последнего по ниспадающей траектории модель прогнозирует следующим образом:

$$P_{\text{гиб.ч}}(L, W) = \frac{2 \cdot f(\bar{L})}{\pi \cdot \bar{L}} \cdot \left(\frac{r}{L_{\max}} + G(W) \right) \cdot \left(\frac{h}{2L_{\max}} + G(W) \right), \quad (21)$$

где:

$$G(W) = \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{об}}} \cdot \left(W + \frac{2}{3} W^{0,13} \right). \quad (22)$$

Аналогичная вероятность $P_{\text{гиб.ч}}(\bar{L}, W)$ для восходящей ветки траектории (в консервативной постановке) — только для расстояний $L < L_{\max} \cdot \bar{L}_s$:

$$P_{\text{гиб.ч}}(L, W) = \frac{1}{\pi \cdot \bar{L}} \cdot \left(\frac{0,15}{L_{\max}} + G(W) \right) \cdot \left(\frac{\bar{T}}{\sqrt{(\bar{T})^2 + (\bar{L})^2}} \right) \cdot \left(1 - \frac{\bar{L}}{\sqrt{\bar{T} \cdot (1 - \bar{T})}} \right), \quad (23)$$

где:

$$\bar{T} = \frac{h}{L_{\max}} + \frac{1}{2} \cdot G(W), \quad (24)$$

$$\bar{L}_s = \sqrt{\bar{T}(1 - \bar{T})}. \quad (25)$$

Значение $L_{\max} \cdot \bar{L}_s$ — расстояние «прямого попадания» осколка в объект-мишень составляет 90,4 м.

При реализации обеих возможностей совокупная условная вероятность смертельного осколочного поражения человека рассчитывается по соотношению:

$$P_{\text{гиб.ч}}(L, W) = P_{\text{гиб.ч}}(L, W) + P_{\text{гиб.ч}}(L, W) - P_{\text{гиб.ч}}(L, W) \cdot P_{\text{гиб.ч}}(L, W). \quad (26)$$

Выполним расчет условной вероятности смертельного осколочного поражения человека по (26) для диапазона расстояний 10–1560 м, результат представлен на рис. 2.

Завершим рассмотрение поражающих факторов сценария BLEVE оценкой воздействия на человека теплового излучения огненного шара.

III. Оценка поражения человека потоком теплового излучения огненного шара. Выше совокупная масса $m_{\text{H}_2\text{S}}$ сероводорода в резервуаре, находящегося в жидкой и паровой фазах в момент его разрушения, была нами оценена величиной $3,62 \cdot 10^4$ кг. Расчет интенсивности падающего на объект-мишень теплового потока выполним согласно «Методике...» [1]. Зависимость от расстояния X , м, интенсивности $q(X)$, кВт/м², теплового потока может быть оценена по формуле:

$$q(X) = E_f \cdot F_q(X) \cdot \tau(X), \quad (27)$$

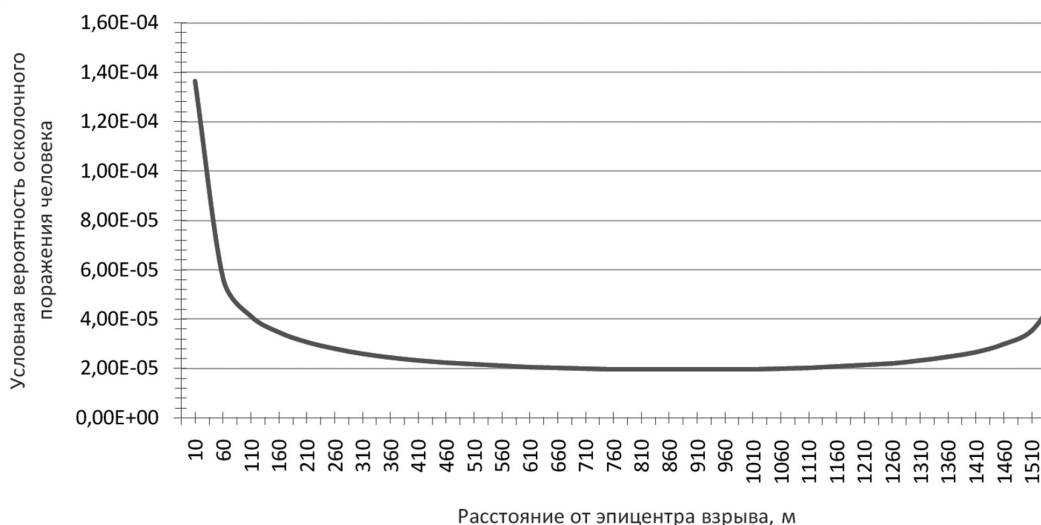


Рис. 2. Зависимость от расстояния условной вероятности смертельного осколочного поражения человека обломками резервуара для сценария BLEVE

Figure 2. Dependence on the distance of the conditional probability of fatal human injury by tank fragments for the scenario BLEVE

где:

E_f — светимость, кВт/м² (допускается принимать равной 350 кВт/м²);

F_q — т.н. геометрический фактор видности, величина которого может быть найдена по соотношению:

$$F_q(X) = \frac{D_{\text{ош}}^2}{4 \cdot (H_{\text{ош}}^2 + X^2)}, \quad (28)$$

где:

$H_{\text{ош}}$ — высота центра огненного шара, м (величину $H_{\text{ош}}$ допускается принимать равной диаметру $D_{\text{ош}}$);

$D_{\text{ош}}$ — эффективный диаметр, м, огненного шара, рассчитываемый по соотношению:

$$D_{\text{ош}} = 6,48 \cdot m_{\text{амм}}^{0,325}, \quad (29)$$

где:

$\tau(X)$ — коэффициент пропускания атмосферы τ для теплового излучения огненного шара, рассчитываемый по формуле:

$$\tau(X) = e^{-0,0007 \cdot (\sqrt{X^2 + H_{\text{ош}}^2} \cdot \frac{D_{\text{ош}}}{2})}. \quad (30)$$

Продолжительность $t_{\text{экс}}$, с, свечения огненного шара:

$$t_{\text{экс}} = 0,92 \cdot m_{\text{амм}}^{0,3}. \quad (31)$$

Для оценки условной вероятности смертельного поражения человека тепловым излучением

сначала необходимо вычислить значение про-
бит-функции:

$$Pr = -12,8 + 2,56 \cdot \ln D, \quad (32)$$

в котором доза D падающего теплового излучения для неподвижного объекта-мишени:

$$D = q(X)^{4/3} \cdot t_{\text{экс}}. \quad (33)$$

По известному значению пробит-функции условная вероятность гибели человека от воздействия потока теплового излучения ОШ может быть найдена по уравнению (10), результаты в виде графика показаны на рис. 3.

Анализ полученных результатов показывает, что для сценария BLEVE три поражающих фактора в порядке убывания их опасности для людей на открытой местности расположились так:

- наибольшую опасность представляет собой тепловое излучение огненного шара, но только для расстояния до 260 м, на большей дальности преобладает вероятность осколочного поражения людей на открытой местности;
- на втором месте — опасность осколочного поражения (на дальностях от 260 м);
- на третьем — воздушная ударная волна, у которой прогнозируется очень незначительное поражающее действие.



Рис. 3. Зависимость от расстояния условной вероятности смертельного поражения человека тепловым излучением огненного шара

Figure 3. Dependence on the distance of the conditional probability of fatal human injury by thermal radiation of a fireball

Далее рассмотрим **сценарий холодного разрушения резервуара**.

При заданной температуре $T_0 = 293$ К по той же номограмме (рис. 1) находим, что давление паров сероводорода в резервуаре составит $1,7 \cdot 10^6$ Па.

Из консервативных соображений принимаем, что объем жидкой фазы в резервуаре в момент его разрушения равен 85% вместимости резервуара, следовательно:

$$m_{ж.ф} = 0,85 \cdot V_{рез} \cdot \rho_{ж.ф} = 0,85 \cdot 46 \cdot 960 \approx 3,75 \cdot 10^4 \text{ кг.}$$

Масса сероводорода в паровом пространстве резервуара объемом $V_{п.п}$, м³, может быть оценена по (3):

$$m_{п.ф} = \frac{1,7 \cdot 10^6 \cdot 46 \cdot (1 - 0,85) \cdot 0,034}{8,314 \cdot 293} \approx 164 \text{ кг.}$$

Тогда полная масса сероводорода: $m_{H_2S} = 3,77 \cdot 10^4$ кг; эффективная энергия взрыва: $E_{eff} = 1,55 \cdot 10^9$ Дж; тротиловый эквивалент взрыва: $m_{тр} = 344$ кг.

Согласно полученным оценкам условная вероятность барического поражения людей на открытой местности уже на удалении 10 м не превышает $6 \cdot 10^{-6}$, а на удалении 12 м — $2,7 \cdot 10^{-9}$.

IV. Оценка поражения человека летящими обломками оболочки резервуара. Следуя методу расчета, изложенному выше, последовательно оценим величину необходимых параметров задачи:

- начальная скорость разлета фрагментов оболочки резервуара: $U_0 = 66$ м/с;

- площадь среднего миделя обломка прежняя: $S_{ср} = 0,45$ м²;
- безразмерный параметр: $W = 96,0$;
- максимальная дальность разлета осколков: $L_{max} = 439$ м;
- угол θ_{max} вылета осколка, при котором достигается наибольшая дальность, прежний, поскольку в этом случае вновь $W > 4,6$.

Значение расстояния «прямого попадания» для входящей траектории полета осколка — 46,9 м. Результат расчета условной вероятности смертельного осколочного поражения людей показан в виде графика на рис. 4.

V. Оценка токсического (ингаляционного) поражения человека парами сероводорода. Ввиду постулируемого отсутствия источника зажигания в момент разрушения резервуара будет сформировано паровоздушное облако (ПВО).

Вообще говоря, различают паровоздушные облака двух типов:

а) *первичное* — облако опасного вещества, образующееся в результате очень быстрого перехода в атмосферу части опасного вещества и распространяющееся по ветру от места выброса;

б) *вторичное (или шлейф)* — облако опасного вещества, образующееся в результате длительного выброса газа или перегретой вскипающей жидкости, а также в результате испарения опасного вещества с подстилающей поверхности или из разгерметизированного оборудования и распространяющееся по ветру от места выброса.

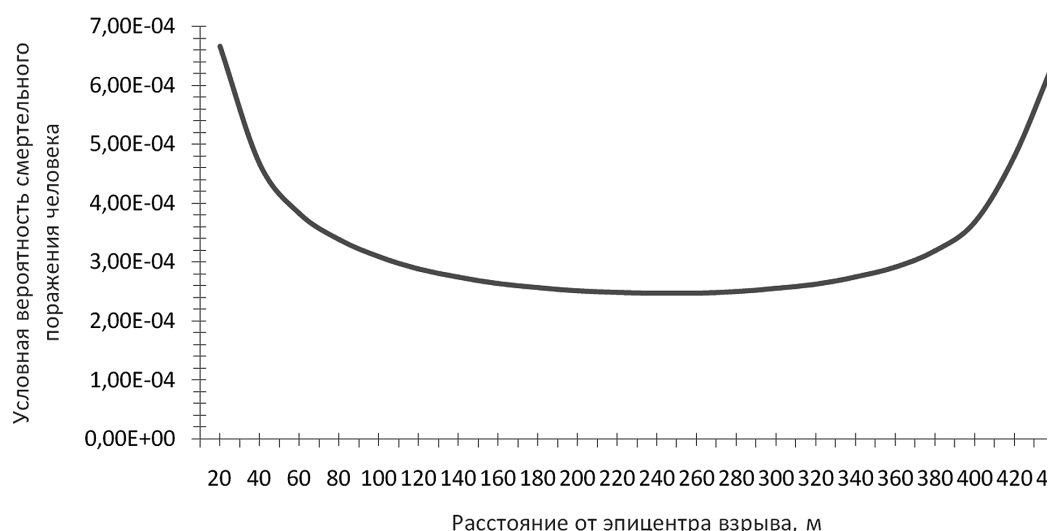


Рис. 4. Зависимость от расстояния вероятности смертельного осколочного поражения человека обломками резервуара для сценария холодного разрушения резервуара

Figure 4. Dependence on the probability distance of fatal human injury by tank debris for the cold tank failure scenario

Первичное облако сероводорода образуется из паровой фазы, находящейся в резервуаре в момент взрыва и части δ жидкой фазы, за очень короткий период времени (квазимгновенно) испарившейся при контакте с подстилающей поверхностью.

Массовую долю δ квазимгновенно испарившейся жидкости «Методика определения расчетных величин пожарного риска...» [1] рекомендует оценивать по формуле:

$$\delta = 1 - e^{-\left(\frac{C_{\text{рж}}(T_a - T_b)}{\Delta H_b}\right)} = 1 - e^{-\left(\frac{2240(293 - 212,6)}{550000}\right)} = 0,28, \quad (34)$$

где:

$C_{\text{рж}}$ — удельная теплоемкость жидкой фазы сероводорода, 2240 Дж/кг·К;

T_a — температура окружающего воздуха, 293 К;

T_b — температура кипения ОХВ при атмосферном давлении, 212,6 К;

ΔH_b — удельная теплота парообразования сероводорода, $5,5 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Таким образом, масса первичного облака:

$$m_{\text{по}} = 164 + 0,28 \cdot 3,75 \cdot 10^4 = 10645 \text{ кг.}$$

Через короткое время после контакта с жидкой фазой пролива подстилающая поверхность

«захлаживается» до температуры кипения жидкой фазы, дальнейшее испарение которой происходит за счет тепла, поступающего по механизму теплопроводности из нижележащих слоев грунта и из атмосферы. Как показывают оценки, удельная массовая скорость испарения пролива во второй фазе кипения многократно (более чем на порядок) ниже, чем в начальный короткий период бурного вскипания. С учетом этого обстоятельства оценку условной вероятности смертельного ингаляционного поражения людей на открытой местности парами сероводорода далее выполним только для первичного облака.

Попавшие вследствие аварии в атмосферу опасные химические вещества в паровой фазе по плотности дифференцируются на три группы:

- легкие;
- нейтральные;
- тяжелые.

Плотность газов/паров первой группы меньше, чем у атмосферного воздуха при той же температуре, поэтому их паровоздушные облака под действием сил плавучести всплывают в атмосфере.

У газов второй группы плотность близка к плотности окружающего воздуха, отчего у них нулевая плавучесть.

Тяжелым называют любой газ, плотность которого больше плотности окружающего воздуха. Это

может быть обусловлено как молекулярной массой газа, большей, чем у воздуха, так и его пониженной температурой вследствие его охлаждения в процессе выброса.

После того, как происходит достаточное разбавление тяжелого газа в облаке воздухом, плотность последнего приближается к плотности воздуха — обычная атмосферная турбулентность начинает преобладать над гравитационными силами, поэтому дальнейшее рассеивание облака в атмосфере описывается стандартными моделями гауссовой дисперсии.

Поведение ПВО, образующегося после выброса в атмосферу химически опасного вещества, определяется действием следующих сил:

- 1) перенос ПВО, как целого, ветровым потоком (адвекция);
- 2) всплытие или растекание по подстилающей поверхности под действием сил плавучести;
- 3) рассеивание в атмосфере вследствие турбулентной диффузии, механизм которой многократно мощнее, чем молекулярная диффузия.

С учетом того обстоятельства, что атмосфера всегда турбулизована, молекулярным механизмом диффузии можно пренебречь. Отметим, что турбулентная диффузия ПВО в атмосфере является весьма сложным для моделирования процессом. К середине второго десятилетия XXI века, по сведениям авторов [8], общее число математических моделей, разработанных для ее описания, превысило сотню, причем ежегодно оно пополняется примерно десятью новыми моделями.

Для оценки адекватности предложенных моделей, многие из которых реализованы в виде компьютерных кодов, неоднократно проводились сравнительные исследования (benchmarks). В ходе этих исследований результаты моделирования с помощью испытываемых моделей сравнивались с результатами экспериментов либо в аэродинамических трубах, либо в крупномасштабных натурных. Как утверждает Стевен Ханна [9], эти сравнительные исследования нередко демонстрировали превосходство простой «блочной» модели Бриттера-Макквайда над более сложными, физически более содержательными («богатыми») моделями. Она лучше прочих была валидирована опытными данными. Результаты расчетов по ней чаще других оказывались ближе всего к экспериментальным.

Как известно, математическая модель отечественного Руководства по безопасности [10] слишком

сложна для ручного счета, а реализующий ее компьютерный код «Токси+», рекомендованный Ростехнадзором для моделирования рассеивания выбросов ОХВ в атмосфере, является коммерческим продуктом с немалой стоимостью. В связи с этим оценка ингаляционного поражения людей на открытой местности парами сероводорода будет выполнена с помощью модели Бриттера-Макквайда [11], разработанной: а) Р.Е. Бриттером — сотрудником инженерного факультета Кембриджского университета; и б) Дж. Макквайдом — сотрудником исследовательского отдела британского Управления по охране труда.

Эта модель создана на основе анализа размерности и существующих экспериментальных данных о рассеивании облаков тяжелых газов. Она подходит для описания рассеивания выбросов тяжелого газа из источников как мгновенного, так и продолжительного типа, расположенных на уровне земли. Предполагается, что выброс происходит при температуре окружающей среды, без образования аэрозолей.

В процессе исследования авторами было обнаружено, что атмосферная стабильность (термическая стратификация атмосферы) мало влияет на результаты, поэтому в этой модели она не была учтена. Большая часть использованных нами данных была получена на основании анализа результатов экспериментов по рассеиванию тяжелых газов в отдаленных сельских районах Британии с преимущественно равнинной местностью. Следовательно, предложенная авторами модель не предназначена для использования в районах, где влияние рельефа является значительным (например, в условиях городской застройки). Иначе говоря, она там не валидирована, хотя и нет оснований заведомо утверждать о ее неприменимости в подобных условиях.

Модель Бриттера-Макквайда относится к типу т.н. «блочных» (коробочных) моделей, которые рассматривают формирующийся по ветру шлейф как совокупность следующих друг за другом «блоков» ПВО с примерно одинаковой концентрацией ОХВ. Она позволяет графически (с помощью номограмм) прогнозировать приземную концентрацию тяжелого газа на заданном удалении от источника выброса.

Эта модель требует задания следующих исходных данных:

- начального объема облака (для мгновенного источника);

- объемной скорости выброса (для продолжительного источника);
- продолжительности выброса (для продолжительного источника);
- начальной плотности ОХВ в ПВО;
- значения скорости ветра на высоте 10 м;
- плотности атмосферного воздуха.

В этой работе в качестве источника выброса тяжелого газа взрыв холодного BLEVE котла вагона-цистерны с сероводородом — это источник выброса мгновенного типа. Сразу после квазимгновенного разрушения оболочки резервуара образуется так называемое *первичное облако* паров сероводорода. Будем считать, что капельная фаза через небольшой промежуток времени вследствие притока тепла из атмосферы (подмешивания воздуха и лучистого тепла) испарится, облако станет гомогенным.

Первичное облако, формируемое источником выброса мгновенного типа, согласно модели [10] имеет форму, близкую к цилиндру, у которого диаметр основания D примерно равен высоте H . В дальнейшем,

под действием ветрового напора этот цилиндр вытягивается по ветру, расплываясь в ширину и приобретая «сигарообразную» форму, показанную на рис. 5.

Алгоритм дальнейших оценок в модели Бриттера-МакКвайда следующий:

1. Проверяют применимость для сероводорода модели тяжелого газа, для чего рассчитывают коэффициент g_0 , м/с^2 , начальной плавучести облака:

$$g_0 = g \cdot \frac{\rho_{0r} - \rho_a}{\rho_a} = 9,8 \cdot \frac{1,41 - 1,2}{1,2} = 1,71, \quad (35)$$

где: ρ_{0r} — начальная плотность паров сероводорода в ПВО, кг/м^3 , которая может быть вычислена по соотношению:

$$\begin{aligned} \rho_{0r} &= \frac{\mu}{V_\mu \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_0)} = \\ &= \frac{0,034}{0,0224 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 20)} = 1,41 \text{ кг/м}^3, \end{aligned} \quad (36)$$

где:

V_μ — мольный объем, равный $0,0224 \text{ м}^3/\text{моль}$;

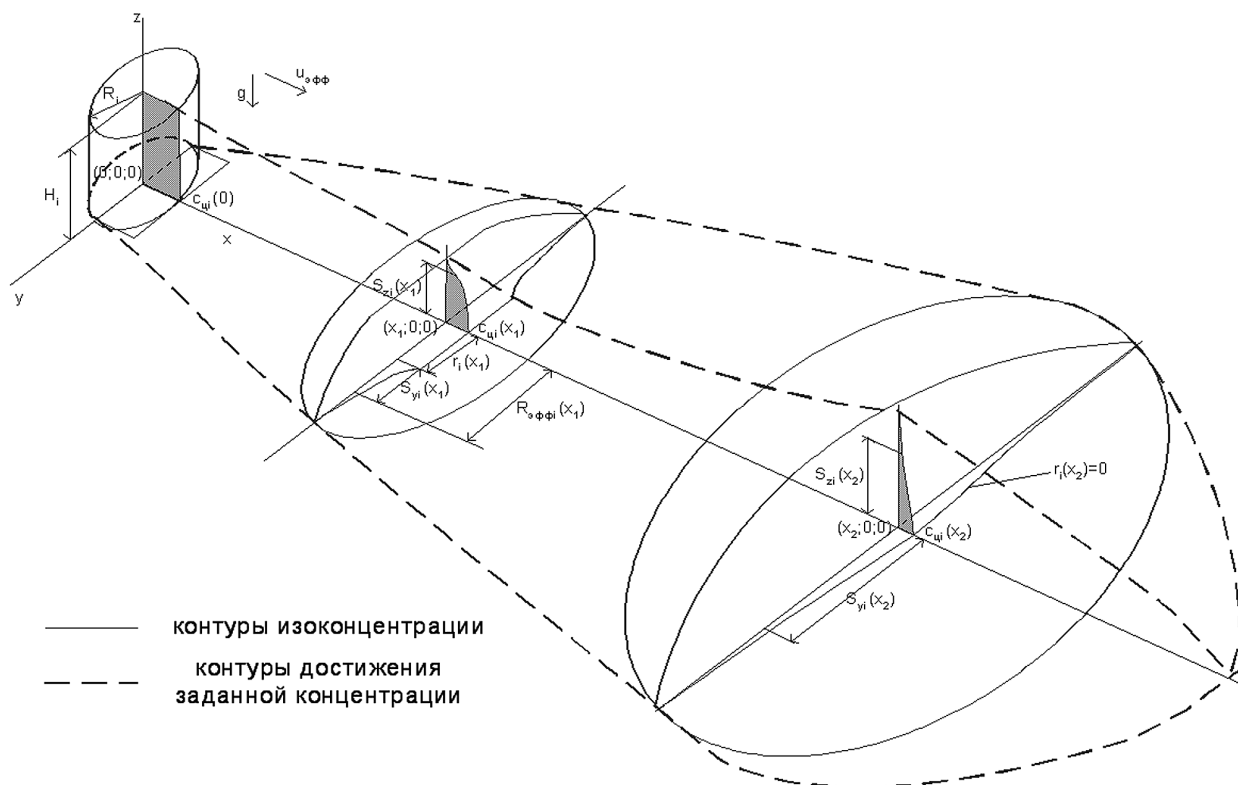


Рис. 5. Схема распространения первичного облака ОХВ

Figure 5. Primary HC cloud distribution diagram

t_0 — температура атмосферного воздуха, 20°C.

ρ_a — плотность атмосферного воздуха, 1,2 кг/м³.

Значение g_0 положительно, следовательно, газ тяжелый.

2. Определяют важнейшие параметры первичного ПВО:

а) начальный объем V_0 , м³, который может быть найден по уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$V_0 = \frac{m_{H_2S} \cdot R \cdot T_0}{\mu \cdot P_0} = \frac{10635 \cdot 8,314 \cdot 293}{0,034 \cdot 10^5} = 7545 \text{ м}^3; \quad (37)$$

б) характерный размер — параметр D_i , м:

$$D_i = \sqrt[3]{V_0} = \sqrt[3]{7545} = 19,6 \text{ м}; \quad (38)$$

в) начальную концентрацию C_0 , мг/м³, сероводорода в первичном ПВО:

$$C_0 = 10^6 \cdot \frac{P_0 \cdot \mu}{R \cdot T_0} = 10^6 \cdot \frac{10^5 \cdot 0,034}{8,314 \cdot 293} = 1,4 \cdot 10^6 \text{ мг/м}^3. \quad (39)$$

3. Проверяют применимость принятой аппроксимации аварийного выброса ОХВ (сероводорода) источником мгновенного типа при заданных метеоусловиях (скорости ветра $u = 3,4$ м/с). Для этого проверяют выполнение неравенства:

$$\omega = \frac{\sqrt{g_0 \cdot V_0}}{u \cdot D_i} \geq 0,2. \quad (40)$$

Подставив численные значения, получим:

$$\omega = \frac{\sqrt{1,71 \cdot 7545}}{3,4 \cdot 19,6} = 1,71.$$

Таким образом, неравенство (40) выполняется. Для оценки приземных концентраций тяжелого газа на оси факела, с подветренной стороны от источника, может быть использована номограмма рис. 6, позволяющая спрогнозировать приземную осевую (вдоль оси среднего направления ветра) концентрацию C_m , мг/м³, тяжелого газа.

В области номограммы, ограниченной пунктирной линией, модель успешно валидирована сравнением с результатами неоднократных полевых экспериментов.

Порядок работы с номограммой рис. 6 таков:

1) по исходным данным рассчитывается безразмерный параметр:

$$\beta = \sqrt{\frac{g_0 \cdot D_i}{u^2}};$$

2) на оси абсцисс номограммы отмечаются полученные значения, после чего к этой точке восстанавливается перпендикуляр;

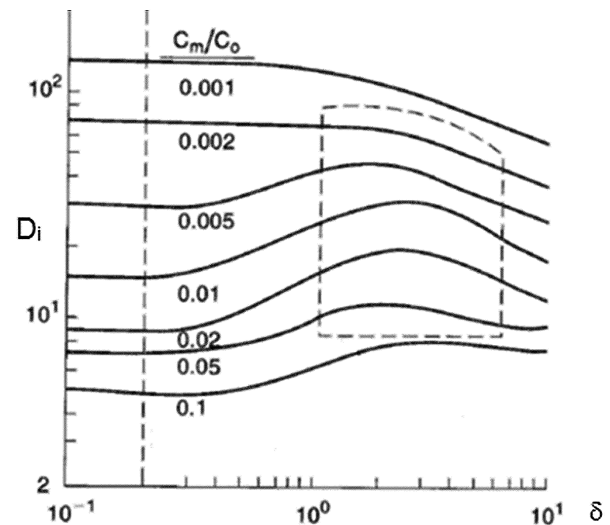


Рис. 6. Номограмма модели Бриттера-МакКвайда для рассеивания мгновенного выброса тяжелого газа

Figure 6. Britter-McQuide model nomogram for dispersion of instantaneous release of heavy gas

3) для интересующего диапазона расстояний намечается ряд значений x_i , м, по оси факела, для которых необходимо вычислить приземные концентрации ОХВ. Для этих расстояний рассчитываются значения безразмерных расстояний $\frac{x_i}{D_i}$;

4) соответствующие точки отмечаются на оси ординат номограммы, через них проводят ряд горизонтальных линий;

5) в точках пересечения этих линий с перпендикуляром методом интерполяции между двумя ближайшими кривыми находят безразмерные значения прогнозируемой осевой приземной концентрации C'_m тяжелого газа (в долях C_0 — начальной его концентрации);

6) значения массовой осевой приземной концентрации C_m ОХВ в мг/м³ могут быть получены умножением полученных значений C'_m на величину C_0 .

Значения концентрации C_m сероводорода в воздухе, мг/м³, могут быть пересчитаны в $C_{m,ppm}$ в ppm (частей объема на миллион) по формуле:

$$C_{m,ppm} = \frac{C_m}{\mu} \cdot \frac{R \cdot T_0}{P_0}. \quad (41)$$

Расчетная зависимость концентрации сероводорода $C_{m,ppm}$ по модели Бриттера-МакКвайда от расстояния

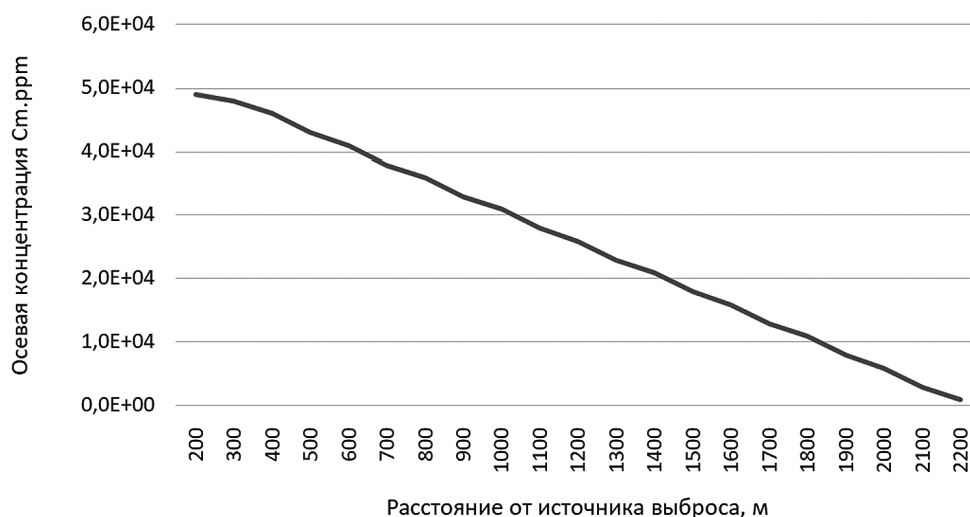


Рис. 7. Зависимость от расстояния приземной осевой концентрации $C_{m,ppm}$ сероводорода

Figure 7. Dependence on distance of surface axial concentration $C_{m,ppm}$ of hydrogen sulfide

до источника выброса показана в виде графика на рис. 7.

Согласно Руководству по безопасности [7] оценка условной вероятности смертельного токсического (ингаляционного) поражения людей, находящихся на открытой местности без средств защиты, может быть выполнена с помощью пробит-функции, рассчитываемой по формуле:

$$Pr = a + b \cdot \ln(t_s \cdot C_{m,ppm}^n), \quad (42)$$

где:

$a = -31,42$; $b = 3,008$; $n = 1,43$ — значения параметров для сероводорода [7];

t_s — продолжительность, мин, экспозиции (ингаляционного поражения людей).

Примем условно $t_s = 0,25$ мин (15 с).

Для выбросов мгновенного типа, согласно данным многочисленных экспериментов [11], типичная временная динамика величины, усредненной за 10 с приземной концентрации ОХВ, изображена на рис. 8. Сразу после прохождения переднего фронта ПВО с момента времени t_1 она начинает монотонно уменьшаться вплоть до момента t_2 прохождения его заднего фронта.

Анализ соотношения (42) показывает, что выражение под знаком логарифма для сероводорода отличается от классической дозы, равной интегралу

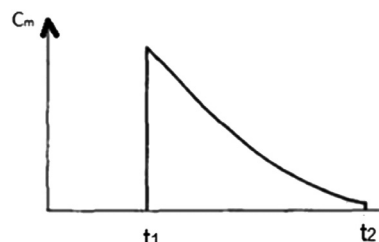


Рис. 8. Зависимость от времени краткосрочных приземных концентраций ОХВ при прохождении ПВО от мгновенного источника [11]

Figure 8. Dependence on the time of short-term surface concentrations of HC during the passage of BOP from an instantaneous source [11]

от концентрации по времени, т.к. для него $n \neq 1$. С учетом данного обстоятельства начальные, наибольшие значения концентраций сероводорода многократно значимее последующих. Это обстоятельство учтено авторами модели [11] в номограмме рис. 5, величина усредненной концентрации ОХВ на которой используется для оценки эффектов токсического поражения людей.

Результаты прогнозной условной вероятности токсического поражения людей на открытой местности парами сероводорода при рассмотренном сценарии холодного разрушения резервуара показаны в виде графика (рис. 9).

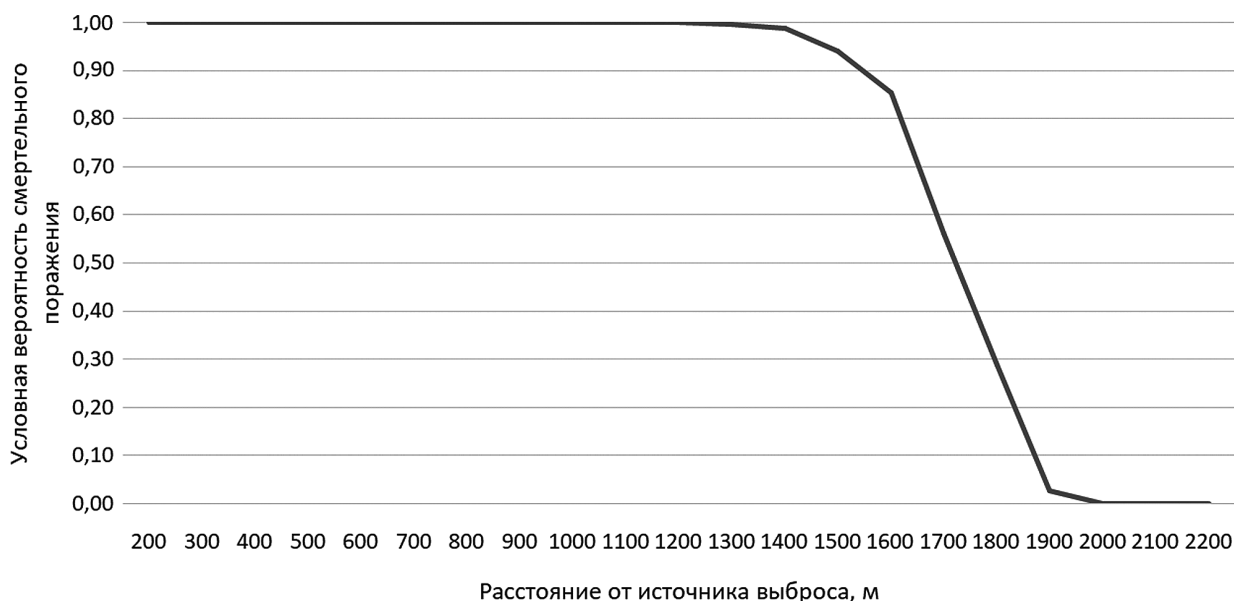


Рис. 9. Зависимость от расстояния условной вероятности смертельного ингаляционного поражения людей парами сероводорода при экспозиции 15 с

Figure 9. Dependence on the distance of the conditional probability of fatal inhalation lesion of people with hydrogen sulfide vapors at an exposure of 15 s

Их анализ показывает, что даже при принятой небольшой продолжительности контакта с парами сероводорода вероятность смертельного ингаляционного поражения человека равна 1. Причем эта ситуация прогнозируется до значительных расстояний, примерно 1400 м от места выброса. Надо понимать, что эти результаты несколько условны, т.к. получены при ряде допущений о величине скорости ветра, продолжительности экспозиции и др. Тем не менее очевидно, что, согласно полученным результатам, фактор токсического поражения людей на открытой местности при авариях является очень значимым, а в случае сероводорода — ведущим.

К сожалению, количественная оценка последствий воздействия (и условной вероятности вызываемого ими смертельного поражения людей) еще двух поражающих факторов сценария аварии: горячих продуктов пожара-вспышки и взрывной волны объемного взрыва, оказалась невозможной, поскольку:

а) «Методика...» [1] дает возможность оценить размер области, занятой продуктами сгорания при пожаре-вспышке, только если она представляет собой цилиндр (т.е. в отсутствие ветра, в штилевых

условиях), а в рассматриваемом нами случае ПВО имеет иную форму;

б) модель Бриттера-МакКвайда не позволяет оценить массу горючего вещества, находящегося в той области ПВО, где его концентрации находятся во взрывоопасном диапазоне, что необходимо для оценки параметров взрывной волны дефлаграционного взрыва.

Заключение

Выполненный в представленной статье анализ приводит к выводу, что действующая в настоящее время в нашей стране нормативно-методическая база выполнения КОР нуждается в совершенствовании, так как утвержденные МЧС России и Ростехнадзором Руководства по КОР (различных наименований) не позволяют в полном объеме корректно оценить весь спектр полей поражения, создаваемых поражающими факторами сценариев аварий на опасных объектах.

Анализ двух рассмотренных в статье сценариев эскалации аварий позволил авторам прийти к выводу, что:

- при сценарии BLEVE из трех поражающих факторов для людей, находящихся на открытой местности,

наиболее опасным оказалось тепловое излучение огненного шара, на втором месте — осколочное поражение;

- при сценарии «холодное разрушение резервуара с ОХВ» ведущим поражающим фактором является токсическое (ингаляционное) поражение.

Литература [References]

1. Приказ МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (с изменениями и дополнениями). [Электронный ресурс] URL: <https://base.garant.ru/196118/> (Дата обращения: 12.03.2023) [Order of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation No. 404 dated July 10, 2009 “On Approval of the Methodology for Determining Design Values of Fire Risk at Production Facilities” (as amended) [Electronic resource] URL: <https://base.garant.ru/196118/>. (In Russ.). (Accessed: 12.03.2023)]
2. Постановление Правительства РФ от 03.02.1994 № 76 «О присоединении Российской Федерации к Европейскому соглашению о международной дорожной перевозке опасных грузов». [Электронный ресурс] URL: <https://base.garant.ru/101625/> (Дата обращения: 10.04.2023) [Decree of the Government of the Russian Federation of 03.02.1994 No. 76 “On the accession of the Russian Federation to the European Agreement on the International Road Transportation of Dangerous Goods”. [Electronic resource] URL: <https://base.garant.ru/101625/>. (In Russ.). (Accessed: 10.04.2023)]
3. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ. изд.: в двух книгах / А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук и др.—М.: Химия, 1990. Книга 2—384 с. [Fire and explosion hazard of substances and materials and their extinguishing means: ref. ed.: In two books / A. N. Baratov, A. Ya. Korolchenko, G. N. Kravchuk at al. -M.: Chemistry, 1990. Book 2—384 p. (In Russ.)]
4. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22 декабря 2022 г. № 454 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа» [Электронный ресурс] URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406274547/> (Дата обращения: 12.03.2023) [Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of December 22, 2022 No. 454 “On Approval of the Safety Manual” Methodology for Assessing the Risk of Accidents at Hazardous Production Facilities of Gas Trunk Pipeline Transport”. [Electronic resource] URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406274547/>. (In Russ.). (Accessed: 12.03.2023)]
5. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis. 2-nd. ed. AIChE/CCPS, 2000.
6. Справочник химика 21 Химия и химическая технология. [Электронный ресурс] URL: <https://www.chem21.info/page/044232130058116223217196156058107064166009171099> (Дата обращения 22.04.2023 г) [Chemist’s Handbook 21 Chemistry and Chemical Technology. [Electronic resource] URL: <https://www.chem21.info/page/044232130058116223217196156058107064166009171099>. (In Russ.). (Accessed: 22.04.2023)]
7. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 3 ноября 2022 г. № 387 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». [Электронный ресурс] URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405790773/> (Дата обращения: 12.03.2023) [Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of November 3, 2022 No. 387 “On Approval of the Safety Manual” Methodological Basis for Hazard Analysis and Risk Assessment of Accidents at Hazardous Production Facilities”. [Electronic resource] URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405790773/>. (In Russ.). (Accessed: 12.03.2023)]
8. Roberto Bubbico, Barbara Mazzarotta. Predicting evaporation rates from pools // Chemical Engineering Transactions. 2016;48:49–54. <https://doi.org/10.3303/CET1648009>
9. Hanna, Steven. Britter and McQuaid (B&M) 1988 workbook nomograms for Dense Gas Modeling applied to the Jack Rabbit II chlorine release trials. Atmospheric Environment. 2020. 232. 117539. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117539>.
10. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 ноября 2022 г. № 385 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ». [Электронный ресурс] URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405790771/> (Дата обращения: 12.03.2023) [Order

of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of November 2, 2022 No. 385 "On Approval of the Safety Manual" Methodology for Modeling the Spread of Accidental Emissions of Hazardous Substances". [Electronic resource]

URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405790771/>. (In Russ.). (Accessed: 12.03.2023)]

11. Workbook on the Dispersion of Dense Gases. By R.E. Britter and J. McQuaid. Health & Safety Executive, 1988. 128 pp.

Сведения об авторах

Колесников Евгений Юрьевич: доктор технических наук, профессор высшей школы техносферной безопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (ФГАОУ ВО «СПбПУ»), доцент

Количество публикаций: 110

Область научных интересов: анализ и количественная оценка неопределенности параметров техногенного риска
Scopus Author ID: 57212259662

ORCID: 0000-0003-0833-6863

Контактная информация:

Адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

e.konik@list.ru

Коренькова Анастасия Михайловна: магистрант второго года обучения высшей школы техносферной безопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Количество публикаций: 2

Область научных интересов: безопасность труда, промышленная безопасность

Контактная информация:

Адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

an.korenkova1986@yandex.ru

Румянцева Нина Вячеславовна: кандидат технических наук, доцент высшей школы техносферной безопасности, Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого (ФГАОУ ВО «СПбПУ»), доцент

Количество публикаций: 56

Область научных интересов: безопасность труда, оценка профессиональных рисков

ORCID: 0000-0001-5045-6282

ResearcherID: L-6450-2018

ScopusID: 57210920516

Контактная информация:

Адрес: 194064, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
rumyantseva_nv@spbstu.ru

Статья поступила в редакцию: 28.04.2023

После доработки: 25.08.2023

Одобрена после рецензирования: 07.09.2023

Принята к публикации: 08.09.2023

Дата публикации: 29.12.2023

The article was submitted: 28.04.2023

Received after reworking: 25.08.2023

Approved after reviewing: 07.09.2023

Accepted for publication: 08.09.2023

Date of publication: 29.12.2023