

УДК 614.839

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0032

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЦЕНАРИЕВ АВАРИЙ С ОБРАЗОВАНИЕМ ОГНЕННОГО ШАРА

© 2021

Пермяков Владимир Николаевич, доктор технических наук,
профессор кафедры «Техносферная безопасность»

Мартынович Владимир Леонидович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Техносферная безопасность»

Хайруллина Лариса Батыевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность»

Тюменский индустриальный университет

(625000, Россия, Тюмень, улица Володарского, 38,

e-mails: permjakovvn@tyuiu.ru, martynovichvl@tyuiu.ru, hairullina.1964@mail.ru)

Аннотация. Обеспечение взрывопожаробезопасности опасных производственных объектов нефтегазового комплекса является актуальной задачей. Нормативными правовыми актами по анализу риска аварий на нефтегазовых опасных производственных объектах, утвержденными приказами Ростехнадзора, среди прочих предусматривается необходимость рассмотрения сценария аварии с образованием огненного шара. Однако, для реализации указанного сценария аварии необходимо выполнение ряда условий, в том числе: опасное вещество, участвующее в аварии должно обладать определенными взрывопожароопасными свойствами, его количество должно быть значительным и составлять несколько десятков тонн, а разрушение технологического оборудования должно быть внезапным и катастрофическим. В целях более глубокого понимания физической сущности процессов и явлений, происходящих в момент разрушения технологического оборудования, образования, формирования и существования огненного шара, а также прекращения горения выброшенного опасного вещества в статье сделана попытка описания термодинамической модели огненного шара – одного из наиболее опасных по последствиям сценариев аварий на опасных производственных объектах нефтегазового комплекса. Положения, представленные в статье, позволят более тщательно изучить явление огненного шара и, как следствие, привести к разработке мероприятий по повышению пожаробезопасности нефтегазовых объектов.

Ключевые слова: огненный шар, авария, катастрофическое разрушение, термодинамическая модель.

THERMODYNAMIC MODEL OF FIREBALL ACCIDENT SCENARIOS

© 2021

Permyakov Vladimir Nikolaevich, doctor of technical Sciences,
professor of the Department of «Technosphere Safety»

Martynovich Vladimir Leonidovich, candidate of technical Sciences,
associate professor of the Department of «Technosphere Safety»

Khayrullina Larisa Batyevna, candidate of technical Sciences,
associate professor of the Department of «Technosphere Safety»

Tyumen Industrial University

(625000, Russia, Tyumen, street Volodarskogo, 38,

e-mails: permjakovvn@tyuiu.ru, martynovichvl@tyuiu.ru, hairullina.1964@mail.ru)

Abstract. Ensuring the explosion and fire safety of hazardous production facilities of the oil and gas complex is an urgent task. Regulatory legal acts on the analysis of the risk of accidents at oil and gas hazardous production facilities, approved by the orders of Rostekhnadzor, among others, provide for the need to consider the scenario of an accident with the formation of a fireball. However, in order to implement this accident scenario, a number of conditions must be met, including: the hazardous substance involved in the accident must have certain explosive and fire-hazardous properties, its quantity must be significant and amount to several tens of tons, and the destruction of technological equipment must be sudden and catastrophic. In order to better understand the physical essence of the processes and phenomena occurring at the time of destruction of technological equipment, the formation, formation and existence of a fireball, as well as the cessation of burning of the ejected hazardous substance, the article attempts to describe the thermodynamic model of a fireball – one of the most dangerous scenarios for accidents at hazardous production facilities of the oil and gas complex. The provisions presented in the article will allow a more thorough study of the phenomenon of a fireball and, as a result, lead to the development of measures to improve the fire safety of oil and gas facilities.

Keywords: fireball, accident, catastrophic destruction, thermodynamic model.

Введение. В соответствии с действующей нормативно-технической документацией [1-11] при проектировании, строительстве, эксплуатации, консервации и ликвидации нефтегазовых опасных производственных объектов необходимо проведение анализа риска

возможных аварий.

Одними из основных этапов анализа риска аварий [7-11] являются: а) оценка возможных сценариев аварий на опасном производственном объекте; б) оценка количества опасного вещества, участвующего в ава-

рии и в создании поражающих факторов; в) оценка размеров зон действия поражающих факторов.

Рассмотрение объективного перечня возможных сценариев аварийных ситуаций для конкретного технологического оборудования и конкретного опасного вещества является актуальной задачей.

Материалы и результаты исследования. Теоретическая часть. Многообразие возможных сценариев развития аварийных ситуаций зависит от ряда факторов: физико-химических свойств обращающихся в технологическом оборудовании опасных веществ, эксплуатационных условий содержания опасных веществ в технологическом оборудовании (давление, температура), атмосферных условий и т.д.

Одним из возможных сценариев аварий, рекомендуемых нормативными правовыми актами в области пожарной и промышленной безопасности к рассмотрению при анализе риска аварий на нефтегазовых опасных производственных объектах, является сценарий с образованием огненного шара [9, 10].

В действующих нормативно правовых актах, литературных источниках и справочниках приводятся следующие определения для описания вышеуказанного явления.

Согласно п. 3.11 [12] огненный шар – это крупномасштабное диффузное горение, реализуемое при разрыве резервуара с горючей жидкостью или газом под давлением с воспламенением содержимого резервуара.

Согласно п. 2 Руководства по оценке пожарного риска для промышленных предприятий [13] огненный шар – крупномасштабное диффузное пламя сгорающей массы распыленного жидкого топлива или

парового облака, поднимающееся над поверхностью земли.

Согласно приложению №2 Руководство по безопасности [10] огненный шар – крупномасштабное диффузионное пламя, реализуемое при сгорании парогазового облака с концентрацией горючего выше верхнего концентрационного предела распространения пламени. Такое облако может быть реализовано, например, при разрыве резервуара с горючей жидкостью или газом под давлением с воспламенением содержимого резервуара.

Согласно [15] огненный шар – это объем сгорающей массы топлива или парового облака, поднимающийся над поверхностью земли.

Последствия документально зафиксированных сценариев аварий с образованием огненного шара подробно описаны в источнике [15] и характеризуются значительными размерами зон действия поражающих факторов, а также существенным материальным, социальным и экологическим ущербом.

В таблице 8.4 [15] Маршаллом приведена классификация пожароопасных веществ и установлено, что вероятнее всего появление огненного шара возможно в случаях аварийных ситуаций с участием следующих взрывопожароопасных веществ (жидкостей и газов): легковоспламеняющаяся жидкость с температурой вспышки минус 45°C и ниже (например, диэтиловый эфир); криогенная или охлажденная жидкость (сжиженный природный газ); сжиженный воспламеняющийся газ (например, пропилен); сжатый воспламеняющийся газ (например, этилен).

В таблице 1 продублированы сведения из таблицы 8.4 [15].

Таблица 1 – Таксономия опасностей пожаров жидкостей и газов при многотонных разливах

Классификация по Маршаллу	Пример	Температура вспышки, °	Давление паров при 20°	Часть разделения	Вероятность загорания на расстоянии, м				Вероятность появления		
					0	1	10	100	вспышечного пожара	пожара разлития	огневого шара
1. Горючая жидкость	Смазочное масло	-	0,0001	незначительная	нулевая	нулевая	нулевая	нулевая	нулевая	только при возгорании	нулевая
2. Воспламеняющаяся жидкость	п-Ксилол	40	0,008	0,0005	умеренная	нулевая	нулевая	нулевая	нулевая	высокая	нулевая
3. Легковоспламеняющаяся жидкость	Октан	13	0,013	0,0015	высокая	высокая	низкая	низкая	умеренная	высокая	нулевая
4. Легковоспламеняющаяся жидкость	Диэтиловый эфир	-45	0,58	0,024	высокая	высокая	низкая	умеренная	высокая	высокая	низкая
5. Криогенная или охлажденная жидкость	СПГ	ниже -160	0,1 (-160°)	0,04	высокая	высокая	низкая	высокая	высокая	высокая	низкая
6. Сжиженный воспламеняющийся газ	Пропилен	-107	1	0,4	высокая	высокая	низкая	высокая	высокая	иногда нет жидкой фазы	высокая
7. Сжатый воспламеняющийся газ	Этилен			1,0	высокая	высокая	низкая	высокая	высокая	нулевая	высокая

Факты образования огненного шара в результате разгерметизации технологического оборудования, в котором обращается сжиженный или сжатый воспламеняющийся газ, достаточно подробно описаны в ряде литературных источников [15] и не подлежат сомнению.

Вероятность же появления огненного шара в результате аварийной ситуации с участием иных веществ, перечисленных в таблице 1 (легковоспламе-

няющиеся жидкости с температурой вспышки плюс 13°C и выше, воспламеняющиеся и горючие жидкости), равна нулю.

Анализ действующих нормативно правовых актов [12-14, 17], а также литературных источников [15, 20] свидетельствует о том, что огненный шар характеризуется двумя основными расчетными значениями (диаметром огненного шара и временем его существования), которые зависят от массы опасного вещества,

участвующего в данном сценарии аварии.

Однако в литературных источниках и нормативно правовых актах отсутствует информация о последовательности событий, явлений и процессов, способствующих образованию, формированию и прекращению существования огненного шара. То есть явление огненного шара остается малоизученным.

На основании анализа данных по авариям с огненными шарами, приведенных в научно-технической литературе, а также нормативно правовых актах, в статье предлагается к рассмотрению теоретическая модель и описание последовательности событий, явлений и процессов, способствующих образованию, формированию и прекращению существования огненного шара.

Указанное описание последовательности событий, явлений и процессов позволит более тщательно изучить явление огненного шара и, как следствие, приведет к разработке мероприятий по предупреждению воздействия поражающих факторов огненного шара и (или) сокращению их интенсивности.

Практическая часть. В качестве примера опасного вещества для моделирования огненного шара принят воспламеняющийся газ – пропан, являющийся химически чистым горючим веществом, температура кипения которого в жидком состоянии при атмосферном давлении составляет минус 42°C.

При положительных температурах пропан может находиться в жидком состоянии только в сосудах, работающих под давлением.

Согласно статистическим данным, которые приведены в литературных источниках [15], для образования и формирования огненного шара необходимо значительное количество опасного вещества. Следовательно, объем сосуда, в котором осуществляется обращение опасного вещества, должен составлять несколько десятков и даже сотен кубических метров. При этом поступление (выброс) значительного количества опасного вещества в атмосферу должно быть скоротечным и мгновенным, например, как при полном катастрофическом разрушении сосуда хранения.

Таким образом, после катастрофического разрушения сосуда, значительная масса жидкого пропана окажется в атмосферных условиях (P_a , T_a). Однако, при атмосферном давлении P_a пропан должен находиться в газообразном состоянии, следовательно, начнется объемное взрывное вскипание жидкого пропана с увеличением занимаемого объема. Последнее приведет к образованию двухфазной среды в объеме шара. Процесс объемного вскипания будет протекать на протяжении некоторого времени, в течение которого вся масса жидкого пропана M_0 перейдет в парообразное состояние. При этом образовавшиеся пузырьки газа распределяться по всему объему более или менее равномерно.

Поскольку гидростатическое давление действует по всем направлениям одинаково, образующийся пар будет формировать фигуру похожую на шар, стремительно увеличивающийся в диаметре, до тех пор, пока

вся масса выброшенного жидкого опасного вещества M_0 не перейдет в парообразное состояние.

При наличии источника зажигания в зоне распространения парогазового облака произойдет его воспламенение. Однако, горение парогазового шарообразного облака будет происходить только по его «поверхности», где имеется возможность смешения горючего вещества с окислителем (кислородом воздуха). Горение же внутри парогазового облака происходит не будет ввиду отсутствия окислителя.

В некоторый момент возможен подъем огненного шара над поверхностью земли. Это обусловлено тем, что с учетом повышения температуры средняя плотность парогазового облака, образующего шар, станет меньше плотности воздуха.

По мере выгорания горючего вещества с «поверхности» парогазового облака диаметр шара D будет постепенно уменьшаться, до полного выгорания горючего вещества в облаке. Время с начала расширения огненного шара до полного его исчезновения и определяет время существования огненного шара t .

Заключение. При выводе аналитических зависимостей диаметра огненного шара и времени его существования необходимо учитывать термодинамические процессы, связанные с фазовым переходом, расширением и горением.

Предлагаемая модель позволяет описать и глубже понять физическую сущность процессов, протекающих при образовании, формировании и горении парогазового облака в атмосферных условиях, которые возникают при аварийных ситуациях с образованием огненных шаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 декабря 2020 года № 517 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности для опасных производственных объектов магистральных трубопроводов» [Электронный ресурс] // Консорциум «Кодекс»: сайт. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/573174913> (дата обращения 06.10.2021).
2. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 декабря 2020 года № 521 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности объектов сжиженного природного газа» [Электронный ресурс] // Консорциум «Кодекс»: сайт. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/573140265> (дата обращения 06.10.2021).
3. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2020 года № 530 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности автогазозаправочных станций газомоторного топлива» [Электронный ресурс] // Консорциум «Кодекс»: сайт. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/573200385> (дата обращения 06.10.2021).
4. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2020 года № 533 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» [Электронный ресурс] // Консорциум «Кодекс»: сайт. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/573200380> (дата обращения 06.10.2021).
5. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2020 года № 534 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности» [Электронный ресурс]

// Консорциум «Кодекс»: сайт. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/573230594> (дата обращения 06.10.2021).

6. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2020 года № 532 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности для объектов, использующих сжиженные углеводородные газы» [Электронный ресурс] // Консорциум «Кодекс»: сайт. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/573264124> (дата обращения 06.10.2021).

7. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». Серия 27. Выпуск 16 – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2016. – 56 с.

8. Руководство по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа». Серия 08. Выпуск 42 – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2019.

9. Руководство по безопасности «Методика анализа риска на опасных производственных объектах нефтегазодобычи». Серия 08. Выпуск 28 / Колл. авт. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2019.

10. Руководство по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности». Серия 09. Выпуск 45 / Колл. авт. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2019.

11. Руководство по безопасности «Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на опасных производственных объектах магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов». Серия 08. Выпуск 30 / Колл. авт. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2016.

12. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. №1971-ст: введен взамен ГОСТ Р 12.3.047-98: дата введения – 2014-01-01: разработан Федеральным государственным бюджетным учреждением «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны» МЧС России (ФГБУ «ВНИИ-ПО» МЧС России). – Москва: Стандартинформ, 2014. – 62 с. – Текст: непосредственный.

13. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий. – М.: ФГБУ «ВНИИПО» МЧС России, 2006 – 92 с.

14. Приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» [Электронный ресурс] // Консорциум «Кодекс»: сайт. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902170886> (дата обращения 05.10.2021).

15. Маршалл В. Основные опасности химических производств. – М.: Мир, 1989. – 672 с.

16. Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром»: СТО Газпром 2-2.3-351-2009: утв. распоряжением ОАО «Газпром» № 83 от 30.03.2009: ввод в действие с 30.12.2009. – Москва: ООО «Газпром-экспо», 2009. – 377 с.

17. Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром»: СТО Газпром 2-2.3-400-2009: утв. распоряжением ОАО «Газпром» № 326 от 05.10.2009: ввод в действие с 05.10.2009. – Москва: ООО «Газпром-экспо», 2009. – 362 с.

18. Пермяков В.Н., Мартынович В.Л., Хайруллина Л.Б. Обоснование возможных сценариев аварий на объектах нефтегазодобычи // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2021» (20-23 сентября 2021 г.) / под ред. Г.В. Кучерик, Ю.А. Омельчук. – Севастополь: СевГУ, 2021. – С. 496-499.

19. Мартынович В.Л. Оценка поражающих факторов аварий на взрывопожароопасных производствах: учебное пособие / В.Л. Мартынович, М.В. Омельчук, Л.Б. Хайруллина; Тюменский индустриальный университет. – Тюмень: ТИУ, 2018. – 78 с.

20. Комаров А.А., Шангараев Р.Р. Определение поражающих факторов при авариях, сопровождаемых огненными ша-

рами // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2020. № 3. С. 20-25.

21. Комаров А.А., Шангараев Р.Р. Исследование кинематики огненного шара // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2021. № 1. С. 58-63.

Статья поступила в редакцию 07.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021