

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ НА ТРАНСПОРТЕ И ОБЪЕКТАХ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Научная статья

УДК 681.3; DOI: 10.61260/2304-0130-2023-3-9-13

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Лабинский Александр Юрьевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

Labinsciy@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены опасные факторы при горении и взрыве нефтепродуктов, которыми являются воздушная ударная волна и тепловое излучение. Дана оценка последствий нарушений условий хранения и транспортировки (перевозки) горючих жидкостей и нефтепродуктов, вызванных процессами испарения и горения с последующим взрывом паров этих веществ. Выполнена оценка последствий формирования облака паровоздушной смеси, к которым относятся взрывное горение и распространение ударной волны. Рассмотрен пример расчета тротилового эквивалента паровоздушной смеси бензина для различной доли участия паров бензина во взрыве: от случая выделения паров при растекании бензина до случая формирования смеси бензина с воздухом при атмосферном давлении. Разработана математическая модель, и дана оценка размеров и времени существования облака паровоздушной смеси.

Ключевые слова: последствия чрезвычайных ситуаций, опасные факторы, нефтепродукты, горение, взрыв, ударная волна, тепловое излучение, облако паровоздушной смеси, математическая модель, компьютерная программа, расчет размера и времени существования

Для цитирования: Лабинский А.Ю. К вопросу оценки последствий чрезвычайных ситуаций // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. 2023. № 3. С. 9–13. DOI: 10.61260/2304-0130-2023-3-9-13.

Введение

В настоящее время в результате чрезвычайных ситуаций возникают последствия, связанные с пожарами, взрывами, наводнениями, воздействиями радиации и другими вредными факторами, приводящими к заболеваниям и смерти людей. Вопросам предупреждения и ликвидации последствий аварий и катастроф, а также оценки технического риска посвящен ряд работ [1–11].

Экологическую безопасность некоторые авторы определяют как состояние устойчивого динамического равновесия биосферы. Другие авторы определяют экологическую безопасность как состояние защищенности природной среды и человека от возможных воздействий хозяйственной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и их последствий. Для обеспечения экологической безопасности необходимы предотвращение возникновения техногенных чрезвычайных ситуаций и ликвидация их негативных последствий.

В данной статье рассмотрена оценка последствий нарушений условий хранения и транспортировки (перевозки) горючих жидкостей и нефтепродуктов, вызванных процессами испарения и горения с последующим взрывом паров этих веществ.

К нефтепродуктам относятся бензин, керосин, дизельное топливо, масла и другие парафиновые составляющие нефти. Для транспортировки нефтепродуктов используются магистральные трубопроводы (диаметр труб от 200 до 2 000 мм, давление 5–10 МПа) с резервуарами временного хранения (емкостью от 1 000 до 100 000 м³), а также железнодорожный (грузоподъемность цистерн от 60 до 120 т, емкость от 75 до 160 м³) и автомобильный (цистерны от 10 до 26 т, емкость от 6 до 30 м³) транспорт.

Причинами аварий на трубопроводах являются аварийные разрывы труб из-за дефекта сварного шва, разрушение компрессора, утечка газа. Последствиями аварий на трубопроводах являются пожары и взрывы.

Последствиями аварий на железнодорожном транспорте являются разливание нефтепродуктов и пожары. Ежегодно на железнодорожном транспорте происходит около 2 тыс. возгораний и пожаров [2]. При перевозке легковоспламеняющихся жидкостей (бензинов) возможны взрывы паровоздушной смеси [6].

Последствиями аварий на автомобильном транспорте также являются разливание нефтепродуктов и пожары, а также взрывы паровоздушной смеси легковоспламеняющихся жидкостей, например, бензинов [3].

Была поставлена задача, результаты решения которой представлены в данной статье: *необходимо выполнить оценку последствий чрезвычайных ситуаций, связанных с горением и взрывом нефтепродуктов, сопровождаемых взрывным горением и распространением ударной волны.*

Новизна исследования заключается в подробном описании опасных факторов горения и взрыва, оценке последствия формирования облака паровоздушной смеси и создании математической модели взрывного горения облака горючей смеси, которая позволила выполнить расчет тротилового эквивалента смеси паров бензина с воздухом.

Опасные факторы при горении и взрыве нефтепродуктов

Взрывоопасная смесь паров нефтепродуктов с воздухом может быть сформирована как внутри резервуара, так и на открытом воздухе. Условием возгорания и взрыва служит формирование паровоздушной смеси с концентрацией, достаточной для горения и взрыва в случае наличия стороннего источника энергии или при достижении температуры смеси температуры самовоспламенения [7]. Методы оценки последствий взрывного горения паровоздушной смеси изложены в работах [4–7].

При взрывном горении паровоздушной смеси возможны следующие последствия:

- взрыв облака паровоздушной смеси;
- взрывное горение облака в атмосфере;
- пожар нефтепродуктов на земле.

При этом возможно возникновение следующих поражающих факторов, воздействующих на людей:

- при взрыве в атмосфере – воздушная ударная волна и тепловое излучение;
- при взрывном горении облака в атмосфере – воздушная ударная волна с более низким поражающим фактором и тепловое излучение с более высоким поражающим фактором, чем при взрыве в атмосфере;
- при пожаре на земле – большое выделение тепла с возможным поражением людей и воспламенением соседних объектов (например, резервуаров с нефтепродуктами).

Результат воздействия теплового излучения, вызывающего воспламенение веществ или поражение человека и животных, зависит от пороговых значений теплового потока, которые определяются величиной поглощенной тепловой энергии. Поглощенная тепловая энергия, в свою очередь, зависит от плотности теплового потока q , кВт/м² и времени облучения T_0 , с. Энергия, необходимая для воспламенения вещества, зависит от его температуры и параметров (давление, влажность) атмосферы.

Примерные значения теплового потока и поражающий человека эффект:

- $q=1,0$ [кВт/м²] – эффект солнечного загара в жаркий летний день;
- $q=15,0$ [кВт/м²] – эффект появления волдырей на коже спустя 5 с.

Оценка последствия формирования облака паровоздушной смеси

Вскрытие емкости с горючим газом или разливание сжиженного газа при аварии приводит к испарению жидкой фракции и формированию облака паровоздушной смеси. Далее может происходить возгорание паровоздушной смеси, что при определенных условиях может привести к взрыву.

Определяющими факторами развития аварийной ситуации являются условия формирования облака паровоздушной смеси, которое может воспламениться с некоторой задержкой. Процесс воспламенения облака паровоздушной смеси может происходить с различной длительностью:

- воспламенение облака паровоздушной смеси происходит немедленно;
- воспламенение облака паровоздушной смеси происходит с некоторой задержкой.

В первом случае формируется область горячей жидкой фракции газа. Во втором случае происходит формирование облака паровоздушной смеси с возможным взрывным сгоранием, которое сопровождается образованием ударных волн.

При взрыве облака паровоздушной смеси фронт горения распространяется либо с ударной волной, либо с некоторой задержкой. При задержке скорость распространения фронта горения составляет от 10 до 300 м/с, и давление во фронте ударной волны может достигать от 10 до 100 кПа и более.

При совместном с ударной волной распространении фронта пламени происходит детонация – взрывное распространение фронта. При этом скорость распространения фронта горения составляет от 1 до 3 км/с и давление во фронте ударной волны может достигать 10 МПа и более. Различные препятствия на пути распространения пламени вызывают турбулизацию смеси и способствуют детонации паровоздушной смеси. Взрыв паровоздушной смеси может спровоцировать также сторонний источник энергии, например, искра.

Необходимая для взрыва облака паровоздушной смеси объемная концентрация горючей компоненты должна составлять от 5 % (пропан) до 30 % (водород).

Математическая модель

Концентрация паров, вышедших из резервуара в атмосферу, определяется из уравнения состояния идеального газа: $P \cdot V \cdot C = G \cdot R \cdot T$, где P – давление в резервуаре, Па; V – объем резервуара, м³; C – концентрация газа (объемная доля); G – масса паров, кг; R – газовая постоянная; T – температура, К.

В случае взрыва облака смеси паров его тротиловый эквивалент по ударной волне будет равен [5]: $G_{ТЭ} = 0,4 \cdot G \cdot Q_{ПВС} \cdot k / (0,9 \cdot Q_T)$, где G – масса паров смеси, кг; $Q_{ПВС}$ – удельная теплота сгорания единицы массы паровоздушной смеси (ПВС), кДж/кг; k – коэффициент, учитывающий долю участия газа во взрыве ($0 < k \leq 1$); Q_T – удельная теплота взрыва тротила, кДж/кг.

Коэффициент k , учитывающий долю участия газа во взрыве, может принимать следующие значения [5]:

- $k = 0,02 \div 0,1$ – газы при растекании легковоспламеняющихся жидкостей;
- $k = 0,1$ – газы, сжиженные охлаждением;
- $k = 0,5$ – газы, сжиженные под давлением;
- $k = 1,0$ – газы при атмосферном давлении.

Выполним расчеты тротилового эквивалента ПВС для различных значений коэффициента k , учитывающего долю участия пара во взрыве.

Рассмотрим чрезвычайную ситуацию, при которой из резервуара хранения бензина объемом 5 000 м³ (диаметр 20 м, высота 18 м) в результате аварии вышло (потеряно) 0,15 % или 1 500 кг бензина.

Исходные данные: масса ПВС $G = 1\,500$ кг, удельная теплота сгорания единицы массы ПВС (бензин) $Q_{ПВС} = 45$ кДж/кг, удельная теплота взрыва тротила $Q_T = 4,5$ кДж/кг. Результаты расчетов представлены на рисунке.

Расчеты показывают, что в случае взрыва облака смеси паров бензина с воздухом тротиловый эквивалент ПВС по воздушной ударной волне составит от 330 кг до 6 670 кг. Наименьшее значение тротилового эквивалента соответствует значению коэффициента участия газа во взрыве $k=0,05$ (пары бензина, выделяющиеся при его растекании), а наибольшее значение соответствует $k=1,0$ (пары бензина при атмосферном давлении).



Рис. Тротиловый эквивалент ПВС в зависимости от значений коэффициента участия газа во взрыве

Рассчитаем время существования облака паровоздушной смеси для случая взрывного горения облака. Предположим, что облако имеет сферическую форму. Для такого облака значение поверхностной эмиссии излучения принимается равной 200 кВт/м^2 . Радиус облака может быть определен по формуле [5]:

$$R = 29 \cdot \sqrt[3]{G} \text{ [м]},$$

где G – исходная масса паров ПВС, т.

Время существования облака паровоздушной смеси может быть определено по формуле [5]:

$$T = 4,5 \cdot \sqrt[3]{G} \text{ [с]}.$$

Расчеты показывают, что радиус облака равен 33,2 м, а время жизни облака ПВС с исходной массой паров 1 500 кг при взрывном горении составит 5,2 с.

Вывод

В статье рассмотрены опасные факторы при горении и взрыве нефтепродуктов, которыми являются воздушная ударная волна и тепловое излучение. Выполнена оценка последствий формирования облака паровоздушной смеси, к которым относятся взрывное горение и распространение ударной волны. Рассмотрен пример расчета тротилового эквивалента паровоздушной смеси бензина для различной доли участия паров бензина во взрыве: от случая выделения паров при растекании бензина до случая формирования смеси бензина с воздухом при атмосферном давлении. Дана оценка размеров и времени существования облака паровоздушной смеси.

Тема статьи актуальна, так как пожары и взрывы нефтепродуктов приводят к большим материальным потерям и человеческим жертвам. Оценка последствий таких чрезвычайных ситуаций позволяет решать задачи предотвращения возникновения чрезвычайных ситуаций путем совершенствования методик расчета техногенного риска во время текущей деятельности организаций, осуществляющих переработку, транспортировку и хранение нефтепродуктов.

Список источников

1. Кобылкин Н.И., Гельфанд Б.Е. Анализ и экспериментальное исследование причин взрывов цистерн и резервуаров при перегрузке нефтепродуктами // Проблемы управления рисками в техносфере. 2009. № 3.
2. Гавриленко С.Г. Статистика экстремальных ситуаций на железнодорожном транспорте // Информкуррьер-связь. 2012. № 4.
3. Максимов Д.Ю. Современные методы и средства борьбы с разливами нефти // Журнал технической физики. 2017. № 9.
4. Федотов В.Н. Влияние формы взрывающегося облака на параметры взрывной волны // Журнал РАН. 2011. № 9.
5. Методика оценки аварийных взрывов топливно-воздушных смесей: РД 03-409-01, Госгортехнадзор Рос. Федерации. 2011. URL: [ohranatruda.ru>upload/iblock/d90/4293840653.pdf](http://ohranatruda.ru/upload/iblock/d90/4293840653.pdf) (дата обращения: 12.07.2023).
6. Яковлев А.В. Последствия аварийных взрывов газоздушных смесей // Надежность. 2016. № 4.
7. Кривов А.С. Оценка рисков при перевозке нефтепродуктов железнодорожным транспортом. Томск: Труды ТПУ, 2017. № 2.
8. Самигулин Г.Х., Кадочникова Е.Н. Оценка пожарной опасности грузовых перевозок железнодорожным транспортом // Природные и техногенные риски. 2021. № 4.
9. Лабинский А.Ю. Использование нечеткой логики в оценке вероятности возникновения ЧС // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2017. № 1.
10. Лабинский А.Ю. К вопросу защиты от вредных факторов, сопутствующих ЧС // Природные и техногенные риски. 2018. № 1.
11. Лабинский А.Ю., Черных А.К., Тиамийу О.Л. Принятие решений при ликвидации последствий стихийных бедствий // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2021. № 1.

Информация о статье: статья поступила в редакцию: 02.08.2023; принята к публикации: 15.08.2023

Информация об авторах:

Лабинский Александр Юрьевич, доцент кафедры прикладной математики и информационных технологий Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: Labinsciy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-2735-4189>, SPIN-код: 8338-4230