

**Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан
Академия гражданской защиты имени Малика Габдуллина**

Арман Булатович Кусаинов

**Практические аспекты оценки аварийных рисков опасных
производственных объектов**

учебное пособие для магистрантов АГЗ им. М.Габдуллина
МЧС Республики Казахстан

Кокшетау
2024

УДК 614.2
ББК 68.9
К 94

Рецензенты:

кандидат технических наук, профессор, директор ТОО «GFP Science»
Джумагалиев Р.М.,
кандидат технических наук, начальник факультета Академии гражданской
защиты им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан, **Макишев Ж.К.**

Рекомендовано к печати Ученым советом
Академии гражданской защиты имени Малика Габдуллина МЧС Республики
Казахстан протокол № 17 от 26 июня 2024 г.

К 94 Кусаинов А. Б. Практические аспекты оценки аварийных рисков
опасных производственных объектов. Учебное пособие / А. Б. Кусаинов –
Кокшетау: Академия гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС
Республики Казахстан, 2024. – 142 с.



В учебном пособии рассмотрены основные теоретические и
практические вопросы оценки аварийных рисков на опасных
производственных объектах. Предлагаются практические работы по всем
рассматриваемым темам. Приводятся методики и примеры расчетов,
справочные данные. Пособие предназначено для обеспечения качественного
изучения курса обучающимися в магистратуре по образовательным
программам «Пожарная безопасность», а также может быть использовано
работниками опасных производственных объектов.

УДК 614.2
ББК 68.9
К 94



© АГЗ МЧС РК, 2024
Кусаинов А.Б., 2024

Содержание

Основные понятия и определения	7
Введение	9
1. Основные подходы к анализу аварийного риска	10
1.1 Основы анализа аварийного риска	10
1.2 Общие подходы к анализу риска	12
1.3 Вопросы для самоконтроля	19
2. Показатели риска	20
2.1 Количественная оценка риска	20
2.2 Оценка вероятности отказа системы	28
2.3 Примеры расчета риска	30
2.4 Задания для самостоятельной работы	34
3. Логико-графические методы анализа аварийного риска	36
3.1 Анализ методом «дерево отказов»	36
3.2 Анализ методом «дерево событий»	43
3.3 Пример построения «дерево отказов»	46
3.4 Задания для самостоятельной работы	48
3.5 Диаграмма Исикавы	49
3.6 Пример построения диаграммы Исикавы	52
3.7 Задание для самостоятельной работы	52
4. Классификация аварий	53
4.1. Классификация взрывов	53
4.2 Классификация пожаров	57
4.3 Вопросы для самоконтроля	58
5. Математические модели оценки возможных последствий аварий на взрывопожароопасных объектах	59
5.1 Количественная оценка опасного вещества участвующего в аварии	59
5.2 Разгерметизация надземного резервуара	60
5.3 Масса паров ЛВЖ, выходящих через дыхательную арматуру	64
5.4 Масса паров ЛВЖ при испарении со свободной поверхности в резервуаре	65
5.5 Максимальные размеры взрывоопасных зон	65
5.6 Определение параметров волны давления при сгорании облака топливно-воздушной смеси	67
5.7 Определение ожидаемого режима взрывного превращения	69
5.8 Классификация режима сгорания облака	71
5.9 Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы	72

сжатия воздушных волн	
5.10 Расчет волны давления при взрыве резервуара с перегретой жидкостью или сжиженным газом	75
5.11 Определение дополнительных характеристик	76
5.12 Интенсивность теплового излучения	79
5.13 Огненный шар	81
5.14 Определение зон поражения при факельном горении	82
5.15 Оценка поражающего воздействия аварий	84
5.16 Примеры моделирования аварийных рисков на взрывопожароопасных объектах	91
5.17 Задания для самостоятельной работы	106
6. Анализ аварийного риска на угольной шахте	109
6.1 Взрывы метана и угольной пыли	109
6.1.1 Взрыв метан	109
6.1.2 Особенности образования и горения пылевоздушных смесей	111
6.2 Анализ аварийного риска в угольной шахте	114
6.3. Пример моделирования аварийного риска в угольной шахте	118
6.4 Задание для самостоятельной работы	121
7. Анализ аварийного риска сосудов работающих под давлением	122
7.1 Расчет параметров взрыва резервуара с водяным паром	122
7.2 Расчет параметров взрыва резервуара с химически инертным газом	125
7.3 Расчет параметров волны давления при взрыве резервуара с перегретой жидкостью или сжиженным газом при воздействии на него очага пожара	126
7.4 Примеры моделирования аварийного риска сосудов работающих под давлением	128
7.5 Задания для самостоятельной работы	131
Список литературы	135

Основные понятия и определения

Наименование	Определение
Авария	разрушение зданий, сооружений и (или) технических устройств, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ
Гражданская защита	общегосударственный комплекс мероприятий, проводимых в мирное и военное время, направленных на предупреждение и ликвидацию чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и их последствий, организацию и ведение гражданской обороны, оказание экстренной медицинской и психологической помощи населению, находящемуся в зоне чрезвычайной ситуации, включающий в себя мероприятия по обеспечению пожарной и промышленной безопасности, формированию, хранению и использованию государственного материального резерва
Государственная система гражданской защиты	совокупность органов управления, сил и средств гражданской защиты, предназначенных для реализации общегосударственного комплекса мероприятий по защите населения, объектов и территории Республики Казахстан от опасностей, возникающих при чрезвычайных ситуациях и военных конфликтах или вследствие этих конфликтов
Декларация промышленной безопасности опасного производственного объекта	документ, в котором отражены характер и масштабы опасности опасного производственного объекта, мероприятия по обеспечению промышленной безопасности и защите населения от вредного воздействия опасных производственных факторов на этапах ввода в эксплуатацию, функционирования и вывода из эксплуатации опасного производственного объекта
Инцидент	отказ или повреждение технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, отклонение от параметров, обеспечивающих безопасность ведения технологического процесса, не приведшие к аварии
Опасный производственный фактор	физическое явление, возникающее при авариях, инцидентах на опасных производственных объектах и объектах социальной инфраструктуры, причиняющее вред (ущерб) физическим и юридическим лицам, окружающей среде
Пожар	неконтролируемое горение, создающее угрозу, причиняющее вред жизни и здоровью людей, материальный ущерб физическим и юридическим лицам, интересам общества и государства
Пожарная безопасность	состояние защищенности людей, имущества, общества и государства от пожаров
Промышленная безопасность	состояние защищенности физических и юридических лиц, окружающей среды от вредного воздействия

Предупреждение чрезвычайных ситуаций	опасных производственных факторов комплекс мероприятий, проводимых заблаговременно и направленных на максимально возможное уменьшение риска возникновения чрезвычайных ситуаций, а также на сохранение жизни и здоровья людей, снижение размеров материальных потерь в случае их возникновения
Требования пожарной безопасности	специальные условия технического и (или) социального характера, установленные законодательством Республики Казахстан в целях обеспечения пожарной безопасности
Требования промышленной безопасности	специальные условия технического и (или) социального характера, установленные законодательством Республики Казахстан в целях обеспечения промышленной безопасности
Технические устройства Чрезвычайная ситуация	машины, оборудование и иные конструкции обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, пожара, вредного воздействия опасных производственных факторов, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, вред здоровью людей или окружающей среде, значительный материальный ущерб и нарушение условий жизнедеятельности людей
Чрезвычайные ситуации техногенного характера	чрезвычайные ситуации, вызванные вредным воздействием опасных производственных факторов, транспортными и другими авариями, пожарами (взрывами), авариями с выбросами (угрозой выброса) сильнодействующих ядовитых, радиоактивных и биологически опасных веществ, внезапным обрушением зданий и сооружений, прорывами плотин, авариями на электроэнергетических и коммуникационных системах жизнеобеспечения, очистных сооружениях

Введение

В настоящее время в Республике Казахстан эксплуатируются, проектируются и строятся значительные количества опасных и технически сложных производственных объектов, аварии с пожарами и взрывами на которых могут привести к катастрофическим социально-экономическим и экологическим последствиям.

Современные опасные производственные объекты представляют собой сложный комплекс технологических установок, зданий и сооружений, которые характеризуются высокой концентрацией пожаровзрывоопасных веществ и материалов, технологического оборудования и трубопроводов.

В связи с этим обеспечение безопасности особо опасных и технически сложных производственных объектов является актуальной проблемой.

Одной из составных частей обеспечения безопасности является анализ риска аварий, который предполагает получение количественных оценок потенциальной опасности производственных объектов. Основу методологии анализа риска составляет определение последствий и вероятности нежелательных событий.

Результаты анализа риска аварий используются при декларировании промышленной безопасности опасных производственных объектов (далее - ОПО) и экспертизе промышленной безопасности. Основная цель анализа риска аварий - установление степени аварийной опасности ОПО и (или) его составных частей для выработки управленческих решений по минимизации последствий аварий для жизни и здоровья людей, имущества и окружающей среды.

Анализ риска предполагает процедуру нахождения величины риска от ОПО, сравнение ее с допустимым значением и, в случае превышения, переход к разработке мероприятий по снижению уровня риска до допустимых значений.

В данном учебном пособии рассмотрены основные количественные методы, позволяющие провести оценку и анализ возможных последствий аварий для различных ОПО.

1. Основные подходы к анализу аварийного риска

1.1 Основы анализа аварийного риска

Анализ риска аварий на ОПО (далее – анализ риска) является составной частью управления промышленной безопасностью. Анализ риска заключается в систематическом использовании всей доступной информации для идентификации опасностей и оценки риска возможных нежелательных событий. Системный подход к анализу техногенного риска требует рассмотрения источника риска – самой инженерной системы, ее потенциально опасной продукции и отходов производства, т.е. всего производственного цикла и его природного и социального окружения как единого целого. Также данный подход предполагает комплексную оценку риска. С одной стороны, того, что связано с нормальным, штатным режимом эксплуатации объектов [1].

Установлено, что даже когда последние функционируют без сбоев технологического регламента, из-за несовершенства управления производством, в том числе вследствие недостаточной подготовки кадров, а также производственного и очистного оборудования, использование в технологических процессах потенциально опасных компонентов приводит к серьезному загрязнению окружающей среды с риском для здоровья людей, материальных и культурных ценностей [2].

С другой стороны, системный подход подразумевает анализ риска, который сопряжен с аварийными ситуациями, вызванными выходом технической системы из строя, либо нарушения регламента эксплуатации системы (залповые выбросы), что может явиться инициатором чрезвычайной ситуации «взрывного» типа. Следовательно, необходимо рассматривать вероятность реализации как самой аварийной ситуации, так и ее последствий.

Оценка риска аварии – процесс, используемый для определения вероятности и/или частоты и степени тяжести последствий реализации аварийных ситуаций на людей, здания и сооружения, а также окружающую среду [1].

Оценка риска должна характеризовать как вероятность наступления самого неблагоприятного события, например аварии или выброса в атмосферу в режимах повседневного функционирования, так и вероятность негативных последствий данного события.

Результаты анализа риска используются при декларировании промышленной безопасности опасных производственных объектов.

Декларация промышленной безопасности опасного производственного объекта разрабатывается для проектируемых, действующих опасных производственных объектов и должна характеризовать опасность промышленного производства на этапах их ввода в эксплуатацию, функционирования и вывода из эксплуатации [3].

Разработка декларации промышленной безопасности осуществляется на основании приказа Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 30.12.2014 г. №341 «Об утверждении Правил, определяющих критерии отнесения опасных производственных объектов к декларируемым, и Правил разработки декларации промышленной безопасности опасного производственного объекта».



Рисунок 1.1 - Основные элементы нормативно-методического обеспечения анализа риска

В структуру декларации входит подраздел Анализ опасностей и риска включающий в себя следующие пункты [3]:

- Анализ условий возникновения и развития аварий, инцидентов;
- Сценарии возможных аварий;
- Физико-математические модели и методы расчета;

- Оценка риска аварий и инцидентов;
- Блок-схема анализа вероятных сценариев возникновения и развития аварий и инцидентов;
- Выводы.

Для совершенствования нормативно-методической базы декларирования в части анализа риска необходима система мер, связанных с внедрением в нормативную документацию методологии анализа риска, разработкой соответствующих методик, руководств и справочных материалов, а также с разработкой информационного комплекса, включающего автоматизированные системы, базы данных по аварийности, надежности оборудования, инспекционной деятельности и т.д. Общая схема нормативно-методического обеспечения анализа риска представлена на рисунке 1.1.

1.2 Общие подходы к анализу риска

До недавнего времени существовало глубокое убеждение, что разрабатываемые технические системы безопасности должны быть направлены на то, чтобы полностью исключить или, по крайней мере, локализовать наиболее опасные воздействия, вызванные так называемой «максимально возможной проектной аварией». Поэтому основное внимание было направлено на то, чтобы обезопасить персонал предприятия и население, проживающее вблизи него, именно от такого типа аварий [4].

Более глубокое изучение этой проблемы привело к осознанию необходимости рассматривать не только худшие случаи (т.е. крайне редкие катастрофические аварии), а также и аварии меньшего масштаба, но часто повторяющиеся, суммарный ущерб от которых может быть даже выше, чем от катастрофических аварий. Это привело к необходимости использовать понятие вероятности при оценках реализации опасных событий и возможных последствий.

Вероятность аварии, объединенная с возможными последствиями, и дает величину риска. Эта величина далее может быть изучена по своей структуре или сопоставлена с другими рисками, существующими в обществе, для выработки оптимальной стратегии по обеспечению безопасности людей и охране окружающей среды.

Расчет и анализ риска является тем инструментом, при помощи которого потенциальная опасность может быть оценена количественно. Во многих случаях этот инструмент является по существу единственной

возможностью исследовать сложные современные вопросы безопасности, ответ на которые не может быть получен из практического опыта, как, например, возникновение и развитие аварий с крайне малой вероятностью реализации, но с большими потенциальными последствиями [5].

Концептуальная основа анализа риска внешне проста. Она предполагает использование методических подходов, математического аппарата и информационной базы, позволяющих ответить на следующие вопросы [6]:

1. Что может функционировать «неправильно» (в нерабочем режиме)?
2. Каковы причины этого?
3. Каковы возможные последствия?
4. Насколько это вероятно?

Итак, в общем случае потенциальная опасность в промышленности характеризуется, по крайней мере, двумя составляющими величинами:

- вероятностью возникновения аварии;
- величиной возможного ущерба.

В технологическом смысле анализ риска представляет собой последовательность действий, упорядоченную по следующим этапам:

- 1) числовая оценка риска;
- 2) анализ структуры риска;
- 3) управление риском.

Общая логическая последовательность анализа риска представлена в виде блок-схемы на рисунок 1.2.

На первом этапе, с учетом исходной информации и имеющихся ресурсов определяется необходимая глубина анализа и строится общий алгоритм (стратегия) решения поставленной задачи.

В зависимости от исходной цели проводится анализ самого объекта или в целом системы «объект - окружающая среда». Анализируется информация по технологии, характеристикам основного оборудования, физико-химическим характеристикам веществ и материалов, системам управления и защиты, а также климатические и географические характеристики окружающей среды, ситуационный план, генплан, объекты инфраструктуры, данные о техническом персонале и населении региона. При этом следует подчеркнуть, что речь идет в первую очередь об информации непосредственно или косвенно влияющей на возникновение, варианты (сценарии) развития и последствия аварий [6].



Рисунок 1.2 - Блок-схема анализа риска

Второй этап. Большинство опасностей на промышленных объектах возникает в результате плановых (организованных) или аварийных (нерегламентированных) поступлений (выбросов) в атмосферу пожаровзрывоопасных или вредных (токсичных) веществ, также в результате быстротечных выделений больших количеств энергии. Данные опасности имеют различную природу происхождения, механизм и специфику воздействия на человека, оборудование и природную среду, а также потенциальные масштабы распространения в окружающем пространстве. В

этой связи необходимым этапом анализа является проведение идентификации опасностей на рассматриваемом объекте, прежде всего по физическому принципу [7].

Идентификация потенциальных опасностей позволяет перейти к составлению общего перечня возможных на объекте аварий, к их анализу и систематизации, далее к разработке характерных сценариев их возникновения и физически обоснованных вариантов развития (исходов). Следует подчеркнуть, что с учетом конкретного влияния внешних факторов каждая отдельная авария может иметь несколько различных исходов.

Третий этап. Исходные механизмы возникновения аварий и сценарии их последующего развития и воздействия на окружающее пространство весьма неравнозначны, поэтому число формальных вариантов анализа в зависимости от степени детализации может достигать нескольких тысяч. В этой связи крайне важным является обоснование вероятности (частоты) возникновения негативных событий, как фактора предварительного определения их значимости. Для определения вероятностей исходных событий используются, прежде всего, соответствующие статистические данные по характерным отказам и авариям.

При отсутствии статистически значимой информации, особенно для «редких» событий, а также в качестве дополнительного средства проверки достоверности, определение вероятностей проводят с использованием причинно-следственных закономерностей (логики) возникновения аварийных ситуаций и развития аварий из совокупности промежуточных событий, т. е. на базе разработки соответствующих сценариев, построенных по физически обоснованному принципу: «А что будет, если...». Поскольку число таких сценариев может быть весьма значительным, а их реализация - взаимозависимой, для интегрального определения вероятности аварии на сложных объектах обычно используются специальные методики построения «деревьев событий» или «деревьев отказов», а также методы «теории графов» [8].

Важно подчеркнуть, что при этом появляется реальная возможность логически предопределить итоговое «редкое» событие (например, разрушение низкотемпературного изотермического хранилища для сжиженного газа) и с высокой достоверностью вычислить вероятность возникновения отказа, опираясь на конкретные технические характеристики объекта, регламент его работы, эффективность систем контроля, а также паспортные показатели надежности отдельных элементов оборудования, по которым, как правило, имеется весьма представительная статистика отказов.

В логику возникновения итогового отказа в обязательном порядке включаются показатели «человеческого фактора».

Четвертый и пятый этапы являются, по сути, этапами моделирования процессов формирования поражающих факторов.

Четвертый этап. Переход от качественного описания механизмов возникновения и развития аварий на базе причинно-следственной логики к анализу количественных закономерностей физических эффектов осуществляется с использованием соответствующего комплекса математических моделей. При этом весьма важным является выделение характерных особенностей, определение интенсивностей, общих количеств и времени выброса опасных веществ или энергии в окружающее пространство, т.е. достоверное описание «функции источника» негативного воздействия, причем для всего спектра нежелательных событий [9].

Пятый этап. На дальнейшее количественное и качественное формирование поля опасности вокруг источника (т.е. во всех направлениях полупространства) в большинстве случаев оказывают самое непосредственное влияние параметры окружающей среды, в первую очередь - скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, характеристики грунта, рельеф местности и ряд других.

Характерными примерами такого влияния могут служить:

- интенсивность кипения и парообразования сжиженных газов на поверхности грунта (воды) при разливе или выбросе из сосудов, аппаратов или трубопроводов;
- протяженный перенос по ветру углеводородных паров и токсичных газов;
- отклонение пламени от вертикальной оси под действием ветра при диффузионном горении нефтепродуктов и сжиженных газов с открытой поверхности;
- фотохимические превращения продуктов сгорания или иных веществ, выбрасываемых в атмосферу и др.

Следует подчеркнуть, что значительное число возможных метеорологических состояний устойчивости атмосферы (не менее 6-ти по Паскуиллу) и большое число возможных направлений и скоростей ветра (по крайней мере, 5-7 характерных скоростей) резко увеличивают число вариантов распространения потенциально опасных веществ в атмосфере, требующих анализа. А это, в свою очередь, оказывает непосредственное воздействие на потенциальные масштабы ущерба.

Формирование в окружающем пространстве физического поля (потенциальной опасности) может также вообще не зависеть или слабо

зависеть от характеристик среды распространения. Например, в случае разрушения сосуда с газом под давлением (воздушная ударная волна, разлет осколков) или при разрушении резервуаров со сжиженным газом (образование огневого шара (эффект *BLEVE*), термическая радиация, ударная волна) [10].

Шестой этап. Дальнейший анализ требует четкого определения допустимых мер воздействия. Заметим, что принятая для конкретного случая мера воздействия служит, по существу, граничным репером при определении масштаба распространения соответствующей потенциальной опасности (в виде поля физических параметров). Как правило, в качестве групп риска выступают люди (технический персонал предприятий, население в зоне потенциального негативного воздействия), материальные ценности (оборудование, объекты инфраструктуры, имущество), биотический компонент природной среды (флора, фауна), а также характеристики водоемов и почв с точки зрения их влияния на жизнедеятельность биоты.

Седьмой этап. После выбора критериев можно переходить к расчету прямых или косвенных (отдаленных) последствий (ущерба) [11].

Восьмой этап. На этом этапе производится построение полей потенциального риска вокруг каждого из выделенных источников опасности, в пределах которых вероятно определенное негативное воздействие для соответствующих объектов. Таким образом, общим итогом последовательного выполнения вышеперечисленных этапов является построение функциональной связи между величиной определенного ущерба и вероятностью его возникновения. Поскольку численно эти параметры могут сильно различаться (например, аварии с очень малой вероятностью, но очень значимой величиной ущерба и, наоборот) для их обоснованного сравнения в рамках единой шкалы используется понятие риска, объединяющее (в виде произведения) вероятность события и его последствия. При получении интегральных значений риска от отдельных аварий или источников рассчитываются независимо, с учетом территориальной привязки источников опасности и групп риска на единой картографической основе и затем суммируются для конкретного объекта воздействия [12].

Девятый этап. На этом этапе строятся зоны локальных и интегральных (для предприятия в целом) полей риска, производится анализ структуры риска, исследуется влияние различных факторов на уровень и пространственно-временное распределение риска вокруг источников [9].

Десятый этап заключается в разработке рекомендаций по уменьшению риска [12].

На данном этапе рекомендуется в качестве первоочередных задач планировать и разрабатывать [13]:

- обоснованные рекомендации по снижению риска аварии для наиболее опасных составных частей объекта;
- способы предупреждения возникновения возможных инцидентов и аварий.

Выбор рекомендаций по снижению риска аварии имеет следующие приоритеты:

а) меры, снижающие возможность возникновения аварии, включающие: уменьшение возможности возникновения инцидентов; уменьшение вероятности перерастания инцидента в аварию;

б) меры, снижающие тяжесть последствий возможных аварий, включающие:

- уменьшение вероятности эскалации аварий, когда последствия какой-либо аварии становятся непосредственной причиной аварии на соседних составных частях ОПО;

- уменьшение вероятности нахождения групп людей в зонах поражающих факторов аварий;

- ограничение возможности возрастания масштаба и интенсивности воздействия поражающих факторов аварии;

- уменьшение вероятности развития аварии по наиболее опасным сценариям возможной аварии;

- увеличение требуемого уровня надежности системы противоаварийной защиты, средств активной и пассивной защиты от воздействия поражающих факторов аварии;

в) меры обеспечения готовности к локализации и ликвидации последствий аварий.

Для оптимизации разработанных рекомендаций по снижению риска аварии рекомендуется использовать следующую альтернативу [14]:

а) в рамках доступных ресурсов обеспечить максимальное снижение риска аварии при эксплуатации опасного производственного объекта;

б) обеспечить снижение риска аварий до требуемого уровня (в том числе допустимого риска аварии) при минимальных затратах ресурсов.

Для систем управления промышленной безопасностью рекомендуется преимущественно использовать способ «а» при краткосрочном и способ «б» при среднесрочном и долгосрочном планировании безопасной эксплуатации опасного производственного объекта.

В качестве приоритетных способов предупреждения возникновения возможных инцидентов и аварий рекомендуется использовать:

- пассивную защиту эффективным расстоянием (включая физические барьеры) от опасного воздействия поражающих факторов возможных аварий на стадии проектирования;
- активную защиту от перерастания аварийной опасности в угрозу аварии для жизни и здоровья человека, имущества и окружающей среды на стадии эксплуатации.

Среди решений, направленных на уменьшение тяжести последствий аварий, выделяют также ограничение площадей возможных аварийных разливов за счет возведения инженерных сооружений (системы аварийных лотков, дренажных емкостей), повышение взрывозащищенности зданий и сооружений на территории опасного производственного объекта, установку датчиков загазованности, информирование персонала об опасностях аварий, выбор несущих конструкций, запорной арматуры и т.д.

1.3 Вопросы для самоконтроля

1. Для чего необходим анализ риска аварий на опасных производственных объектах?
2. Для каких целей проводится оценка риска аварий?
3. Что характеризует оценка риска аварий?
4. Для каких объектов разрабатывается декларация промышленной безопасности опасного производственного объекта?
5. Раскройте этапы проведения анализа риска аварий на опасном производственном объекте.
6. Для каких целей проводится идентификация потенциальных опасностей?
7. С применением каких методик проводится определение вероятности реализации события при отсутствии статистически значимой информации?
8. На основании чего проводится выбор рекомендаций по снижению риска аварии?

2. Показатели риска

2.1 Количественная оценка риска

Риск аварии – мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии на опасном производственном объекте и тяжесть ее последствий [2].

Основными количественными показателями риска аварии являются [1]:

- технический риск – вероятность отказа технических устройств с последствиями определенного уровня (класса) за определенный период функционирования опасного производственного объекта;
- индивидуальный риск – частота поражения отдельного человека в результате воздействия исследуемых факторов опасности аварий;
- потенциальный территориальный риск – пространственное распределение частоты реализации негативного воздействия определенного уровня;
- коллективный риск – ожидаемое количество пораженных в результате возможных аварий за определенное время;
- социальный риск, или F/N кривая – зависимость частоты возникновения событий F , в которых пострадало на определенном уровне не менее N человек, от этого числа N . Характеризует тяжесть последствий (катастрофичность) реализации опасностей и представляется в виде соответствующей F/N -кривой;
- ожидаемый ущерб – математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии за определенное время;
- риск материальных потерь – зависимость частоты возникновения сценариев аварий F , в которых причинен ущерб на определенном уровне потерь не менее G , от количества этих потерь G . Характеризует материальную тяжесть последствий (катастрофичность) реализации опасностей аварий и представляется в виде соответствующей F/G -кривой.

Ниже приведены краткие характеристики основных количественных показателей риска.

1. При анализе опасностей, связанных с отказами технических устройств, систем обнаружения утечек, автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУТП), систем противоаварийной защиты выделяют технический риск, показатели которого определяются соответствующими методами теории надежности технологических систем и

функциональной безопасности систем противоаварийной автоматической защиты, систем управления технологическим процессом [15].

Теория надежности (ТН) – научная дисциплина, в которой разрабатываются и изучаются методы обеспечения эффективности работы объектов (изделий, устройств, систем и т.п.) в процессе эксплуатации [16].

В ТН вводятся показатели надёжности объектов, в том числе уровень полноты безопасности противоаварийной автоматической защиты, обосновываются требования к надежности с учетом экономических и других факторов, разрабатываются рекомендации по обеспечению заданных требований к надежности на этапах проектирования, производства, хранения и эксплуатации. Количественные показатели надежности вводят в ТН на основе построения математических моделей рассматриваемых объектов.

В ТН используются разнообразные математические методы; особое место занимают методы теории вероятностей и математической статистики.

Это связано с тем, что события, описывающие показатели надежности (моменты появления отказов, длительность ремонта и т.д.), часто являются случайными.

Для расчета вероятности безотказной работы объекта в течение некоторого времени используются аналитические методы теории случайных процессов. Расчет количественных показателей надежности объектов с учетом возможности восстановления отказавших устройств во многом аналогичен расчету систем массового обслуживания теории. Аналитические методы расчета надежности сочетаются с методами моделирования и анализа риска.

2. Комплексным показателем риска, характеризующим пространственное распределение опасности по объекту и близлежащей территории, является потенциальный территориальный риск – частота реализации поражающих факторов в рассматриваемой точке территории. Потенциальный территориальный или потенциальный риск не зависит от факта нахождения объекта воздействия (например, человека) в данном месте пространства. Предполагается, что условная вероятность нахождения объекта воздействия равна 1 (т.е. человек находится в данной точке пространства в течение всего рассматриваемого промежутка времени). Потенциальный риск не зависит от того, находится ли опасный объект в многолюдном или пустынном месте, и может меняться в широком интервале. Потенциальный риск, в соответствии с названием, выражает собой потенциал максимально возможной опасности для конкретных объектов воздействия (реципиентов, находящихся в данной точке пространства). Как правило, потенциальный риск оказывается промежуточной мерой опасности,

используемой для оценки социального и индивидуального риска при крупных авариях [17].

3. Количественной интегральной мерой опасности объекта является коллективный риск, определяющий ожидаемое количество пострадавших в результате аварий на объекте за определенный период времени.

4. Относительной характеристикой опасности является индивидуальный риск – частота поражения отдельного индивидуума (модель рискующего человека) в результате воздействия исследуемых факторов опасности. В общем случае количественно (численно) индивидуальный риск выражается отношением числа пострадавших людей к общему числу рискующих за определенный период времени. При расчете распределения риска по территории объекта («картировании риска») индивидуальный риск определяется потенциальным территориальным риском и вероятностью нахождения человека в районе возможного действия опасных факторов. Индивидуальный риск во многом определяется квалификацией и готовностью индивидуума к действиям в опасной ситуации, его защищенностью. Индивидуальный риск, как правило, следует определять не для каждого человека, а для групп людей, характеризующихся примерно одинаковым временем пребывания в различных опасных зонах и использующих одинаковые средства защиты. Рекомендуется оценивать индивидуальный риск отдельно для персонала объекта и для населения прилегающей территории, или, по возможности, для более узких групп, например, для обслуживающего персонала (операторов, ремонтных бригад). В целях сравнения оценок риска с критериями приемлемого риска (оценивания риска) рекомендуется рассчитывать максимальное значение индивидуального риска для определенной группы лиц (рискующих) [18].

5. Социальный риск характеризует масштаб и вероятность (частоту) аварий и определяется функцией распределения потерь (ущерба), который графически отображается - F/N -кривой. В общем случае в зависимости от задач анализа под N можно понимать и общее число пострадавших, и число смертельно травмированных или другой показатель тяжести последствий. Для практики оценки риска рекомендуется выделять значения $F(1)$ и $F(10)$ – частоты аварий с гибелью (травмирования) не менее 1 и 10 человек, соответственно. В некоторых случаях при установлении критериев приемлемости риска является использование двух кривых, когда, например, в логарифмических координатах определены F/N -кривые приемлемого и неприемлемого риска смертельного травмирования. Область между этими кривыми определяет промежуточную степень риска, вопрос о снижении

которой следует решать, исходя из специфики производства и региональных условий [19].

Рассмотрим пример построения F/N -диаграммы.

Пусть даны вероятности сценариев аварий на ОПО Q и соответствующие им количества погибших N . Значения числа погибших и соответствующие частоты сценариев аварий представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 -Исходные данные для построения F/N -диаграммы [20]

Количество погибших N , чел.	Частота сценария аварии Q , 1/год	Сумма частот сценариев F с ожидаемым количеством погибших не менее N , 1/год
1	$2,00 \cdot 10^{-6}$	$1,68 \cdot 10^{-5}$
2	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$
3	$1,10 \cdot 10^{-7}$	$1,38 \cdot 10^{-5}$
4	$1,10 \cdot 10^{-6}$	$1,36 \cdot 10^{-5}$
8	$5,00 \cdot 10^{-6}$	$1,25 \cdot 10^{-5}$
10	$1,10 \cdot 10^{-7}$	$7,54 \cdot 10^{-6}$
11	$5,00 \cdot 10^{-6}$	$7,43 \cdot 10^{-6}$
15	$1,10 \cdot 10^{-7}$	$2,43 \cdot 10^{-6}$
19	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$2,32 \cdot 10^{-6}$
21	$2,40 \cdot 10^{-8}$	$1,32 \cdot 10^{-6}$
27	$2,30 \cdot 10^{-7}$	$1,30 \cdot 10^{-6}$
100	$4,90 \cdot 10^{-7}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$
200	$5,80 \cdot 10^{-7}$	$5,80 \cdot 10^{-7}$

В таблице 2.1 также представлены суммы частот сценариев аварий F , при которых гибнет не менее N человек. Для наглядности значения N расположены в порядке возрастания.

6. Для целей экономического регулирования промышленной безопасности и страхования важным является такой показатель риска, как – риск материальных потерь – зависимость частоты возникновения сценариев аварий F , в которых причинен ущерб на определенном уровне потерь не менее G , от количества этих потерь G . Характеризует материальную тяжесть последствий (катастрофичность) реализации опасностей аварий и представляется в виде соответствующей F/G кривой. Для этих целей рекомендуется оценивать статистически ожидаемый ущерб в стоимостных или натуральных показателях (математическое ожидание ущерба или сумма произведений вероятностей причинения ущерба за определенный период на соответствующие размеры этих ущербов) [20].

Кривая социального риска для рассматриваемого примера представлена на рисунке 2.1.

Если каждому нежелательному событию, происходящему с вероятностью P_i , соответствует ущерб U_i , то величина риска будет представлять собой ожидаемую величину ущерба U_a [3]:

$$R = U_a = \sum_{i=1}^n P_i \cdot U_i \quad (2.5)$$

Одной из наиболее часто употребляемых характеристик опасности является индивидуальный риск – вероятность (или частота) поражения отдельного индивидуума в результате воздействия исследуемых факторов опасности при реализации неблагоприятного случайного события.

Обычно индивидуальный риск измеряется вероятностью гибели в исчислении на одного человека в год. Если говорится, что величина индивидуального риска, связанная с дорожно-транспортным происшествием, равна $1 \cdot 10^{-4}$ 1/год, то в статистическом плане это означает, что в течение года в автокатастрофах погибнет каждый десятитысячный человек. В общем случае количественно (статистически) индивидуальный риск R выражается отношением числа пострадавших людей n к общему числу рискующих N за определенный период времени t (обычно год) [1]:

$$R = \frac{n}{N \cdot t} \quad (2.6)$$

При расчете распределения риска по территории вокруг объекта индивидуальный риск определяется потенциальным территориальным риском и вероятностью нахождения человека в районе возможного действия опасных факторов.

Потенциальный территориальный риск в точке (x, y) оценивается по формуле [1]:

$$RI(x, y) = \sum_{ij} P(A)_i \cdot P_{ij}(x, y) \cdot P(L)_j \quad (2.7)$$

где $P(A)_i$ – вероятность аварийного выброса за год по сценарию i ;

$P_{ij}(x, y)$ – условная вероятность реализации механизма воздействия j в точке (x, y) для сценария выброса;

$P(L)_j$ – условная вероятность летального исхода (или заболевания) при реализации механизма воздействия j (в качестве сценариев механизма воздействия могут рассматриваться тепловые поражения людей, поражения ударной волной, поражение осколками и т.д.).

Индивидуальный риск поражения человека, находящегося в определенной точке пространства, следует оценивать по следующей формуле [2]:

$$R(x, y) = \sum_{ij} P(A)_i \cdot P_{ij}(x, y) \cdot P(L)_j \cdot f_k \quad (2.8)$$

где f_k – вероятность присутствия k -го индивида в данной точке (области) пространства.

Средний индивидуальный риск поражения человека, определяется по следующей формуле [3]:

$$\bar{R} = \frac{[\sum_{x,y} RI(x,y) \cdot N(x,y)]}{\sum_{x,y} N(x,y)} \quad (2.9)$$

где $N(x, y)$ – численность людей на площадке с координатами (x, y) .

Коллективный риск (общее число смертельных исходов) определяется по формуле [1]:

$$RN = \sum_{x,y} PRI(x, y) \cdot N(x, y) = \sum_{j=1}^J N_r^i \cdot Q_j \quad (2.10)$$

где N_r^i – ожидаемое количество погибших при реализации сценария развития аварии j ;

Q_j – частота реализации в течение года j -го сценария развития аварии, при котором ожидаемо количество погибших N_r^i , 1/год;

J – число сценариев развития аварий.

Вероятность f_k рекомендуется определять, исходя из доли времени нахождения рассматриваемого человека в определенной области территории.

Для производственного персонала долю времени, при которой реципиент подвергается опасности, можно оценить величиной 0,22 – для производственных объектов с постоянным пребыванием персонала (41 час в неделю) и 0,08 – для производственных объектов без постоянного пребывания персонала (менее 2 часов в смену).

Для прочих наиболее характерных мест пребывания людей долю времени, при которой реципиент подвергается опасности, можно оценить следующим образом [2]:

- для мест постоянного проживания – 1 (человек находится постоянно в данной точке);
- для садовых участков – 0,17 (2 месяца в году);

- гаражи – 0,0125 (0,3 часа в день);
- для автомобильных и железных дорог – определяется с учетом длины сближения с опасным участком, средней скорости движения по дороге, количества совершаемых поездок.

Значения $P(A)_i$ определяют из статистических данных или на основе методик, изложенных в нормативных документах.

Характерные вероятности аварий основных технологических элементов представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Частоты реализации инициирующих пожароопасные ситуации событий для некоторых типов оборудования объектов

Наименование оборудования	Инициирующее аварийю событие	Диаметр отверстия истечения, мм	Частота разгерметизации, год ⁻¹
Резервуары, емкости, сосуды и аппараты под давлением	Разгерметизация с последующим истечением жидкости, газа или двухфазной среды	5	$4,0 \cdot 10^{-5}$
		12,5	$1,0 \cdot 10^{-5}$
		25	$6,2 \cdot 10^{-6}$
		50	$3,8 \cdot 10^{-6}$
		100	$1,7 \cdot 10^{-6}$
		Полное разрушение	$3,0 \cdot 10^{-7}$
Насосы (центробежные)	Разгерметизация с последующим истечением жидкости или двухфазной среды	5	$4,3 \cdot 10^{-3}$
		12,5	$6,1 \cdot 10^{-4}$
		25	$5,1 \cdot 10^{-4}$
		50	$2,0 \cdot 10^{-4}$
		Диаметр подводящего / отводящего трубопровода	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Компрессоры (центробежные)	Разгерметизация с последующим истечением газа	5	$1,1 \cdot 10^{-2}$
		12,5	$1,3 \cdot 10^{-3}$
		25	$3,9 \cdot 10^{-4}$
		50	$1,3 \cdot 10^{-4}$
		Полное разрушение	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Резервуары для хранения ЛВЖ и горючих жидкостей (далее – ГЖ) при давлении, близком к атмосферному	Разгерметизация с последующим истечением жидкости в обвалование	25	$8,8 \cdot 10^{-5}$
		100	$1,2 \cdot 10^{-5}$
		Полное разрушение	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Резервуары с плавающей крышей	Пожар в кольцевом зазоре по периметру резервуара	-	$4,6 \cdot 10^{-3}$
	Пожар по всей поверхности резервуара	-	$9,3 \cdot 10^{-4}$

Резервуары стационарной крышей	со	Пожар на дыхательной арматуре	-	$9,0 \cdot 10^{-5}$
		Пожар по всей поверхности резервуара	-	$9,0 \cdot 10^{-5}$

Примечание: под полным разрушением подразумевается утечка с диаметром истечения, соответствующим максимальному диаметру подводящего или отводящего трубопровода, или разрушения резервуара, емкости, сосуда или аппарата.

2.2 Оценка вероятности отказа системы

Количественная оценка вероятности системы определяется по формулам [1]:

$$p(t) = 1 - \int f(t)dt \quad (2.11)$$

$$q(t) = 1 - p(t) \quad (2.12)$$

$$f(t) = -\frac{dp(t)}{dt} \quad (2.13)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)} \quad (2.14)$$

где $p(t)$ – вероятность безотказной работы в интервале времени от 0 до t ;

$q(t)$ – вероятность отказа в интервале времени от 0 до t ;

$f(t)$ – частота отказов изделия или плотность вероятности времени безотказной работы T ;

$\lambda(t)$ – интенсивность отказа.

Формулы (2.11) – (2.14) для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы примут вид [3]:

$$p(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.15)$$

$$q(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.16)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.17)$$

$$\lambda(t) = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda \quad (2.18)$$

$$m_t = \frac{1}{\lambda} \quad (2.19)$$

где m_t – среднее время безотказной работы.

Условная шкала вероятности отказа системы приведена в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Оценка вероятности отказа

Значение среднего времени безотказной работы системы	Степень отказа системы
Менее 300 часов	Высокая
300-1000 часов	Средняя
1000 и более часов	Низкая

При последовательном соединении система является работоспособной тогда, когда работоспособны все ее элементы.

Вероятность безотказной работы системы за время t определяется формулой [1]:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t), \dots, P_n(t) = \prod P_i(t) \quad (2.20)$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента за время t .

Если $P_i(t) = P(t)$, то $P_c(t) = P^n(t)$.

Интенсивность отказов системы определяется формулой [2]:

$$\lambda_c = \sum \lambda_i(t) \quad (2.21)$$

где $\lambda_i(t)$ – интенсивность отказов i -го элемента;

$\lambda_c(t)$ – интенсивность отказов системы.

Вероятность отказа системы на интервале времени $(0, t)$ равна [2]:

$$q_c = 1 - \prod P_i(t) \quad (2.22)$$

Частота отказов системы $f_c(t)$ определяется соотношением [1]:

$$f_c = -\frac{dP_c(t)}{dt} \quad (2.23)$$

Интенсивность отказов системы определяется по следующей формуле [1]:

$$\lambda_c = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} \quad (2.24)$$

Среднее время безотказной работы системы определяется по формуле [2]:

$$m_{tc} = \int P_c(t) dt \quad (2.25)$$

При экспоненциальном законе всех элементов системы получим [1]:

$$\lambda_i(t) = \lambda_i \quad (2.26)$$

$$\lambda_{ic}(t) = \sum \lambda_i = \lambda_c \quad (2.27)$$

$$P_i(t) = \exp(-\lambda_i t) \quad (2.28)$$

$$P_c(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.29)$$

$$f_c(t) = \lambda_c \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.30)$$

$$q_c(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.31)$$

$$m_{tc} = \frac{1}{\lambda_c} \quad (2.31)$$

2.3 Примеры расчета риска

Пример 2.3.1. Провести численную оценку риска чрезвычайного происшествия в технической системе, состоящей из 3-х подсистем, с независимыми отказами. Вероятности отказов подсистем: $P_1 = 10^{-3}$, $P_2 = 10^{-4}$, $P_3 = 10^{-2}$, ожидаемые ущербы от отказов подсистем $U_1 = 10^6$ тг., $U_2 = 50 \cdot 10^6$ тг., $U_3 = 5 \cdot 10^6$ тг.

Решение. Определим величину риска чрезвычайного происшествия технической системы как ожидаемую величину ущерба:

$$R = U_a = \sum_{i=1}^n P_i \cdot U_i = P_1 U_1 + P_2 U_2 + P_3 U_3,$$

$$R = 10^{-3} \cdot 10^6 + 10^{-4} \cdot 50 \cdot 10^6 + 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^6 = 56000 \text{ тг}$$

Пример 2.3.2. Провести численную оценку риска чрезвычайного происшествия в технической системе, состоящей из 5-и подсистем с независимыми равновозможными отказами $P = 10^{-2}$. Ожидаемые ущербы от отказов подсистем $U_1 = 5 \cdot 10^6$, $U_2 = 10 \cdot 10^6$, $U_3 = 20 \cdot 10^6$, $U_4 = 15 \cdot 10^6$, $U_5 = 25 \cdot 10^6$.

Решение. Определим величину риска чрезвычайного происшествия технической системы с равновозможными отказами подсистем как ожидаемую величину ущерба:

$$R = U_a = \sum_{i=1}^5 P \cdot U_i = P \cdot (U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5)$$

$$R = 10^{-2} \cdot (5 + 10 + 20 + 15 + 25) \cdot 10^6 = 750000 \text{тг}$$

Пример 2.3.3. Согласно пожарной статистике в стране за 7 лет произошло 1862 пожара на опасных производственных объектах, в которых погибло 142 человека. Численность населения работающего на опасных производственных объектах составляет 143000 человека. Определить пожарный и индивидуальный пожарный риски.

Решение. Вычислим пожарный (технический) риск по формуле 2.6:

$$R = \frac{1862}{143000} = 13 \cdot 10^{-3} \text{ед./год}$$

Далее рассчитаем пожарный индивидуальный риск:

$$R_{\text{инд}} = \frac{142}{143000 \cdot 7} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ед./год}$$

т.е. из 100 тыс. работников опасных производственных объектов погибает 14 человек в год.

Пример 2.3.4. Время работы элемента до отказа подчинено экспоненциальному закону распределения с параметром интенсивности отказа $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/час.

Требуется вычислить количественные характеристики вероятностей: $p(t)$ безотказной работы в интервале времени от 0 до t ; $q(t)$ отказа в интервале времени от 0 до t ; $f(t)$ частоты отказов изделия или плотность вероятности времени безотказной работы T ; m_t – среднее время безотказной работы $t = 1000$ час.

Решение. Определим вероятность безотказной работы по формуле 2.15:

$$p(t) = e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3} = 0,975$$

Определим вероятность отказа по формуле $q(1000)$ 2.16:

$$q(1000) = 1 - 0,975 = 0,025$$

Определим частоту отказов по формуле 2.17:

$$f(t) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,975 = 2,4 \cdot 10^{-5}$$

Вычисли среднее время безотказной работы по формуле 2.19:

$$m_t = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-5}} = 40000 \text{ час}$$

Вывод. В соответствии с таблицей 2.3 вероятность отказа системы будет низкой.

Пример 2.3.5. Система состоит из трех блоков, среднее время безотказной работы которых равна $m_{t1} = 130$ час; $m_{t2} = 310$ час; $m_{t3} = 660$ час. Для блоков справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется определить среднее время безотказной работы системы.

Решение. По формуле 2.31 получим значения интенсивности отказов каждого элемента системы:

$$m_{t1} = \frac{1}{130} = 0,0077, m_{t2} = \frac{1}{310} = 0,0032, m_{t3} = \frac{1}{660} = 0,0015$$

Определим интенсивность отказа системы по формуле 2.27:

$$\lambda_c = 0,0077 + 0,0032 + 0,0015 = 0,0124$$

Тогда среднее время безотказной работы системы составит:

$$m_{tc} = \frac{1}{0,0124} = 80,6 \text{ час}$$

Вывод. В соответствии с таблицей 2.3 вероятность отказа системы будет высокой.

Пример 2.3.6. Рассчитать вероятность отказа сложного технологического оборудования в цехе промышленного предприятия, где:

- 1) емкости I — 10 шт., средний срок службы — 50 лет;
- 2) емкости II — 20 шт., средний срок службы — 100 лет;
- 3) трубопроводы — 100 пог. м, условный средний срок службы 1 пог. м — 200 лет.

Решение. Параметр потока отказов в целом цехе определится по уравнению:

$$\Lambda = \frac{1}{T} = \frac{n_1}{T_1} + \frac{n_2}{T_2} + \frac{n_3}{T_3} = \frac{10}{50} + \frac{20}{100} + \frac{100}{200} = \frac{9}{10}$$

Для времени $\tau=0,5$ года вероятность $p_0(\tau)$ безаварийной работы составит:

$$p_0(\tau) = e^{\frac{\tau}{T}} = e^{\frac{0,5 \cdot 9}{10}} = 0,63$$

Вероятность того, что выход газа произойдет из m -й группы оборудования, можно определить из уравнения:

$$B_{m_1} = \frac{n_1 \cdot \Lambda_1}{n_1 \cdot \Lambda_1 + n_2 \cdot \Lambda_2 + n_3 \cdot \Lambda_3} = \frac{10 \cdot 1/5}{10 \cdot 1/5 + 20 \cdot 1/5 + 100 \cdot 1/2} = 0,0357$$

$$B_{m_2} = \frac{n_2 \cdot \Lambda_2}{n_1 \cdot \Lambda_1 + n_2 \cdot \Lambda_2 + n_3 \cdot \Lambda_3} = \frac{20 \cdot 1/5}{10 \cdot 1/5 + 20 \cdot 1/5 + 100 \cdot 1/2} = 0,0714$$

$$B_{m_3} = \frac{n_3 \cdot \Lambda_3}{n_1 \cdot \Lambda_1 + n_2 \cdot \Lambda_2 + n_3 \cdot \Lambda_3} = \frac{100 \cdot 1/2}{10 \cdot 1/5 + 20 \cdot 1/5 + 100 \cdot 1/2} = 0,893$$

Вывод: наиболее вероятным источником образования взрывоопасной смеси в данном цехе при аварии оборудования следует принять трубопроводы.

2.4 Задания для самостоятельной работы

Задание 2.4.1. Рассчитать показатель индивидуального риска травматизма, если число травмированных на производстве n , а число работающих - N чел.:

Таблица 2.4 – Исходные данные

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n	7	6	5	4	12	21	18	20	24	22
N	1525	1530	1535	1540	5000	5200	5400	5600	5800	6000

Задание 2.4.2. Чему равен индивидуальный риск травматизма на производственном предприятии, где работают N человек, если коллективный риск равен R_k ?

Таблица 2.5 – Исходные данные

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N	1545	1550	1565	1570	5600	5350	5560	5780	5940	6750
R_k	$3 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$8,4 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{-2}$	$7,8 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$

Задание 2.4.3. Определите количественные характеристики вероятностей: $p(t)$ безотказной работы в интервале времени от 0 до t ; $q(t)$ отказа в интервале времени от 0 до t ; $f(t)$ частоты отказов изделия или плотность вероятности времени безотказной работы T .

Таблица 2.6 – Исходные данные для вычисления количественных характеристик

Вариант	Интенсивность отказов, 1/час	Период времени, час
1	$2,6 \cdot 10^{-5}$	1100
2	$3,1 \cdot 10^{-5}$	1200
3	$2,4 \cdot 10^{-5}$	1300
4	$2,9 \cdot 10^{-5}$	950
5	$3,3 \cdot 10^{-5}$	1150
6	$2,8 \cdot 10^{-5}$	1230
7	$3,0 \cdot 10^{-5}$	985
8	$2,9 \cdot 10^{-5}$	1500
9	$2,5 \cdot 10^{-5}$	1300

10	$1,7 \cdot 10^{-5}$	1280
----	---------------------	------

Задание 2.4.4. Определите среднее время безотказной работы системы.

Таблица 2.7 – Исходные данные для вычисления безотказной работы системы с последовательным соединением.

Вариант	Интенсивность отказов, 1/час	Период времени, час
1	3	120; 340; 550
2	4	960; 770; 800; 920
3	5	340; 560; 890; 210; 260
4	6	230; 560; 780; 220; 280; 310
5	3	250; 430; 720
6	4	650; 830; 720; 980
7	5	580; 240; 760; 660; 290
8	6	730; 840; 450; 930; 790; 330
9	3	480; 260; 430
10	4	290; 380; 990; 670

3. Логико-графические методы анализа аварийного риска

Анализ причин промышленных аварий показывает, что возникновение и развитие крупных аварий, как правило, характеризуется комбинацией случайных локальных событий, возникающих с различной частотой на разных стадиях аварии (отказы оборудования, человеческие ошибки при эксплуатации (проектировании, внешние воздействия, разрушение/разгерметизация, выброс) утечка, пролив вещества, испарение, рассеяние веществ, воспламенение, взрыв, интоксикация и т.д.) Для выявления причинно-следственных связей между этими событиями используют логико-графические методы деревьев отказов и событий (рисунок 3.1).

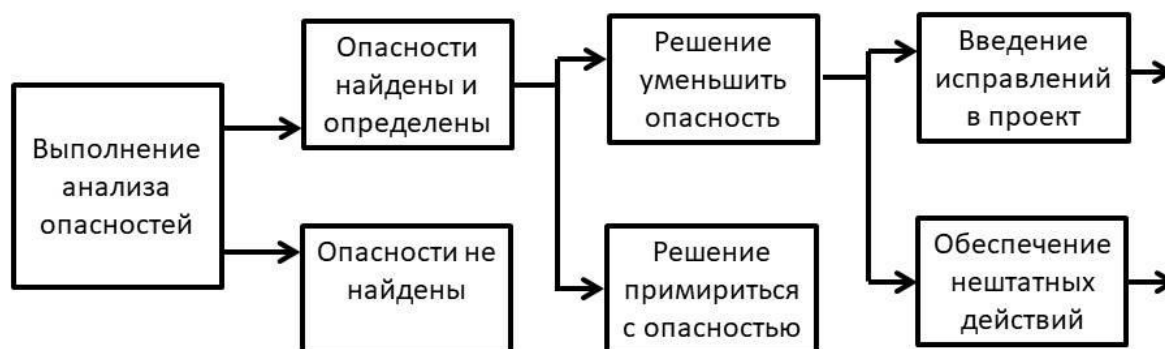


Рисунок 3.1 - Дерево решений для анализа опасностей

3.1 Анализ методом «дерево отказов»

Дерево отказов – логическая схема причинно-следственных закономерностей возникновения аварии, показывающая последовательность и сочетание различных событий (отказов, ошибок, нерасчетных внешних воздействий), возникновение которых может приводить к разгерметизации и последующей аварийной ситуации [1].

С помощью анализа дерева отказов фактически делается попытка количественно выразить риск дедуктивным методом. Деревья отказов идентифицируют событие или ситуацию, создающие риск, после чего ставится вопрос: как могло возникнуть такое событие? Ответ заключается в том, что к такому событию могло привести множество путей.

Построение деревьев отказа (рисунок 3.2) представляет собой многоуровневый процесс прослеживания и осмысливания опасных ситуаций в обратном порядке (сверху вниз), для того чтобы, во-первых, отыскать все

возможные причины их возникновения (нижестоящие, иницирующие события) и, во-вторых, определить частоту возникновения «верхнего», головного события-аварии или аварийной ситуации [4].

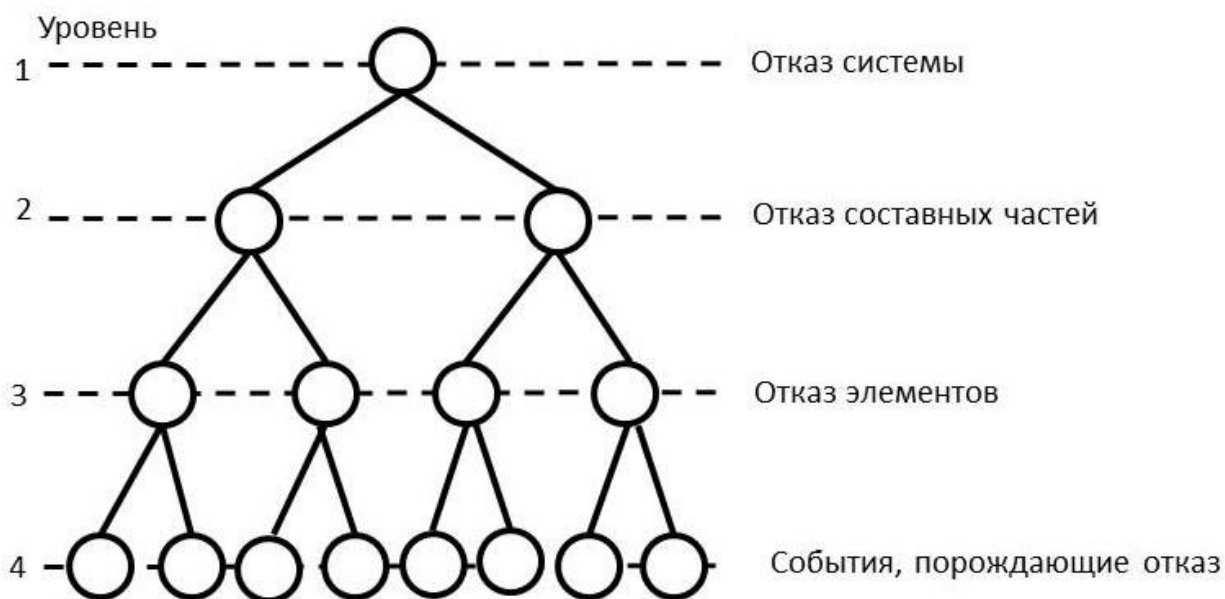


Рисунок 3.2 - Структура (граф) дерева отказов

В практике оценки и анализа риска дерево отказов является одним из основных методов количественного определения вероятностной составляющей риска - частоты возникновения аварии. При этом весь набор нижестоящих событий: отказов, ошибок, причин и последствий, логических связей - можно интерпретировать как корни дерева, переходящие в одно головное (конечное для дерева отказов) событие-аварию, т.е. ствол дерева. Попутно отметим, что «разветвления ствола дерева» будут характеризовать уже другой метод - деревья событий, исследующий последствия головного (здесь: исходного) события-аварии [6].

Пример «дерева отказов», системы перекачки горючей жидкости для аварийной ситуации «возникновение пожара», приведен на рисунок 3.3.

Структура «дерева отказов» включает одно головное событие (аварию, инцидент), которое соединяется с набором соответствующих нижестоящих событий (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих причинные цепи.

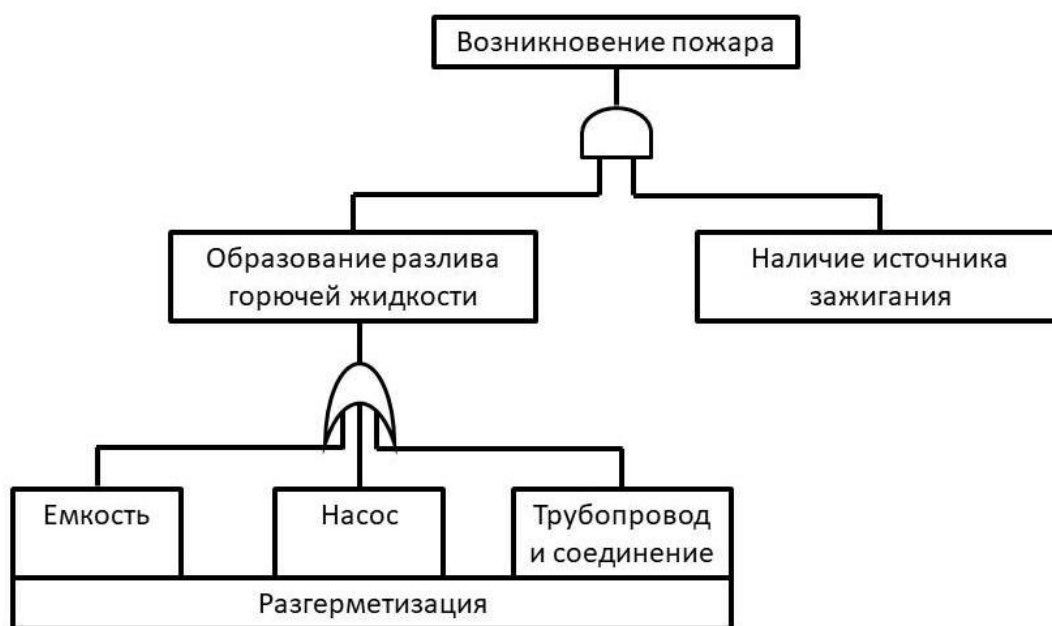
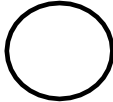
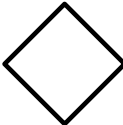
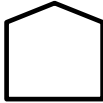


Рисунок 3.3 - Дерево отказов системы перекачки горючей жидкости

Чтобы отыскать и наглядно представить причинную взаимосвязь с помощью дерева отказов, необходимы элементарные блоки, подразделяющие и связывающие большое число событий. Имеется два типа блоков: логические символы (знаки) и символы событий.

Символы событий представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Символы событий [6]

№	Символ события	Содержание события
1		Исходное событие, обеспеченное достаточными данными (первичный отказ)
2		Событие, недостаточно детально разработанное (вторичный отказ)
3		Событие, вводимое логическим элементом (стоит над логическим символом)
4		Условное событие, используемое с логическим знаком «запрет»
5		Событие, которое может случиться или не случиться
6	  Перенос «в» Перенос «из»	Символы переноса

Прямоугольный блок обозначает событие отказа системы, которое возникает как результат действия элементарных отдельных отказов блоков системы, соединенных с помощью логических элементов. Круглый блок обозначает исходный отказ отдельного элемента данной системы, который определяет, таким образом, разрешающую способность данного дерева отказов. События, представленные в круглых блоках, называются исходными событиями.

Символом «домик» обозначают событие, которое может случиться, а может и не случиться.

Ромбы используются для обозначения детально не разработанных событий, т. е. детальный анализ не доведен до исходных типов отказов из-за отсутствия необходимой информации, средств или времени [6].

Логические символы. Логические символы (знаки) связывают события в соответствии с их причинными взаимосвязями. Обозначения логических знаков приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Значение логических символов дерева отказов [6]

№	Символ логического знака	Название логического знака	Причинная взаимосвязь
1		И	Выходное событие происходит, если все входные события случаются одновременно
2		ИЛИ	Выходное событие происходит, если случается любое из входных событий
3		Запрет	Наличие входа вызывает наличие выхода тогда, когда происходит условное событие
4		Приоритетное И	Выходное событие случается, если все входные события происходят в нужном порядке слева направо

5		Исключающее ИЛИ	Выходное событие случается, если случается одно (но только одно) из выходных событий
6		"m из n" (голосования или выборки)	Выходное событие случается, если случается m из n входных событий

Значение логических символов дерева отказов.

Логический символ (знак) может иметь один или несколько входов, но только один выход, или выходное событие.

Логический знак "И" (схема совпадения). Выходное событие логического знака И наступает в том случае, если все входные события появляются одновременно [7].

Правило формулирования событий. События, входные по отношению к операции И, должны формулироваться так, чтобы второе было условным по отношению к первому, третье условным по отношению к первому и второму, а последнее - условным ко всем предыдущим. Кроме того, по крайней мере, одно из событий должно быть связано с появлением выходного события.

Полная характеристика события не требуется. Иногда она даже мешает графической ясности диаграммы. Требуется лишь упорядочить события так, чтобы стоящее справа зависело от появления стоящего слева. Таким образом, появление выходного события будет определяться появлением последнего события в ряду N – событий [7].

Правило применения логического знака И. Если имеются несколько причин, которые должны появиться одновременно, то обычно используют операцию И. Входы операции должны отвечать на вопрос: "Что необходимо для появления выходного события?".

Логический знак "ИЛИ" (схема объединения). Выходное событие логического знака ИЛИ наступает в том случае, если имеет место любое из входных событий.

Правило формулирования событий. События, входные по отношению к операции ИЛИ, должны формулироваться так, чтобы они вместе исчерпывали все возможные пути появления выходного события. Кроме того, любое из входных событий должно приводить к появлению выходного события.

Правило не дает способа описания событий, но оно должно выполняться при построении дерева отказа.

Правило применения логического знака ИЛИ. Если любая из причин приводит к появлению выходного события, следует использовать операцию ИЛИ. Входы операции отвечают на вопрос: "Какие события достаточны для появления выходного события?".

Порядок применения логических знаков И и ИЛИ. Для любого события, подлежащего дальнейшему анализу, вначале рассматриваются все возможные события, являющиеся входами операций ИЛИ, затем входы операций И. Это справедливо как для головного события, так и для любого события [7].

Причинные связи, выраженные логическими знаками И и ИЛИ, являются детерминированными, так как появление выходного события полностью определяется входными событиями.

Логический знак запрета. Шестиугольник, являющийся логическим знаком запрета и расположенный в строке 3 таблицы 3.2. Значение логических символов дерева отказов, используется для представления вероятностных причинных связей. Событие, помещенное под логическим знаком запрета называется входным событием, в то время, как событие, расположенное сбоку от логического знака, называется условным событием. Условное событие принимает форму события при условии появления входного события. Выходное событие происходит, если и входное и условное событие имеют место. Другими словами, входное событие вызывает выходное событие с вероятностью (обычно постоянной) появления условного события. Логический знак запрета часто появляется в тех случаях, когда событие вызывается по требованию. Он используется главным образом для удобств и может быть заменен логическим знаком И [7].

Событие на выходе появляется, если события на входе происходят в определенной последовательности (слева направо). Появление событий на входе в другом порядке не вызывает события на выходе. Рассмотрим, например, систему, имеющую основной источник питания и резервный. Резервный источник питания включается в работу автоматически переключателем, когда отказывает основной источник. Питание в системе отсутствует, если [1]:

- отказывают как основной, так и резервный источники;
- сначала выходит из строя переключатель, а затем отказывает основной источник питания.

Предполагается, что, если за отказом переключателя следует отказ основного источника, это не приведет к потере питания при условии нормальной работы резервного источника. Логический символ "приоритетное И" может быть представлен сочетанием "логического И" и

знака "запрета", а следовательно, эти логические знаки являются эквивалентом "логического И". Условным событием для "логического запрета" является то, что входные события логического знака И происходят в определенной последовательности.

Логический символ "исключающее ИЛИ" (строка 5 таблица 3.2) описывает ситуацию, в которой событие на выходе появляется, если одно из двух (но не оба) событий происходят на входе. В качестве примера рассмотрим систему, питаемую от двух генераторов. Частичная потеря мощности может быть представлена элементом "исключающее ИЛИ". "Исключающее ИЛИ" может быть заменено комбинацией логических элементов И и ИЛИ.

Эквивалентное представление логического знака «исключающее ИЛИ». Обычно в дереве отказов избегают использования работоспособных состояний, таких как "генератор работает", так как они в значительной степени усложняют количественный анализ. Разумным подходом является замена логического знака "исключающее ИЛИ" комбинацией знаков И и ИЛИ.

Логический знак голосования m из n (строка 6 таблица 3.2) имеет n событий на входе, а событие на выходе появляется, если происходят по меньшей мере m из n событий на входе. Рассмотрим отказ системы, которая сохраняет работоспособность до отключения двух из трех источников питания. Предположим, что выключение системы происходит тогда и только тогда, когда два из трех источников питания вышли из строя. Таким образом, ненужное выключение системы происходит, если два или большее число контрольных приборов подадут ложный сигнал на выключение, в то время как система находится в нормальном состоянии.

Результирующее событие: наступает в результате конкретной комбинации неисправностей на входе логической схемы; изображается в виде прямоугольника.

Событие, означающее первичный отказ, изображается в виде кружка.

Первичный отказ элемента определяют как нерабочее состояние этого элемента, причиной которого является он сам, и необходимо выполнить ремонтные работы для возвращения элемента в рабочее состояние. Первичные отказы происходят при входных воздействиях, значение которых находится в пределах, лежащих в расчетном диапазоне, а отказы объясняются естественным старением элементов. Вероятность первичного отказа определяется из формул теории надежности.

При расчете вероятности возникновения аварии необходимо учитывать применяемые логические символы. Вероятность $P(A)$ выходного события A при независимости входных событий $A_1, A_2, \dots, A_n$ определяют по формулам:

- при знаке «И» [7]:

$$P(A) = \prod_{i=1}^n P(A_i) \quad (3.1)$$

- при знаке «ИЛИ» [7]:

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(A_i)] \quad (3.2)$$

где $P(A_i)$ – вероятность события A_i .

3.2 Анализ методом «дерево событий»

Дерево событий – алгоритм построения последовательности событий, исходящих из основного события (аварийной ситуации) – используется для анализа развития аварийной ситуации (сценариев аварий), в том числе оценки вероятности реализации поражающих факторов [1].

Анализ дерева событий может дать ответ на вопрос: какие аварийные ситуации могут возникнуть и какие вероятности этих событий? Ответы могут быть получены с помощью анализа потенциальных сценариев аварий.

Пример использования метода «дерева событий» для оценки вероятности реализации различных сценариев аварий приведен на рисунке 3.4–3.7.

Сценарий развития аварии – последовательность отдельных логически связанных событий, обусловленных конкретным иницирующим (исходным) событием, приводящих к возникновению поражающих факторов аварии и причинению ущерба от аварии людским и (или) материальным ресурсам или компонентам природной среды [7].

Дерево событий обычно рисуется слева направо и начинается с исходного события. Этим исходным событием является любое событие, которое приводит к отказу какой-либо системы. В дереве событий исходные события связаны со всеми другими возможными событиями – ветвями, а каждый сценарий представляет собой путь развития аварии, состоящий из набора таких разветвлений.

Полная разгерметизация резервуара с СУГ 1,00	Выброс без мгновенного воспламенения	Ликвидация без негативных последствий	Сценарий С-1
		0,608	
		Объемный взрыв	Сценарий С-2
	Выброс с мгновенным воспламенением	0,115	
		Сгорание облака	Сценарий-3
		0,077	
	Выброс с мгновенным воспламенением	Огненный шар	Сценарий-4
	0,2	0,2	

Рисунок 3.4 - Пример «дерева событий» при полной разгерметизации резервуара с СУГ

Частичная разгерметизация резервуара с СУГ 1,00	Истечение без мгновенного воспламенения	Ликвидация без негативных последствий	Сценарий С-5
		0,608	
		Объемный взрыв	Сценарий С-6
	Истечение с мгновенным воспламенением	0,008	
		Сгорание облака	Сценарий-7
		0,027	
	Истечение с мгновенным воспламенением	Факельное горение	Сценарий-8
	0,035	0,0352	

Рисунок 3.5 - Пример «дерева событий» при частичной разгерметизации резервуара с СУГ

Полная разгерметизация резервуара с ЛВЖ 1,00	Выброс без мгновенного воспламенения	Ликвидация без токсического поражения	Сценарий С-1
		0,543	
	С мгновенным воспламенением	Токсическое поражение	Сценарий С-2
		0,065	
		Сгорание облака с последующим пожаром пролива	Сценарий-3
	0,8	0,077	
	С мгновенным воспламенением	Объемный взрыв с последующим пожаром пролива	Сценарий-4
		0,115	
	С мгновенным воспламенением	Пожар пролива	Сценарий-5
		0,2	

Рисунок 3.6 - Пример «дерева событий» при полной разгерметизации резервуара с ЛВЖ

Частичная разгерметизация резервуара с ЛВЖ 1,00	Истечение без мгновенного воспламенения	Ликвидация без токсического поражения	Сценарий С-6
		0,837	
	С мгновенным воспламенением	Токсическое поражение	Сценарий С-7
		0,093	
		Сгорание облака с последующим пожаром пролива	Сценарий-8
	0,965	0,027	
	С мгновенным воспламенением	Объемный взрыв с последующим пожаром пролива	Сценарий-9
		0,008	
	С мгновенным воспламенением	Факельное горение с последующим пожаром пролива	Сценарий-10
		0,035	

Рисунок 3.7 - Пример «дерева событий» при частичной разгерметизации резервуара с ЛВЖ

На рисунках 3.4-3.7 цифры рядом с наименованием события показывают условную вероятность возникновения этого события. При этом вероятность возникновения инициирующего события (разгерметизация резервуара) принята равной 1. Значение частоты возникновения отдельного события или сценария пересчитывается путем умножения частоты возникновения инициирующего события на условную вероятность конечного события [2].

Определив все исходные события и организовав их в логической последовательности, можно получить большое число потенциальных сценариев аварии. С помощью анализа дерева событий можно определить пути развития аварии, которые вносят наибольший вклад в риск из-за их высокой вероятности или потенциального ущерба [7].

3.3 Пример построения «дерево отказов»

Пример 3.1. Построить дерево отказов для анализа причин поражения человека электрическим током, провести его качественный и количественный анализ (рисунок 3.8).

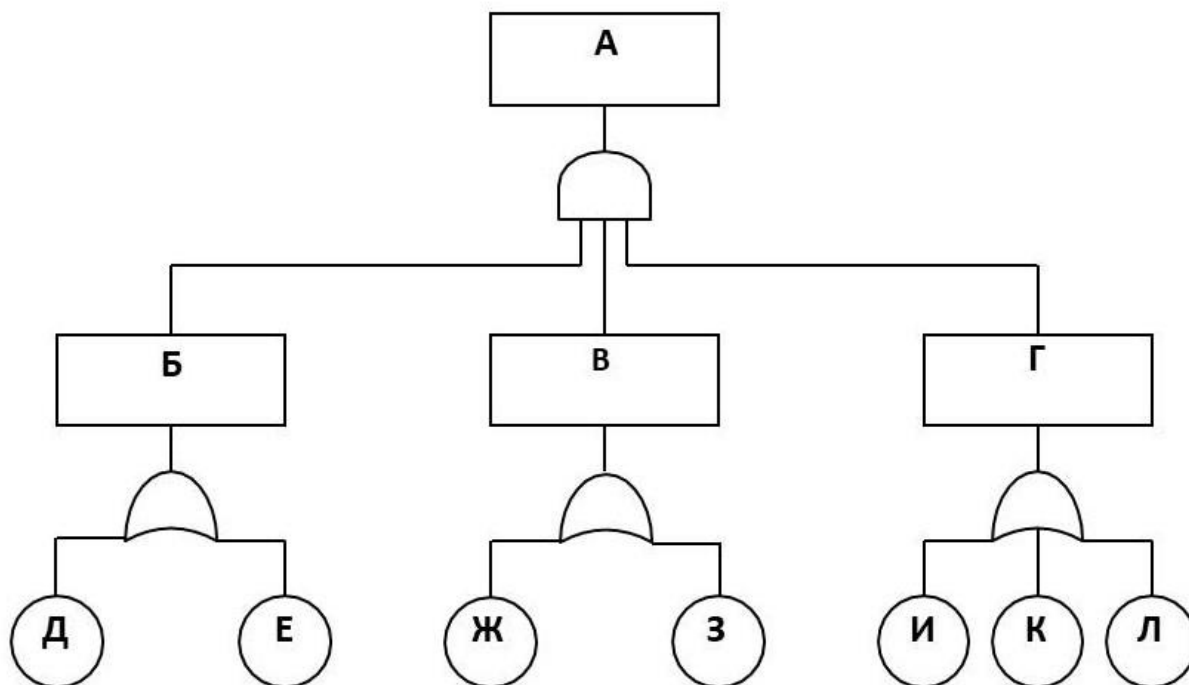


Рисунок 3.8 - Дерево отказов для анализа причин поражения человека электрическим током

Будем считать, что необходимым и достаточным условием поражения человека электрическим током является включение его тела в цепь, обеспечивающую прохождение смертельного тока. Следовательно, несчастный случай (событие *A*) произойдет, если одновременно будут выполнены, по крайней мере, три условия: наличие потенциала на металлическом корпусе электроустановки (событие *B*), появление человека на заземленном проводящем основании (событие *B*), прикосновение человека к корпусу электроустановки (событие *Г*).

В свою очередь, событие *B* может быть следствием любого из событий-предпосылок *Д* и *Е*, например нарушения изоляции или смещения неизолированного контакта и касания им корпуса. Событие *В* может возникнуть в результате действия предпосылок *Ж* и *З*, если человек станет ногой на токопроводящее основание или коснется телом заземленных элементов конструкций помещения. Событие *Г* может явиться следствием одного из трех событий-предпосылок, *И*, *К* и *Л*: ремонта или техобслуживания оборудования или штатного режима работы установки.

Процесс анализа дерева отказов состоит в выявлении условий, необходимых и достаточных для возникновения или не возникновения головного события. Модель может давать большое число сочетаний исходных событий, которые будут приводить в совокупности к поражению человека электрическим током. В данном примере имеются двенадцать сочетаний, приводящих к данному исходу: *ДЖИ*, *ДЖК*, *ДЖЛ*, *ДЗИ*, *ДЗК*, *ДЗЛ*, *ЕЖИ*, *ЕЖК*, *ЕЖЛ*, *ЕЗИ*, *ЕЗК*, *ЕЗЛ*. В то же время имеется три сочетания, исключающих возможность поражения током при одновременном отсутствии образующих его событий: *ДЕ*, *ЖЗ*, *ИКЛ*.

Уравнение расчета вероятности поражения током для исследуемого происшествия будет иметь вид:

$$P(A) = (P(D) + P(E)) \cdot (P(J) + P(Z)) \cdot (P(I) + P(K) + P(L)) \quad (3.3)$$

После подстановки вместо буквенных символов исходных событий значения вероятностей событий-предпосылок можно оценить риск гибели человека от электрического тока в конкретных условиях. Например, при равных значениях вероятностей $P(D) = P(E) = \dots = P(L) = 0,1$ вероятность гибели человека от электротока равна:

$$P(A) = (0,1 + 0,1) \cdot (0,1 + 0,1) \cdot (0,1 + 0,1 + 0,1) = 0,012$$

Этот метод может быть использован для расчета вероятности несчастного случая на производстве или аварии оборудования.

При построении дерева отказов выделяются предшествующие события-предпосылки, между которыми устанавливаются причинные связи, кроме того, анализируются факторы, носящие постоянный характер. Логическая структура дерева отказов показывает, что при отсутствии хотя бы одного из событий-предпосылок событие «отказ» произойти не сможет. При этом, как правило, выявляются потенциально опасные факторы, не проявившие себя в настоящее время. Следовательно, анализируя дерево отказов, можно предупредить несчастный случай или аварию.

3.4 Задания для самостоятельной работы

Задание 3.4.1. Построить дерево отказов для конечного события пожар. Исходные данные для расчёта приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 -Тип помещения

№ варианта	Конечное событие
1	Пожар в учебной лаборатории
2	Пожар в жилом доме
3	Пожар в общежитии
4	Пожар в торговом центре
5	Пожар в автомобиле
6	Пожар в трамвае

Задание 3.4.2. Построить дерево отказов, начальным событием которого является обрушение горных пород в горной выработке. В результате обрушения события могут развиваться следующим образом:

- возможно повреждение токопроводящего кабеля (вероятность P_1) или не повреждение кабеля с вероятностью S_1 ;
- при повреждении кабеля возможна остановка вентилятора местного проветривания (ВМП), подающего воздух в забой подготовительной выработки, с вероятностью P_2 или его работа продолжается (вероятность S_2);
- в случае остановки ВМП возможно образование в забое взрывоопасной концентрации горючего газа (вероятность P_3) или выделения метана недостаточно для образования взрывоопасной концентрации газов (вероятность S_3);

– при образовании взрывоопасной концентрации газов возможно появление искры, вызывающей взрыв (вероятность P_4) или искра не появляется (вероятность S_4).

Рассчитать вероятность возникновения всех возможных ситуаций. Исходные данные приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Исходные данные для выполнения задачи

Вариант	P_1	P_2	P_3	P_4	S_1	S_2	S_3	S_4
1	0,01	0,7	0,2	0,1	0,99	0,3	0,8	0,9
2	0,02	0,71	0,19	0,12	0,98	0,29	0,81	0,88
3	0,04	0,73	0,18	0,11	0,96	0,27	0,82	0,89
4	0,05	0,74	0,16	0,13	0,95	0,26	0,84	0,87
5	0,07	0,76	0,14	0,14	0,93	0,24	0,86	0,86
6	0,09	0,78	0,12	0,15	0,91	0,22	0,88	0,85
7	0,1	0,8	0,11	0,16	0,9	0,2	0,89	0,84
8	0,12	0,81	0,1	0,17	0,88	0,19	0,9	0,83
9	0,14	0,82	0,09	0,18	0,86	0,18	0,91	0,82
10	0,16	0,84	0,08	0,19	0,84	0,16	0,92	0,81
11	0,18	0,88	0,06	0,2	0,82	0,12	0,94	0,8
12	0,2	0,9	0,05	0,11	0,8	0,1	0,95	0,89
13	0,22	0,91	0,04	0,09	0,78	0,09	0,96	0,91
14	0,24	0,83	0,03	0,08	0,76	0,17	0,97	0,92
15	0,25	0,85	0,02	0,07	0,75	0,15	0,98	0,93
16	0,23	0,89	0,01	0,06	0,77	0,11	0,99	0,94
17	0,17	0,75	0,008	0,05	0,83	0,25	0,992	0,95
18	0,26	0,72	0,007	0,04	0,74	0,28	0,993	0,96
19	0,15	0,92	0,006	0,03	0,85	0,08	0,994	0,97
20	0,27	0,79	0,004	0,02	0,73	0,21	0,996	0,98

3.5 Диаграмма Исикавы

Диаграмма Исикавы (причинно-следственная диаграмма, «рыбий скелет») – инструмент качества, служащий для наглядного представления причинно-следственных связей между объектом анализа и влияющими на него факторами. Данная диаграмма используется для качественной оценки факторов, оказывающих влияние на объект. Она также используется для первоначального ранжирования (определения значимости, силы влияния) факторов, воздействующих на исследуемый объект и выбора приоритетов для устранения проблемы или улучшения показателя.

Диаграмма Исикавы строится по следующему алгоритму [6]:

1. Определяется потенциальная или существующая проблема, требующая разрешения.
2. Формулировка проблемы размещается в прямоугольнике с правой стороны листа бумаги.
3. От прямоугольника влево проводится горизонтальная линия (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 - Первые этапы построения диаграммы Исикавы

4. По краям листа с левой стороны обозначаются ключевые категории причин, влияющих на исследуемую проблему (рисунок 3.10). Следует отметить, что:

- количество категорий может изменяться в зависимости от рассматриваемой проблемы;
- как правило, используются пять или шесть категорий из приведенного выше списка (человек, методы работы, механизмы, материал, контроль, окружающая среда).

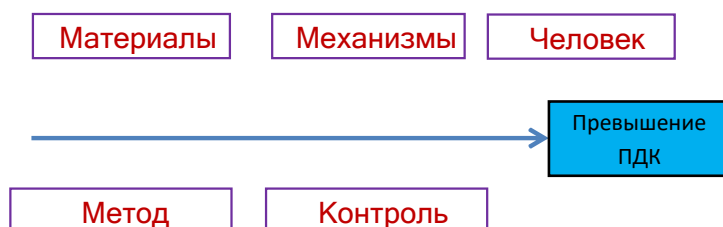


Рисунок 3.10 - Обозначение ключевых категорий причин на диаграмме

5. От названий каждой из категорий причин к центральной линии проводятся наклонные линии. Они будут являться основными ветвями диаграммы Исикавы (рисунок 3.11).

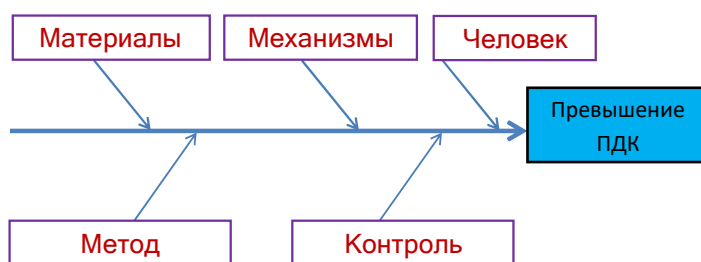


Рисунок 3.11 - Построение ветвей диаграммы

6. Причины проблемы, выявленные в ходе исследования, распределяются по установленным категориям и указываются на диаграмме в виде ветвей, примыкающих к основным ветвям (рисунок 3.12).

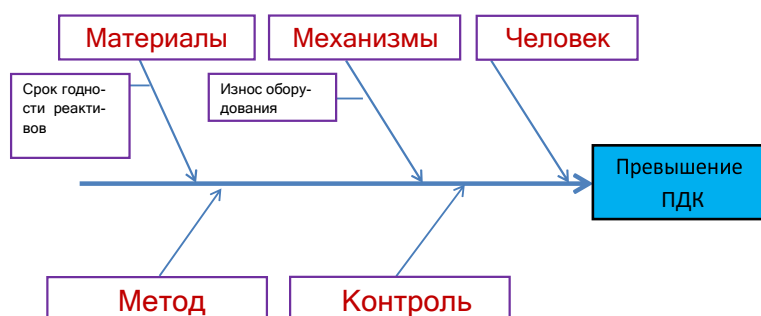


Рисунок 3.12 - Указание причин проблемы на диаграмме

7. Каждая из причин детализируется на составляющие. Для этого по каждой из них задается вопрос: «Почему это произошло?». Результаты фиксируются в виде ветвей следующего, более низкого порядка. Процесс детализации причин продолжается до тех пор, пока не будет найдена корневая причина.

8. Выявляются наиболее значимые и важные причины, влияющие на исследуемую проблему.

9. При анализе должны выявляться и фиксироваться все факторы, даже те, которые кажутся незначительными, так как цель схемы – отыскать наиболее правильный путь и эффективный способ решения проблемы.

10. Причины (факторы) оцениваются и ранжируются по их значимости, при этом выделяются особо важные, которые предположительно оказывают наибольшее влияние на показатель качества.

11. В диаграмму вносится вся необходимая информация: ее название, наименование изделия, имена участников, дата и т. д.

12. Процесс выявления, анализа и объяснения причин является ключевым в структурировании проблемы и переходе к корректирующим действиям.

13. Задавая при анализе каждой причины вопрос «почему?», можно определить первопричину проблемы.

14. Процесс постепенного раскрытия всей цепи последовательно связанных между собой причинных факторов оказывает влияние на проблему качества.

15. По значимым причинам проводится дальнейшая работа и определяются корректирующие или предупреждающие мероприятия.

3.6 Пример построения диаграммы Исикавы

Необходимо с помощью диаграммы Исикавы выявить проблему выхода из строя автопогрузчика.

Ключевой причиной выхода из строя автопогрузчика считаю низкий уровень подготовленности водителя автопогрузчика (рисунок 3.13).

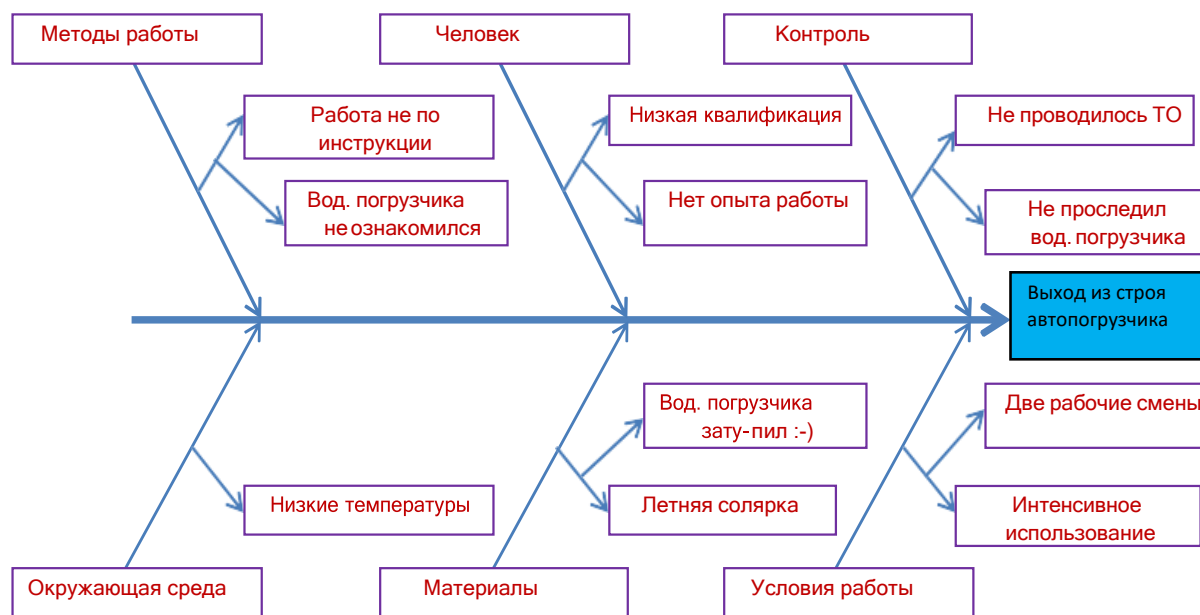


Рисунок 3.13 - Диаграмма Исикавы для выявления проблемы выхода из строя автопогрузчика

Необходимо принять меры по отправке водителя автопогрузчика на дополнительные курсы по освоению эксплуатации автопогрузчика.

3.7 Задание для самостоятельной работы

С помощью диаграммы Исикавы выявить проблему разгерметизации нефтепровода.

4. Классификация аварий

В целях упорядочения отнесения происходящих аварий к тому или иному виду вводится следующая их классификация [10]:

- 1) взрыв пылегазовоздушной смеси с возгоранием (в технологической системе, производственном помещении, на открытой площадке);
- 2) взрыв реакционной среды внутри технологической системы (аппарата) в результате отклонения параметров технологического процесса от регламентированных значений;
- 3) пожар, связанный с розливом взрывопожароопасных веществ (неконтролируемое горение, причинившее материальный ущерб, вред жизни и здоровью людей, интересам общества и окружающей природной среде);
- 4) выброс или истечение химически опасных, взрывоопасных и горючих веществ;
- 5) полное или частичное разрушение (повреждение) технологического оборудования и трубопроводов, зданий и сооружений, не связанное с взрывом, пожаром;
- 6) события, перечисленные в п.п. 1 – 5, в результате которых имеются пострадавшие, полностью или частично выведено из строя оборудование и прекращен выпуск продукции (без учета перехода на резервное оборудование);
- 7) взрыв пылегазовоздушной смеси без возгорания (хлопок);
- 8) загорание, самовозгорание в результате утечки опасных веществ при разгерметизации технологической системы, не повлекшие за собой вывода из строя технологического оборудования;
- 9) переполнение емкостной аппаратуры (железнодорожных цистерн, резервуаров, аппаратов, контейнеров, баллонов и другого оборудования) с розливом взрывопожароопасных и вредных продуктов.

4.1. Классификация взрывов

В многочисленной справочной литературе взрывные явления определяются по разному, однако общим во всех определениях является то, что взрыв – это происходящее внезапно («стремительно», «мгновенно», «в виде всплеска») «событие», при котором высвобождается внутренняя энергия и формируется избыточное давление. Такой процесс сопровождается сильным звуковым эффектом [3].

Взрыв – неконтролируемый быстропротекающий процесс выделения энергии, связанный с физическим, химическим или физико-химическим изменением состояния вещества, приводящий к резкому динамическому повышению давления или возникновению ударной волны, сопровождающийся образованием сжатых газов, способных привести к разрушительным последствиям [10].

Разрушительное действие взрыва определяется несколькими факторами, таких факторов три [22]:

- величина давления, развиваемого при взрыве (оно зависит от количества выделившихся газов и их температуры);
- энергия взрыва;
- скорость химических превращений.

Взрывная волна - есть движение среды, порожденное взрывом, при котором происходит резкое повышение давления, плотности и температуры среды. Взрыв приводит к образованию сильно нагретого газа (плазмы) с очень высоким давлением, который при моментальном расширении оказывает ударное механическое воздействие (давление, разрушение) на окружающие тела [23].

Максимальное давление взрыва - наибольшее давление, возникающее при взрыве газо-, паро- или пылевоздушной смеси в замкнутом сосуде при начальном давлении смеси 101,2 кПа.

Взрывом называется химическое или физическое превращение вещества, сопровождающееся крайне быстрым переходом его энергии в энергию сжатия и движения исходных веществ, продуктов их превращения и окружающей среды [24].

Исходя из этого, химический взрыв – это крайне быстрая реакция горения, сопровождающаяся резким переходом выделившейся тепловой энергии в энергию сжатия и движения исходных веществ, продуктов сгорания и окружающей среды.

Основными условиями протекания химической реакции в виде взрыва являются [25]:

1. Экзотермичность, которая обусловлена тем, что прочность связей между атомами в продуктах реакции намного выше, чем в исходных веществах, поэтому «лишняя» энергия высвобождается. При эндотермических реакциях взрыва не происходит.

2. Образование газов:

- во-первых, переход в газообразное состояние при химической реакции любых веществ в постоянном объеме ведет к возрастанию давления;

- во-вторых, газы имеют очень большой коэффициент объемного расширения при нагреве. Без наличия газов будет происходить только разогрев вещества.

3. Высокая скорость реакции и ее способность к самораспространению и самоускорению. Самораспространение происходит за счет либо тепловой «волны», осуществляемой теплопроводностью (дефлаграционный взрыв), либо ударной волны сжатых газов (детонация).

Тепловая «волна» поддерживается выделяющимся при горении теплом, а ударная волна – самим сжатым газом. Автоускорение реакции и возникновение взрыва происходит в результате повышения температуры реагирующих веществ за счет теплоты реакции, либо увеличения активных радикалов, либо повышения давления в ударной волне.

На практике взрывы часто происходят при развитии процесса горения после воспламенения случайно разлитого жидкого горючего, при возгорании горючих газов и пылевых систем и при возгорании топлив в контейнерах [2].

Смесь воспламеняется от слабого источника энергии и на начальной стадии процесс распространяется в форме ламинарного пламени, при некоторых условиях конечной стадией такого процесса может быть не взрыв, а обычный пожар. Например, если в комнате разлить немного горючего и поджечь, то оно сгорит, не приведя к взрыву. В то же время возгорание большого количества пролитого горючего (со свободной поверхностью) может легко привести к разрушению здания.

В помещениях взрывоопасные концентрации газа возникают в первую очередь вблизи места утечки газа, а затем распространяются по всему помещению. При этом в зависимости от конфигурации здания возможны условия для детонационного горения. Если горючее находится вне стен здания, то в этом случае возможны два типа взрывных процессов [26]:

1. Если под действием внешнего источника зажигания или в результате самоускорения химической реакции происходит разрушение контейнера с легколетучим жидким горючим, а затем содержимое быстро испаряется, то возникающая при этом взрывная волна оказывается слабой, но осколки контейнера могут пролететь довольно большое расстояние. Это взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости *BLEVE* (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion).

2. Взрыв неограниченного облака горючей паровоздушной смеси, образующегося при испарении горючей жидкости с большой свободной поверхности. В этом случае жидкость может успеть испариться и перемешаться с воздухом с образованием большого объема реакционно-

способной смеси с подходящим соотношением компонентов ещё до момента воспламенения. При этом возможны три варианта развития ситуации:

- при отсутствии источника зажигания облако может без всяких последствий рассеяться;
- смесь может воспламениться и спокойно сгореть (наиболее часто реализуемый вариант);
- смесь может загореться с образованием разрушительной взрывной волны, т.е. происходит взрыв неограниченного облака горючей паровоздушной смеси.

Взрывоопасная среда – смесь воздуха с горючими газами, парами легковоспламеняющихся жидкостей и горючих жидкостей, горючими аэрозолями, пылями или волокнами, которая при определённой концентрации горючего способна взрываться при возникновении источника инициирования взрыва (источника зажигания).

К взрывоопасным средам относятся также вещества и материалы, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом [27]. Взрыв представляет собой турбулентное горение с высокой скоростью. При диффузионном горении твёрдых и жидких веществ (материалов) в условиях пожара взрыв не реализуется.

Однако при накоплении в замкнутом объёме продуктов термической и термоокислительной деструкции (водород, метан, оксид углерода и др.) взрыв может произойти (например, взрывы силосов и бункеров на элеваторах, комбикормовых заводах).

В человеческой деятельности, не связанной с преднамеренными взрывами, в условиях промышленного производства под взрывом следует понимать быстрое неуправляемое высвобождение энергии, которое вызывает ударную волну, движущуюся на некотором расстоянии от источника [28].

Взрыв может быть вызван детонацией конденсированного взрывчатого вещества, быстрым сгоранием воспламеняющегося облака газа, внезапным разрушением сосуда со сжатым газом или с перегретой жидкостью, смешиванием перегретых твердых веществ (расплава) с холодными жидкостями и т.д.

Из физики известно, что энергия и тепло, выделяемые в процессе реакции, находятся в прямой зависимости между собой, поэтому количество выделяемой при взрыве теплоты является весьма важной энергетической характеристикой взрывчатого вещества, определяющей его работоспособность. Чем больше выделено теплоты, тем выше температура нагрева продуктов взрыва, тем больше давление, следовательно, и воздействие продуктов взрыва на окружающую среду.

Теплота взрыва зависит от химического состава взрывчатого вещества. Она вычисляется теоретически по закону Гесса или определяется экспериментально в специальных толстостенных калориметрических бомбах по количеству тепла, поглощенного массой бомбы при взрыве внутри ее определенного количества взрывчатого вещества.

Калориметр Бертло позволяет определить энергию горения и взрыва, что имеет, прежде всего, теоретический интерес, позволяя установить предположительный механизм разложения взрывчатого вещества. Но и практическое значение этого определения достаточно велико, поскольку энергия взрыва в значительной мере определяет мощь взрывчатки [29]. Например, энергия взрыва одного килограмма нитроглицерина составляет 1560 килокалорий, а аммиачной селитры - всего 340 килокалорий. Отсюда и разница в разрушающей силе этих веществ. Энергия взрыва одного килограмма тротила составляет примерно 1000 килокалорий или 440 тысяч килограммометров. Другими словами, энергии, выделяющейся при взрыве одного килограмма тротила, теоретически хватит, чтобы подбросить груз весом почти в полтонны на высоту в целый километр!

Зная теплоту взрыва (q), легко вычислить и температуру взрыва, исходя из соотношения [8]:

$$T^o = \frac{q}{C_v} \quad (4.1)$$

где: C_v – теплоемкость продуктов взрыва с учетом ее изменения от температуры.

4.2 Классификация пожаров

Пожаром называют неконтролируемое горение, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью граждан, интересам общества и государства.

Пожар разлива – горение вещества разлива, испаряющегося с поверхности жидкости [29].

Пожар вспышка – режим сгорания паровоздушного облака, при котором скорость перемещения фронта пламени значительно меньше звуковой. Характеризуется пренебрежимо малым значением возникающего при превращении избыточного давления [14].

Огненный шар – крупномасштабное диффузионное горение, реализуемое при разрыве резервуара с перегретой горючей жидкостью или газом под давлением с воспламенением содержимого резервуара [30].

К пожарам следует также отнести факельное горение струй газа или жидкости. Горящий факел образуется при непрерывном истечении горючего вещества из небольшого отверстия в оболочке сосуда (резервуара).

4.3 Вопросы для самоконтроля

1. Для чего проводится классификация аварий?
2. Что понимается под взрывом?
3. Какими факторами определяются разрушительные действия взрыва?
4. Раскройте определение взрывная волна.
5. Что понимается под максимальным давлением взрыва?
6. Назовите основные условия протекания химической реакции в виде взрыва.
7. Что понимается под взрывом *BLEVE*?
8. Какая среда называется взрывоопасной?
9. Что называется пожаром вспышка?
10. Раскройте определение огненный шар.

5. Математические модели оценки возможных последствий аварий на взрывопожароопасных объектах

Прогноз последствий аварийных событий базируется на использовании математических моделей и методов математического моделирования [31].

При формировании математических моделей большое значение придается правильному выбору моделей источников. К подобным моделям относятся модели истечения вещества, растекания жидких веществ по поверхности, модели мгновенного вскипания и парообразования из пролива. Эти модели позволяют охарактеризовать источники, вызывающие образование облака паров опасных веществ [32].

Модели полей поражающих факторов включают модели концентрационных полей токсичных веществ, модели температурных полей, возникающих в случае пожаров и взрывов, модели распространения давления и осколков при взрывах [33].

При определении количественных показателей риска ОПО необходимо прежде всего определить количество опасного вещества, способного участвовать в аварии

5.1 Количественная оценка опасного вещества участвующего в аварии

Количество поступивших в окружающее пространство веществ, которые могут образовать взрывоопасные газопаровоздушные смеси или проливы горючих сжиженных газов, легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, определяется, исходя из следующих предпосылок [34]:

а) происходит расчетная авария одного из резервуаров (аппаратов) или трубопроводов;

б) все содержимое резервуара (трубопроводов) или часть продукта (при соответствующем обосновании) поступает в окружающее пространство. При этом в случае наличия на объекте нескольких резервуаров (с различными объемами) расчет следует проводить для вариантов с разгерметизацией каждого единичного резервуара;

в) при разгерметизации резервуара происходит одновременно утечка веществ из трубопроводов, питающих резервуар по прямому и обратному потоку в течение времени, необходимого для отключения трубопроводов. Расчетное время отключения трубопроводов определяется в каждом

конкретном случае, исходя из реальной обстановки, и должно быть минимальным с учетом паспортных данных на запорные устройства и их надежности, характера технологического процесса и вида расчетной аварии. Под «временем отключения» следует понимать промежуток времени от начала возможного поступления горючего вещества из трубопровода (перфорация, разрыв, изменение номинального давления и т.п.) до полного прекращения поступления жидкости в окружающее пространство.

г) в качестве расчетной температуры при пожароопасной ситуации с наземным расположением оборудования допускается принимать максимально возможную температуру воздуха в соответствующей климатической зоне, а при пожароопасной ситуации с подземным расположением оборудования - температуру грунта, условно равную максимальной среднемесячной температуре окружающего воздуха в наиболее теплое время года;

е) длительность испарения жидкости с поверхности пролива принимается равной времени ее полного испарения, но не более 3600 с. Для относительно небольших проливов топлива (до 20 кг) время испарения допускается принимать равным 900 с, поскольку столь небольшие проливы могут быть достаточно эффективно удалены обслуживающим персоналом.

При проведении расчетов допускается использование справочных данных, опубликованных головными научно-исследовательскими организациями в области пожарной безопасности или выданных Государственной службой стандартных справочных данных. Допускается использование показателей пожаровзрывоопасности для смесей веществ и материалов по наиболее опасному компоненту [35].

Ниже приводятся основные расчетные формулы для определения масс горючих веществ, поступающих в открытое или замкнутое пространство в результате пожароопасных ситуаций.

5.2 Разгерметизация надземного резервуара

При мгновенной разгерметизации резервуара хранения масса вещества m в облаке равняется полной массе СУГ, находящихся в резервуаре.

При длительном истечении СУГ из резервуара масса вещества в облаке m определяется по формуле [36]:

$$m_{\text{ист}} = 40 \cdot S_{\text{отв}} \cdot (P_p \cdot \rho_r)^{1/2} \quad (5.1)$$

где $S_{\text{отв}}$ – площадь сечения отверстия, м²;

P_p – давление в резервуаре, Па;

ρ_r – плотность газа, кг/м³.

При истечении сжатого газа из трубы масса вещества в облаке определяется по формуле [36]:

$$m_{\text{ист}} = 66 \cdot S_{\text{тр}} \cdot (P_p \cdot \rho_r)^{1/2} \quad (5.2)$$

где $S_{\text{тр}}$ – площадь сечения трубы, м²;

Плотность газа определяется из соотношения [36]:

$$\rho_r = \frac{M_0 \cdot P_p}{R \cdot T} \quad (5.3)$$

где M_0 – молярная масса газа, кг/кмоль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К).

Масса ЛВЖ и ГЖ, поступившей в окружающее пространство при разгерметизации резервуара определяется по формуле [36]:

$$m_a = \alpha \cdot \rho_L \cdot V_R \quad (5.4)$$

где m_a – масса жидкости, кг;

α – степень заполнения емкости, %;

ρ_L – плотность жидкости, кг/м³;

V_R – объем жидкости в резервуаре, м³.

Количество однокомпонентной жидкости, мгновенно вскипающей при разгерметизации оборудования, вычисляется по формуле [36]:

$$m_{\text{мгн}} = m_{\text{ж}} \left(1 - \exp \left(- \frac{c_p \cdot (T - T_k)}{\Delta H_{\text{кип}}} \right) \right) \quad (5.5)$$

где $m_{\text{ж}}$ – масса перегретой жидкости, поступившей в окружающее пространство, кг;

T – температура жидкости в оборудовании;

T_k – температура кипения жидкости при атмосферном давлении;

c_p – осредненная в соответствующем диапазоне температур удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К).

Количество вещества, содержащееся в оборудовании в виде парогазовой смеси определяется по формуле [36]:

$$m_{\text{св}} = (1 - \alpha) \cdot \frac{M}{R} \cdot \frac{P \cdot V}{273 + t} \quad (5.6)$$

где M – молекулярная масса газа, кг/кмоль;

R – универсальная газовая постоянная, равна 8310 Дж/(кг·кмоль);

P – давление в оборудовании, Па;

t – температура в оборудовании, °С;

V – объем оборудования.

Если температура кипения жидкости ниже температуры окружающей среды, то при ее разливе за счет теплоотдачи от твердой поверхности происходит интенсивное парообразование этой жидкости. Масса образующихся при этом паров может определяться по формуле [36]:

$$\dot{m} = 2 \frac{T_0 - T_k}{\Delta H_{\text{кип}}} \cdot \frac{\varepsilon}{\sqrt{\pi}} \cdot F_{\text{п}} \cdot \sqrt{\tau} \quad (5.7)$$

где T_0 – температура твердой поверхности (окружающей среды);

$\Delta H_{\text{кип}}$ – удельная теплота испарения сжиженного газа при температуре T_k , Дж/кг;

$F_{\text{п}}$ – площадь подстилающей поверхности, м².

$$\varepsilon = \sqrt{\lambda_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{п}} \cdot C_{p\text{п}}} \quad (5.8)$$

$\lambda_{\text{п}}, \rho_{\text{п}}, C_{p\text{п}}$ – коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость материала твердой поверхности соответственно;

τ – время контакта жидкости с твердой поверхностью, принимаемое в расчет, с.

Интенсивность испарения с поверхности аварийного разлива, обусловленного теплопритоком от окружающей среды и диффузионными процессами, определяется по эмпирическому выражению [36]:

$$W = 10^{-6} \cdot \eta \sqrt{M} \cdot P_{\text{н}} \quad (5.9)$$

где η – коэффициент, принимаемый в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения. При проливе жидкости вне помещения допускается принимать $\eta = 1$;

P_H – давление насыщенного пара при расчетной температуре жидкости, кПа;
 M – молярная масса паров жидкости, кг/моль.

Давление насыщенных паров P_H для однокомпонентных жидкостей определяется по формуле [36]:

$$P_H = P_0 \cdot \exp \left(\frac{\Delta H_{\text{кип}} \cdot M}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (5.10)$$

где P_0 – атмосферное давление, Па;

T_k – температура кипения жидкости при атмосферном давлении, К;

T – абсолютная температура жидкой фазы, К.

Длительность испарения жидкости принимается равной времени ее полного испарения, но не более 3600 с. При определении количества опасного вещества, участвующего в токсическом поражении, длительность испарения принимается равной времени экспозиции (1800 с).

Масса испарившейся жидкости по зеркалу испарения определяется по формуле [36]:

$$\dot{m} = W \cdot F_{\text{ж}} \cdot \tau_H \quad (5.11)$$

где $F_{\text{ж}}$ – площадь поверхности зеркала испарения жидкости, м²;

τ_H – время испарения жидкости, с.

Масса жидкости, поступившей самотеком при полном разрушении трубопровода, выходящего из резервуара, определяется по формуле [36]:

$$m_a = G_L \cdot \tau + \frac{\pi}{4} \cdot d_P^2 \cdot (\sum_{i=1}^n L_i) \cdot \rho_L \quad (5.12)$$

$$G_L = \mu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_P^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_L \cdot \Delta P_R} \quad (5.13)$$

$$\Delta P_R = h_L \cdot \rho_L \cdot g \quad (5.14)$$

где G_L – начальный расход жидкости, истекающей из резервуара через разгерметизированный трубопровод, кг/с;

μ – коэффициент истечения;

τ – расчетное время отключения трубопроводов, связанных с местом разгерметизации, с;

d_p - диаметр трубопроводов, м (в случае различных диаметров трубопроводов, связанных с местом разгерметизации, объем выходящего топлива рассчитывается для каждого трубопровода в отдельности);

L_i - длина i -го участка трубопровода от запорного устройства до места разгерметизации, м;

n - число участков трубопроводов, связанных с местом разгерметизации;

ΔP_R - напор столба жидкости в резервуаре, Па;

h_L - высота столба жидкости (от верхнего уровня жидкости в резервуаре до уровня места разгерметизации), м;

g - ускорение свободного падения, м/с^2 ($g = 9,81$).

При разливе жидкости на открытых пространствах площадь испарения принимается равной площади, ограниченной обвалованием. При проливе на неограниченную поверхность площадь пролива $F_{\text{ж}}$ (м^2) жидкости определяется по формуле [36]:

$$F_{\text{ж}} = f_p \cdot V_{\text{ж}} \quad (5.15)$$

где f_p – коэффициент разлития, м^{-1} (при отсутствии данных допускается принимать равным 20 м^{-1} при проливе на грунтовое покрытие, 150 м^{-1} при проливе на бетонное или асфальтовое покрытие);

$V_{\text{ж}}$ – объем жидкости, поступившей в окружающее пространство при разгерметизации резервуара, м^3 .

Количество пара, участвующего в аварийной ситуации, равно [36]:

$$m_{\text{п}} = m_{\text{мгн}} + m_{\text{св}} + \dot{m} + \ddot{m} \quad (5.16)$$

При выбросе стабильной жидкости (температура которой в аппарате меньше температуры кипения при атмосферном давлении) величина m равна [36]:

$$m = m_{\text{св}} + \dot{m} \quad (5.17)$$

5.3 Масса паров ЛВЖ, выходящих через дыхательную арматуру

В случае наполнения резервуара массу паров вычисляют по формуле [36]:

$$m_V = \rho_V \cdot V_R \cdot \frac{P_S}{P_0} \quad (5.18)$$

где m_V - масса выходящих паров ЛВЖ, кг;

ρ_V – плотность паров ЛВЖ, кг/м³/ Определяемая по формуле [36]:

$$\rho_V = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_0)} \quad (5.19)$$

P_S - давление насыщенных паров топлива при расчетной температуре, кПа, определяемое по справочным данным;

P_0 - атмосферное давление, кПа (допускается принимать равным 101,2);

V_R - геометрический объем резервуара, м³;

M - молярная масса топлива, кг/кмоль;

V_0 – мольный объем, равный 22,413 м³/кмоль;

t_0 - расчетная температура, °С.

5.4 Масса паров ЛВЖ при испарении со свободной поверхности в резервуаре

Массу паров ЛВЖ при испарении со свободной поверхности в резервуаре вычисляют по формуле [36]:

$$m_V = G_V \cdot \tau_E \quad (5.20)$$

где G_V - расход паров ЛВЖ, кг/с, определяемый соотношением [36]:

$$G_V = F_R \cdot W \quad (5.21)$$

где τ_E - время поступления паров из резервуара, с;

F_R - максимальная площадь поверхности испарения ЛВЖ в резервуаре, м²;

W - интенсивность испарения ЛВЖ, кг/(м²·с).

5.5 Максимальные размеры взрывоопасных зон

Радиус ($R_{\text{НКПР}}$, м) и высота ($Z_{\text{НКПР}}$, м) зоны, ограничивающие область концентраций, превышающих нижний концентрационный предел

распространения пламени (НКПР), при неподвижной воздушной среде рассчитывают по формулам [36]:

- для горючих газов (ГГ):

$$R_{\text{НКПР}} = 7,8 \cdot \left(\frac{m_{\text{Г}}}{\rho_{\text{Г}} \cdot C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,33} \quad (5.22)$$

$$Z_{\text{НКПР}} = 0,26 \cdot \left(\frac{m_{\text{Г}}}{\rho_{\text{Г}} \cdot C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,33} \quad (5.23)$$

где $m_{\text{Г}}$ – масса ГГ, поступившего в открытое пространство при пожароопасной ситуации, кг;

$\rho_{\text{Г}}$ – плотность ГГ при расчетной температуре и атмосферном давлении, кг/м³;

$C_{\text{НКПР}}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени ГГ, % об.

- для паров ЛВЖ:

$$R_{\text{НКПР}} = 3,2 \cdot \sqrt{K} \cdot \left(\frac{P_{\text{Н}}}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{m_{\text{П}}}{\rho_{\text{П}} \cdot P_{\text{Н}}} \right)^{0,33} \quad (5.24)$$

$$R_{\text{НКПР}} = 0,12 \cdot \sqrt{K} \cdot \left(\frac{P_{\text{Н}}}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{m_{\text{П}}}{\rho_{\text{П}} \cdot P_{\text{Н}}} \right)^{0,33} \quad (5.25)$$

где $m_{\text{П}}$ – масса паров ЛВЖ, поступивших в открытое пространство за время полного испарения, но не более 3600 с, кг;

$\rho_{\text{П}}$ – плотность паров при расчетной температуре, кПа;

$P_{\text{Н}}$ – давление насыщенных паров при расчетной температуре, кПа;

$K = T/3600$;

T – продолжительность поступления паров в открытое пространство, с;

$C_{\text{НКПРР}}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени паров, % об.

За начало отсчета горизонтального размера зоны принимают геометрический центр пролива, а в случае, если $R_{\text{НКПР}}$ меньше габаритных размеров пролива, - внешние габаритные размеры пролива.

При необходимости может быть учтено влияние различных метеорологических условий на размеры взрывоопасных зон.

5.6 Определение параметров волны давления при сгорании облака топливно-воздушной смеси

Методика количественной оценки параметров воздушных волн сжатия при сгорании топливно-воздушных смесей (ТВС) распространяется на случаи выброса топлива в атмосферу из наружных установок.

Основными структурными элементами алгоритма расчетов являются [3]:

- определение ожидаемого режима сгорания облака ТВС;
- расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных волн для различных режимов;
- определение дополнительных характеристик взрывной нагрузки;
- оценка поражающего воздействия.

Исходными данными для расчета параметров волн сжатия при сгорании облака ТВС являются [36]:

- вид топлива, содержащегося в облаке;
- агрегатное состояние смеси (газовая или гетерогенная);
- концентрация горючего в смеси (C_r);
- стехиометрическая концентрация горючего с воздухом ($C_{ст}$);
- масса топлива, содержащегося в облаке (m_T);
- удельная теплота сгорания топлива ($q_{уд}$);
- скорость звука в воздухе C_0 (обычно принимается равной 340 м/с);
- информация о степени загроможденности окружающего пространства;
- эффективный энергозапас горючей смеси (E), вычисляемый по соотношению [36]:

$$E = \begin{cases} m_T \cdot q_{уд}, & C_r \leq C_{ст} \\ m_T \cdot q_{уд} \frac{C_{ст}}{C_r}, & C_r > C_{ст} \end{cases} \quad (5.26)$$

При расчете параметров сгорания облака, расположенного на поверхности земли, величина эффективного энергозапаса удваивается. Для оценки объема газовой смеси можно воспользоваться соотношением [36]:

$$V = \frac{m_T}{C_{ст}} \quad (5.27)$$

Стехиометрическая концентрация горючего вещества в смеси определяется из справочных данных или рассчитывается по выражению [36]:

$$C_{\text{ст}} = \frac{100}{1+4,84 \cdot \gamma} \quad (5.28)$$

где $C_{\text{ст}}$ – стехиометрическая концентрация горючих газов (ГГ) или паров легко воспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) и горючих жидкостей (ГЖ);

γ – стехиометрический коэффициент кислорода в реакции горения, определяемая по формуле [36]:

$$\gamma = n_{\text{C}} + \frac{n_{\text{H}} - n_{\text{X}}}{4} - \frac{n_{\text{O}}}{2} \quad (5.29)$$

где n_{C} , n_{H} , n_{X} , n_{O} – число атомов C , H , O и галоидов в молекуле горючего.

Перерасчет из объемных концентраций в весовые производится по выражению [36]:

$$C_{\text{Г}} = 0,12 \cdot 10^{-3} \cdot C_{\text{a}} \frac{M \cdot P}{T} \quad (5.30)$$

где $C_{\text{Г}}$ – числовое значение концентрации в г/м^3 ;

C_{a} – числовое значение концентрации, % об.;

M – молекулярная масса газа, г/моль ;

P – общее давление газов смеси, Па ;

T – температура, К .

В случае если определение концентрации горючего вещества в смеси затруднено, в качестве $C_{\text{Г}}$ принимается концентрация, соответствующая нижнему концентрационному пределу воспламенения горючего газа. Теплота сгорания горючего газа $q_{\text{Г}}$ в смеси берется из справочных данных или оценивается по формуле [36]:

$$q_{\text{Г}} = 44 \cdot \beta \quad (5.31)$$

где β – корректировочный параметр. Для условно выделенных классов опасных веществ величины параметра β представлены в таблице 5.1.

Для многокомпонентной газовой смеси величина $q_{\text{Г}}$ определяется по следующему выражению (содержание компонентов проставляется в % об.) [35]:

$$q_{\text{Г}} = \left(\begin{array}{l} 25,79H_2 + 85,55CH_4 + 141,07C_2H_2 + 152,26C_2H_6 \\ + 205,41C_3H_6 + 217,95C_3H_8 + 271,11C_4H_8 \\ + 283,38C_4H_{10} + 384,9C_5H_{12} \end{array} \right) \cdot \frac{4,1868}{\rho} \quad (5.32)$$

где ρ – плотность газовой смеси, кг/м^3 .

Масса горючего вещества, содержащегося в облаке воздушной смеси, может задаваться в качестве исходного параметра или определяться исходя из условий развития аварий.

5.7 Определение ожидаемого режима взрывного превращения

Ожидаемый режим сгорания облака зависит от типа топлива и степени загроможденности окружающего пространства.

Классификация горючих смесей по степени чувствительности.

Вещества, способные к образованию горючих смесей с воздухом, по своей чувствительности к возбуждению взрывных процессов разделены на четыре класса [36].

Класс 1. Особо чувствительные вещества (размер детонационной ячейки менее 2 см). К этому классу относятся такие вещества как H_2 , C_2H_2 , $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$, R-NO_2 .

Класс 2. Чувствительные вещества (размер детонационной ячейки лежит в пределах от 2 до 10 см). Типичными представителями этого класса являются C_3H_8 , C_4H_{10} , C_2H_6 , C_3H_6 , C_4H_8 .

Класс 3. Средне чувствительные вещества (размер детонационной ячейки лежит в пределах от 10 до 40 см). Типичными представителями этого класса являются гексан (C_6H_{14}), октан, изооктан, бензин.

Класс 4. Слабо чувствительные вещества (размер детонационной ячейки больше 40 см). Типичными представителями этого класса являются метан, декан, бензол, метилхлорид.

Классификация наиболее распространенных в промышленном производстве горючих веществ приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Классификация горючих веществ по степени чувствительности

Класс 1	β	Класс 2	β	Класс 3	β	Класс 4	β
Ацетилен	1,1	Акрилонитрил	0,67	Ацетальдегид	0,56	Аммиак	0,42
Винилацетилен	1,03	Акролеин	0,62	Ацетон	0,65	Бензол	0,88
Водород	2,73	Бутан	1,04	Бензин	1,0	Декан	1,0
Гидразин	0,44	Бутилен	1,0	Винилацетат	0,51	Дизтопливо	1,0
Изопропилнитрат	0,41	Бутадиен	1,0	Винилхлорид	0,42	о-дихлорбензол	0,42
Метилацетилен	1,05	1,3-Пентадиен	1,0	Гексан	1,0	Додекан	1,0

Нитрометан	0,25	Пропан	1,05	Генераторный газ	0,38	Керосин	1,0
Окись пропилена	0,7	Пропилен	1,04	Изооктан	1,0	Метан	1,14
Окись этилена	0,62	Сероуглерод	0,32	Метиламин	0,7	Метилбензол	1,0
Этилнитрат	0,3	Этан	1,08	Метилацетат	0,53	Метилмеркаптан	0,53
		Этилен	1,07	Метилбутилкетон	0,79	Метилхлорид	0,12
		Широкая фракция углеводородов	1,0	Метилпропилкетон	0,76	Нафталин	0,91
		Диметиловый эфир	0,66	Метилэтилкетон	0,71	Окись углерода	0,23
		Дивиниловый эфир	0,77	Октан	1,0	Фенол	0,92
		Метилбутиловый эфир	-	Пиридин	0,77	Хлорбензол	0,52
		Диэтиловый эфир	0,77	Сероводород	0,34	Этиленбензол	0,90
		Диизопропиловый эфир	0,82	Метиловый спирт	0,52	Дихлорэтан	0,25
				Этиловый спирт	0,62	Трихлорэтан	0,14
				Пропиловый спирт	0,69		
				Амиловый спирт	-		
				Изобутиловый спирт	0,79		
				Изопропиловый спирт	0,69		
				Циклогексан	1,0		
				Этилформиат	0,46		
				Этилхлорид	0,43		
				СПГ	1,0		
				Кумол	0,84		
				Печной газ	0,09		
				Циклопропан	1,0		
				Этиламин	0,8		

В случай, если вещество не внесено в классификацию, его следует классифицировать по аналогии с имеющимися в списке веществами, а при отсутствии информации о свойствах данного вещества, его следует отнести к классу 1, т.е. рассматривать наиболее опасный случай.

В связи с тем, что характер загроможденности окружающего пространства в значительной степени определяет скорость распространения пламени при сгорании облака газопаровоздушной смеси и, следовательно, параметры ударной волны и волны сжатия, характеристики

загроможденности окружающего пространства также разделены на четыре вида в соответствии со степенью их опасности (таблица 5.2).

Таблица 5.2 - Характеристики загроможденности окружающего пространства

Вид I	Наличие длинных труб, полостей, каверн, заполненных горючей смесью, при сгорании которой возможно ожидать формирование турбулентных струй продуктов сгорания с размером не менее трех размеров детонационной ячейки данной смеси. Если размер детонационной ячейки для данной смеси не известен, то минимальный характерный размер струй принимается равным 5 см для веществ класса 1, 20 см для веществ класса 2, 50 см для веществ класса 3 и 150 см для веществ класса 4.
Вид II	Сильно загроможденное пространство: наличие полузамкнутых объемов высокая плотность размещения технологического оборудования, лес, большое количество повторяющихся препятствий
Вид III	Средне загроможденное пространство: отдельно стоящие технологические установки, резервуарный парк
Вид IV	Слабо загромождение и свободное пространство

5.8 Классификация режима сгорания облака

Для оценки воздействия сгорания облака возможные режимы сгорания топливовоздушной смеси разбиты на шесть классов по диапазонам скоростей их распространения, при этом пять из них приходится на процессы дефлаграционного горения воздушной смеси. Необходимо отметить, что характеристики процесса горения со скоростями фронта меньшими 500 м/с имеют существенные различия [36].

Класс 1. Детонация или горение со скоростью фронта пламени 500 м/с.

Класс 2. Дефлаграция, скорость фронта пламени 300 - 500 м/с.

Класс 3. Дефлаграция, скорость фронта пламени 200 - 300 м/с.

Класс 4. Дефлаграция, скорость фронта пламени 150 - 200 м/с.

Класс 5. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением [36]:

$$u = k_1 \cdot m_T^{1/6} \quad (5.33)$$

где k_1 – константа, составляющая 43;

m_T - масса топлива, содержащегося в облаке горючей смеси, кг.

Класс 6. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением [36]:

$$u = k_2 \cdot m_T^{1/6} \quad (5.34)$$

где k_2 – константа, составляющая 26.

Ожидаемый режим сгорания облака определяется с помощью таблицы 5.3, в зависимости от класса горючего и класса загроможденности окружающего пространства

Таблица 5.3 – Экспертная таблица для определения режима сгорания облака

Класс смеси	Класс окружающего пространства			
	I	II	III	IV
1	1	1	2	3
2	1	2	3	4
3	2	3	4	5
4	3	4	5	6

При определении максимальной скорости фронта пламени для режимов сгорания 2-4 классов дополнительно рассчитывается видимая скорость фронта пламени по соотношению (5.34). В том случае, если полученная величина больше максимальной скорости, соответствующей данному классу, она принимается за верхнюю границу диапазона ожидаемых скоростей сгорания газопаровоздушной смеси.

5.9 Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных волн

Эффективный энергозапас горючей смеси определяется по соотношению [36]:

$$E = m_T \cdot q \quad (5.35)$$

где m_T – масса горючего вещества, содержащегося в облаке, с концентрацией между нижним и верхним концентрационным пределом распространения пламени, кг;

q – удельная теплота сгорания парогазовой среды, Дж/кг.

Допускается величину m_T принимать равной массе горючего вещества, содержащегося в облаке, с учетом коэффициента Z участия горючего вещества во взрыве. При отсутствии данных коэффициента Z может быть принят равным 0,1.

При расчете параметров взрыва облака, лежащего на поверхности земли, величина эффективного энергозапаса удваивается.

После того, как определен вероятный режим сгорания, рассчитываются параметры воздушных волн сжатия (избыточное давление ΔP и импульс фазы сжатия I^+) в зависимости от расстояния от центра облака.

Для определения параметра воздушной волны давления (избыточное давление ΔP и импульс фазы сжатия I^+ в зависимости от расстояния от центра облака необходимо рассчитать соответствующее безразмерное расстояние по формуле [36]:

$$R_x = \frac{R_l}{(E/P_0)^{1/3}} \quad (5.36)$$

где R_l – фактическое расстояние от центра взрывоопасной смеси, м;

P_0 – атмосферное давление, Па;

E – эффективный энергозапас смеси, Дж.

В случае детонации газовой смеси расчет проводится по формулам [36]:

$$P_x = \exp(-1,124 - 1,66 \cdot (\ln(R_x) + 0,26 \cdot (\ln(R_x))^2) \quad (5.37)$$

$$I_x = \exp(-3,4217 - 0,898 \cdot (\ln(R_x) + 0,0096 \cdot (\ln(R_x))^2) \quad (5.38)$$

Данные зависимости справедливы для значений $0,2 < R_x < 24$. В случае $R_x < 0,2$ величина P_x принимается равной 18, а в выражение для I_x подставляется значение $R_x = 0,142$.

В случае детонации гетерогенной смеси расчет проводится по формулам [36]:

$$P_x = \frac{0,125}{R_x} + \frac{0,137}{R_x^2} + \frac{0,023}{R_x^3} \pm 10\% \quad (5.39)$$

$$I_x = \frac{0,022}{R_x} \pm 15\% \quad (5.40)$$

Данные зависимости справедливы для значений $R_x > 0,25$. В случае $R_x < 0,25$ величина P_x принимается равной 18, а в выражение для I_x подставляется значение $R_x = 0,134$.

В случае дефлаграционного режимов сгорания к параметрам, влияющим на величины избыточного давления и импульса положительной

фазы добавляются величины скорости видимого фронта пламени v и степень расширения продуктов сгорания σ . Для расчета параметров ударной волны при дефлаграции гетерогенных облаков величина эффективного энергозапаса смеси домножается на коэффициент $(\sigma - 1)/\sigma$.

Величины безразмерного давления P_x и импульс фазы сжатия I_x определяются по формулам (для паровоздушных смесей) [36]:

$$P_{x1} = \left(\frac{v^2}{c_o^2}\right) \cdot \left(\frac{\sigma-1}{\sigma}\right) \cdot \left(\frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2}\right) \quad (5.41)$$

$$v = k_1 \cdot m_r^{1/6} \quad (5.42)$$

где k_1 - константа, равная 43.

$$I_{x1} = W \cdot (1 - 0,4 \cdot W) \cdot \left(\frac{0,06}{R_x} + \frac{0,01}{R_x^2} - \frac{0,0025}{R_x^3}\right) \quad (5.43)$$

$$W = \frac{v}{c_o} \cdot \left(\frac{\sigma-1}{\sigma}\right) \quad (5.44)$$

где σ - степень расширения продуктов сгорания [36]:

- а) для газопаровоздушных смесей принимают $\sigma = 7$;
- б) для пылевоздушных смесей принимают $\sigma = 4$;
- v - видимая скорость фронта пламени, м/с.

Данные зависимости справедливы для значений $R_x > 0,34$, в противном случае вместо R_x в эти соотношения подставляется величина 0,34.

Далее вычисляются величины P_{x1} и I_{x1} , соответствуют режиму детонации и для случая детонации газовой смеси рассчитываются по соотношениям (5.41), (5.43), а для гетерогенной смеси по соотношениям (5.39), (5.40). Окончательные значения P_x и I_x , выбираются из условий [36]:

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}) \quad (5.45)$$

$$I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}) \quad (5.46)$$

После определения безразмерных величин давления и импульса фазы сжатия вычисляются соответствующие им размерные величины [36]:

$$\Delta P = P_0 \cdot P_x \quad (5.47)$$

$$I^+ = P_0^{2/3} \cdot I_x \cdot \frac{E^{1/3}}{C_0} \quad (5.48)$$

где C_0 – скорость звука в воздухе, м/с.

5.10 Расчет волны давления при взрыве резервуара с перегретой жидкостью или сжиженным газом

Избыточное давление ΔP и импульс I^+ в волне сжатия, образующиеся при взрыве резервуара с перегретой ЛВЖ, ГЖ или СУГ в очаге пожара, определяются по формулам [36]:

$$\Delta P = P_0 \left(0,8 \cdot \frac{m_{\text{пр}}^{1/3}}{r} + 3 \cdot \frac{m_{\text{пр}}^{2/3}}{r^2} + 5 \cdot \frac{m_{\text{пр}}}{r^3} \right) \quad (5.49)$$

$$I^+ = 123 \cdot \frac{m_{\text{пр}}^{2/3}}{r} \quad (5.50)$$

где $m_{\text{пр}}$ - приведенная масса, кг, рассчитываемая по формуле [36]:

$$m_{\text{пр}} = \frac{E_e}{H_0} \quad (5.51)$$

r – расстояние от центра резервуара, м;

$H_0 = 4,52 \cdot 10^6$ Дж/кг;

E_e - эффективная энергия взрыва, рассчитываемая по формуле [36]:

$$E_e = k \cdot C_p \cdot m \cdot (T - T_b) \quad (5.52)$$

k – доля энергии волны сжатия (допускается принимать равной 0,5);

C_p - удельная теплоемкость жидкости (допускается принимать равной 2000 Дж/(кг К);

m - масса ЛВЖ, ГЖ или СУГ, содержащаяся в резервуаре, кг;

T - температура жидкой фазы, К;

T_b - нормальная температура кипения, К.

При наличии в резервуаре предохранительного устройства (клапана или мембраны) величина T определяется по формуле [36]:

$$T = \frac{B}{A - \lg P_{\text{val}}} - C_A + 273,15 \quad (5.53)$$

где P_{val} - давление срабатывания предохранительного устройства;
 A , B , C_A - константы уравнения зависимости давления насыщенных паров топлива от температуры (константы Антуана), определяемые по справочной литературе.

Единицы измерения P_{val} (кПа, мм рт. ст., атм) должны соответствовать используемым константам Антуана.

Число осколков N , образующихся при разрыве сферического резервуара с СУГ, определяется путем округления величины N , найденной из соотношения [36]:

$$N = -3,77 + 0,0096 \cdot V \quad (5.54)$$

где V – объем резервуара, л.

Средняя масса одного осколка $m_{оск}$ определяется по формуле [36]:

$$m_{оск} = \frac{M_p}{N} \quad (5.55)$$

где M_p – масса оболочки резервуара, кг.

5.11 Определение дополнительных характеристик

Для расчета параметров падающей волны при детонации облака газовой смеси (давление, импульс и длительность фаз сжатия и разрежения) используются следующие соотношения:

Амплитуда избыточного давления на фронте проходящей волны избыточного давления (фаза сжатия), Па [36]:

$$P_{r+} = P_0 \cdot \exp(0,299 - 2,058 \ln \lambda + 0,26 (\ln \lambda)^2) \quad (5.56)$$

Амплитуда избыточного давления фазы разрежения, Па [36]:

$$P_{r-} = P_0 \cdot \exp(-1,46 - 1,402 \ln \lambda + 0,079 (\ln \lambda)^2) \quad (5.57)$$

Импульс фазы сжатия, Па·с [36]:

$$I_{r+} = E^{1/3} \cdot \exp(-0,843 - 0,932 \ln \lambda + 0,037 (\ln \lambda)^2) \quad (5.58)$$

Импульс фазы разрежения, Па·с [36]:

$$I_{r-} = E^{1/3} \cdot \exp(-0,873 - 1,25 \ln \lambda + 0,1327 (\ln \lambda)^2) \quad (5.59)$$

Длительность фазы сжатия, с [36]:

$$\tau_{r+} = 10^{-5} \cdot E^{1/3} \cdot \exp(-0,106 + 0,448 \ln \lambda - 0,026 (\ln \lambda)^2) \quad (5.60)$$

Длительность фазы разрежения, с [36]:

$$\tau_{r-} = 10^{-5} \cdot E^{1/3} \cdot \exp(1,299 + 0,412 \ln \lambda - 0,079 (\ln \lambda)^2) \quad (5.61)$$

Форма падающей волны с описанием фаз сжатия и разрежения с хорошей для практических целей точностью может быть описана соотношением [36]:

$$\Delta P_r(t, \lambda_{\text{пар}}) = P_{r+} \cdot \frac{\sin\left[\pi \cdot \frac{(t-\tau_{r+})}{\tau_{r-}}\right]}{\sin\left(-\pi \frac{\tau_{r+}}{\tau_{r-}}\right)} \cdot \exp(-K_r \cdot t / \tau_{r+}) \quad (5.62)$$

Декремент затухания в отраженной волне рассчитывается по соотношению [36]:

$$K_r = 0,889 - 0,356 \ln \lambda + 0,105 (\ln \lambda)^2 \quad (5.63)$$

Для расчета параметров отраженной волны при ее нормальном падении на преграду используются следующие соотношения:

Амплитуда отраженной волны давления [36]:

$$P_{r+} = P_0 \cdot \exp(1,264 - 2,056 \ln \lambda + 0,211 (\ln \lambda)^2) \quad (5.64)$$

Амплитуда отраженной волны разрежения [36]:

$$P_{r-} = P_0 \cdot \exp(-0,673 - 1,043 \ln \lambda + 0,252 (\ln \lambda)^2) \quad (5.65)$$

Импульс отраженной волны давления [36]:

$$I_{r+} = E^{1/3} \cdot \exp(-0,07 - 1,033 \ln \lambda + 0,045 (\ln \lambda)^2) \quad (5.66)$$

Импульс отраженной волны разрежения [36]:

$$I_{r-} = E^{1/3} \cdot \exp(-0,052 - 0,462 \ln \lambda + 0,27 (\ln \lambda)^2) \quad (5.67)$$

Длительность отраженной волны давления [36]:

$$\tau_{r+} = 10^{-5} \cdot E^{1/3} \cdot \exp(-1,109 + 0,983 \ln \lambda - 0,23 (\ln \lambda)^2) \quad (5.68)$$

Длительность отраженной волны разрежения [36]:

$$\tau_{r-} = 10^{-5} \cdot E^{1/3} \cdot \exp(1,265 + 0,857 \ln \lambda - 0,192 (\ln \lambda)^2) \quad (5.69)$$

Общее время действия отраженных волн на мишень [36]:

$$\tau_{r+} + \tau_{r-} = \exp(1,497 + 0,908 \ln \lambda - 0,404 (\ln \lambda)^2) \quad (5.70)$$

Форма отраженной волны с описанием фаз сжатия и разрежения с хорошей для практических целей точностью может быть описана соотношением [36]:

$$\Delta P_r(t, \lambda_{\text{пар}}) = P_{r+} \cdot \frac{\sin\left[\pi \cdot \frac{(t - \tau_{r+})}{\tau_{r-}}\right]}{\sin\left(-\pi \frac{\tau_{r+}}{\tau_{r-}}\right)} \cdot \exp(-K_r \cdot t / \tau_{r+}) \quad (5.71)$$

Декремент затухания в отраженной волне рассчитывается по соотношению [36]:

$$K_r = 0,978 - 0,554 \ln \lambda + 0,26 \ln(\lambda)^2 \quad (5.72)$$

Соотношения 5.56-5.70 справедливы при значениях λ до 51,6.

Между R_x и λ существует простая связь [36]:

$$\lambda = 2,15 \cdot R_x \quad (5.73)$$

5.12 Интенсивность теплового излучения

Расчет интенсивности теплового излучения q (кВт/м²) для пожара пролива ЛВЖ, ГЖ сжиженного природного газа (СПГ) или СУГ проводится по формуле [36]:

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau, \quad (5.74)$$

где E_f - среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, кВт/м²;

F_q - угловой коэффициент облученности;

τ - коэффициент пропускания атмосферы.

Значение E_f принимается на основе имеющихся экспериментальных данных или по таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени в зависимости от диаметра очага и удельная массовая скорость выгорания для некоторых жидких углеводородных топлив [37]

Топливо	E_f , кВт/м ² , при d, м					m' , кг/(м ² ·с)
	10	20	30	40	50	
СПГ (метан)	220	180	150	130	120	0,08
СУГ(пропан-бутан)	80	63	50	43	40	0,1
Бензин	60	47	35	28	25	0,06
Дизельное топливо	40	32	25	21	18	0,04
Нефть	25	19	15	12	10	0,04

Примечание – для диаметров очага менее 10 м или более 50 м следует принимать E_f такой же, как и для очагов диаметром 10 и 50 м соответственно

При отсутствии данных для нефти и нефтепродуктов допускается величину E_f (кВт/м²) определять по формуле [36]:

$$E_f = 140 \cdot e^{-0,12 \cdot d} + 20 \cdot (1 - e^{-0,12 \cdot d}) \quad (5.75)$$

где d – эффективный диаметр пролива, м.

Угловой коэффициент облученности рассчитывается по формуле [36]:

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}, \quad (5.76)$$

где F_V , F_H - факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок соответственно, определяемые для площадок, расположенных в 90^0 секторе в направлении наклона пламени, по следующим формулам [36]:

$$F_V = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{S_1} \cdot \arctg \left(\frac{h}{\sqrt{S_1^2}} \right) + \frac{h}{S_1} \left\{ \arctg \left(\sqrt{\frac{S_1-1}{S_1+1}} \right) - \frac{A}{\sqrt{A^2-1}} \cdot \arctg \left(\sqrt{\frac{(A+1) \cdot (S_1-1)}{(A-1) \cdot (S_1+1)}} \right) \right\} \right] \quad (5.77)$$

где $h = 2 \cdot H/d$ (H – высота пламени);

$S_1 = 2 \cdot r/d$, (r – расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта);

$A = (h^2 + S_1^2 + 1)/(2 \cdot S_1)$.

$$F_H = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{(B-1/S_1)}{\sqrt{B^2-1}} \cdot \arctg \left(\sqrt{\frac{(B+1) \cdot (S_1-1)}{(B-1) \cdot (S_1+1)}} \right) - \frac{(A-1/S_1)}{\sqrt{A^2-1}} \cdot \arctg \left(\sqrt{\frac{(A+1) \cdot (S_1-1)}{(A-1) \cdot (S_1+1)}} \right) \right] \quad (5.78)$$

где $B = (1 + S_1^2)/(2 \cdot S_1)$.

Эффективный диаметр пролива d , м, рассчитывается по формуле [36]:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi}} \quad (5.79)$$

F – площадь пролива, м^2 .

Высота пламени рассчитывается по формуле [36]:

$$H = 42 \cdot d \left(\frac{m}{\rho_B \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0,61} \quad (5.80)$$

где: d – эффективный диаметр пролива, м;

m – удельная массовая скорость выгорания топлива, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

ρ_B – плотность окружающего воздуха, равная $1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$;

g – ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м}/\text{с}^2$.

Коэффициент пропускания атмосферы определяют по формуле [36]:

$$\tau = \exp[-0,7 \cdot 10^{-4} \cdot (r - 0,5 \cdot d)] \quad (5.81)$$

Время выгорания:

$$t_B = \frac{m}{F \cdot \nu} \quad (5.82)$$

где m – масса вещества, разлившегося в результате аварии, кг;

F – площадь пролива, м²;

v – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м²·с).

Глубина зоны опасного теплового излучения определяется по формуле [36]:

$$x = 33 \cdot \ln \left(1,25 \cdot \frac{Q_o}{q} \right) \quad (5.83)$$

где Q_o – тепловой поток на поверхности факела пламени, кВт/м²;

q – тепловой поток, опасный для зданий, сооружений и людей, находящихся вне здания и укрытий, кВт/м².

Величина индекса дозы теплового излучения определяется из соотношения:

$$I = 60 \cdot q^{4/3} \quad (5.84)$$

5.13 Огненный шар

Расчет интенсивности теплового излучения $q_{\text{ош}}$ (кВт/м²) для «огненного шара» проводится по формуле [38]:

$$q_{\text{ош}} = E_f \cdot F_q \cdot \tau, \quad (5.85)$$

Величина E_f среднеповерхностной интенсивности теплового излучения пламени принимается на основе имеющихся экспериментальных данных или по таблице 5.6. Также допускается принимать $E_f = 350$ кВт/м².

Угловой коэффициент облученности рассчитывается по формуле [38]:

$$F_q = \frac{D_s^2}{4 \cdot (H^2 + r^2)}, \quad (5.86)$$

где H – высота центра огненного шара, м;

D_s – эффективный диаметр огненного шара, м;

r – расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром огненного шара, м.

Эффективный диаметр «огненного шара» D_s определяется по формуле [838]:

$$D_s = 6,48 \cdot m_n^{0,325} \quad (5.87)$$

где m_n – масса вещества, поступившего в окружающее пространство, кг.

Величину H допускается принимать равной D_s .

Коэффициент пропускания атмосферы τ рассчитываем по формуле [38]:

$$\tau = \exp \left[-7 \cdot 10^{-4} \left(\sqrt{r^2 + H^2} - \frac{D_s}{2} \right) \right] \quad (5.88)$$

Время существования огненного шара определяется по формуле [38]:

$$t_s = 0,852 \cdot m_n^{0,26} \quad (5.89)$$

5.14 Определение зон поражения при факельном горении

При факельном горении определяется его длина по формуле [36]:

$$L_F = K \cdot G^{0,4} \quad (5.90)$$

где G - расход продукта, кг/с;

K - эмпирический коэффициент, который при истечении сжатых газов принимается равным 12,5, при истечении паровой фазы СУГ или СПГ – 13,5 при истечении жидкой фазы СУГ и СПГ, ЛВЖ и ГЖ под давлением 15.

Длина факела при струйном истечении горючих жидкостей определяется дальностью (высотой) струи жидкости

Ширина факела при струйном горении определяется по формуле [36]:

$$D_F = L_F \cdot 0,15 \quad (5.91)$$

Расчет интенсивности теплового излучения факельного горения проводится по формуле [36]:

$$q_{\text{фг}} = E_f \cdot F_q \cdot \tau, \quad (5.92)$$

где E_f - среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, кВт/м²;

F_q - угловой коэффициент облученности;

τ - коэффициент пропускания атмосферы.

Угловой коэффициент облученности рассчитывается по формуле [36]:

$$F_q = \frac{D_F^2}{4 \cdot (L_F^2 + r^2)}, \quad (5.93)$$

Коэффициент пропускания атмосферы τ рассчитываем по формуле [36]:

$$\tau = \exp \left[-7 \cdot 10^{-4} \left(\sqrt{r^2 + L_F^2} - \frac{D_F}{2} \right) \right] \quad (5.94)$$

При проведении оценки опасности горящего факела при струйном истечении сжатых горючих газов, паровой и жидкой фазы СУГ, СПГ, ЛВЖ и ГЖ под давлением допускается принимать следующее [36]:

- зона непосредственного контакта пламени с окружающими объектами определяется размерами факела;
- длина факела L_F не зависит от направления истечения продукта и скорости ветра;
- наибольшую опасность представляют горизонтальные факелы, условную вероятность реализации которых следует принимать равной 0,67;
- поражение человека в горизонтальном факеле происходит в 30° секторе с радиусом, равным длине факела;
- воздействие горизонтального факела на соседнее оборудование, приводящее к его разрушению (каскадному развитию аварии), происходит в 30° секторе, ограниченном радиусом, равным L_F ;
- за пределами указанного сектора на расстояниях от L_F до $1,5 L_F$ тепловое излучение от горизонтального факела составляет 10 кВт/м^2 ;
- при истечении жидкой фазы СУГ или СПГ из отверстия с эквивалентным диаметром до 100 мм при мгновенном воспламенении происходит полное сгорание истекающего продукта в факеле без образования пожара пролива;
- область возможного воздействия пожара-вспышки при струйном истечении совпадает с областью воздействия факела (30° секторе, ограниченном радиусом, равным L_F);
- при мгновенном воспламенении струи газа возможность формирования давления допускается не учитывать.

5.15 Оценка поражающего воздействия аварий

Для определения условной вероятности реализации механизма воздействия рекомендуется использовать метод построения деревьев событий. Условная вероятность летального исхода $P(L)_j$ учитывает то, что одна и та же мера негативного воздействия может вызвать последствия различной тяжести у разных людей, что может быть связано с различием в возрасте, поле, здоровье человека, индивидуальной чувствительности к ядам (в случае токсического воздействия) и др. Иными словами, не только возникновение аварии, но и «эффект поражения» в рамках концепции анализа риска носит вероятностный характер.

Поскольку одна и та же мера воздействия может вызвать последствия различной степени тяжести, величина вероятности поражения выражается функцией Гаусса (функции ошибок) через пробит-функцию [36]:

$$P(L) = f|\text{Pr}(D)| \quad (5.96)$$

Величина Pr в общем случае описывается выражением [36]:

$$\text{Pr} = a + b \cdot \ln S \quad (5.97)$$

где a и b – константы, зависящие от вида и параметров негативного воздействия, S – доза негативного воздействия (для оценки воздействия теплового излучения – функция плотности интенсивности теплового излучения и времени воздействия; для барического воздействия – избыточное давление на фронте ударной волны и импульс фазы сжатия; для токсического воздействия – концентрация токсического вещества и время воздействия).

Соотношения между величиной Pr и условной вероятностью поражения человека приведено в таблице 5.6.

Таблица 5.6 - Соотношения между величиной Pr и условной вероятностью поражения человека [36]

Условная вероятность поражения, %	Величина пробит-функции Pr									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45

30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Разрушающее действие ударной волны характеризуют избыточное давление в ее фронте (передней границе) и импульс взрыва.

Избыточное давление – это разность между максимальным давлением во фронте ударной волны и нормальным атмосферным давлением перед этим фронтом. Так, избыточное давление в пределах детонирующего облака смеси этиленоксида с воздухом составляет 2 МПа. Большинство же промышленных зданий разрушается от значительно меньших давлений: 25-30 кПа при внешних и 20-25 кПа при внутренних взрывах [5]. Величина избыточного давления на фронте ударной волны $\Delta P = 5$ кПа принимается безопасной для человека.

В таблице 5.7 приведены типичные значения избыточного давления, соответствующие различным степеням повреждения зданий.

Таблица 5.7 - Критерии поражения зданий и сооружений [36]

Объект	Степень разрушения в зависимости от ΔP , кПа			
	полное	сильное	среднее	слабое
Здания жилые:				
кирпичные многоэтажные	30...40	20...30	10...20	8...10
кирпичные малоэтажные	35...45	25...35	15...25	8...15
деревянные	20...30	12...20	8...12	6...8
Здания промышленные:				
с тяжелым металлическим или железобетонным каркасом	60...100	50...60	40...50	20...40
с легким металлическим каркасом или бескаркасные	60...80	40...50	30...50	20...30
Промышленные объекты:				
ТЭС	25...40	20...25	15...20	10...15
котельные	35...45	25...35	15...25	10...15
трубопроводы наземные	130	50	20	-
трубопроводы на эстакаде	40...50	30...40	20...30	-
трансформаторные подстанции	100	40-60	20...40	10...20
ЛЭП	120...200	80...120	50...70	20...40

водонапорные башни	70	40...60	20...40	10...20
Резервуары:				
стальные наземные	90	80	55	35
газгольдеры и емкости ГСМ и химических веществ	40	35	25	20
частично заглубленные для нефтепродуктов	100	75	40	20
подземные	200	150	75	40
Металлические и железобетонные мосты	250.300	200.300	150.200	100.150
Железнодорожные пути	400	250	175	125
Тепловозы массой до 50 т	90	70	50	40
Цистерны	80	70	50	30
Вагоны цельнометаллические	150	90	60	30
Вагоны товарные деревянные	40	35	30	
Автомашины грузовые	70	50	35	10

Степень и характер поражения, производимых ударной волной, зависят от мощности взрыва, расстояния от центра взрыва до объекта, характера и прочности сооружений и рельефа местности.

Уровень поражения человека избыточным давлением представлен в таблице 5.8.

Таблица 5.8 - Критерии поражения людей [36]

ΔP , кПа	Результат воздействия
< 10	Для человека безопасно
20..40	Легкое поражение (ушибы, вывихи, временная потеря слуха, общая контузия). Условно – поражение 1-й степени.
40..60	Среднее поражение (контузия головного мозга, повреждение органов слуха, разрыв барабанных перепонки). Общее сотрясение организма, болезненный удар по голове, кровоизлияние в легкие, межмышечное кровоизлияние, гиперемия мозга, иногда перелом ребер (поражение 2-й степени).
60..100	Сильное поражение (давление, трудно переносимое организмом, вызывающее состояние сильной контузии, потеря сознания, повреждения внутренних органов (поражение третьей степени).
100	Порог смертельного поражения
250..300	Летальный исход в 50% случаев
>300	Безусловное смертельное поражение

При взрывах топливно-воздушных смесей существенную роль играет длительность действия ударной волны, и связанный с ней параметр импульс взрыва. Для оценки предполагаемого уровня разрушений широко применяется графический метод оценки разрушающей способности ударных волн с помощью диаграмм влияния давления и импульса на уровень и характер разрушения.

Для воздействия волны давления на человека, находящегося вне здания, формулы для пробит-функции имеют вид [36]:

$$Pr = 5,0 - 5,74 \cdot \ln S \quad (5.98)$$

$$S = \frac{4,2}{\bar{P}} + \frac{1,3}{\bar{t}} \quad (5.99)$$

$$\bar{P} = \frac{\Delta P}{P_o} \quad (5.100)$$

$$\bar{t} = \frac{I^+}{P_o^{1/2} \cdot m^{1/3}} \quad (5.101)$$

где m - масса тела человека (допускается принимать равной 70 кг), кг;

ΔP - избыточное давление волны давления, Па;

I^+ - импульс волны давления, Па·с;

P_o - атмосферное давление, Па.

Пробит-функции для разрушения зданий имеют вид [36]:

- для тяжелых разрушений:

$$Pr = 5,0 - 0,26 \cdot \ln V_1 \quad (5.102)$$

$$V_1 = \left(\frac{17500}{\Delta P} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I^+} \right)^{9,3} \quad (5.103)$$

- для полного разрушения [36]:

$$Pr = 5,0 - 0,22 \cdot \ln V_2 \quad (5.104)$$

$$V_2 = \left(\frac{4000}{\Delta P} \right)^{7,4} + \left(\frac{460}{I^+} \right)^{11,3} \quad (5.105)$$

При оценке условной вероятности поражения человека, находящегося в здании или сооружении следует использовать следующую пробит-функцию [36]:

$$Pr = 5 - 5,74 \cdot \ln \left(\frac{4,2}{1 + \frac{\Delta P}{P_o}} + \frac{1,3 + P_o^{0,5} \cdot m^{0,33}}{I^+} \right) \quad (5.106)$$

где m – масса тела человека, кг.

Вероятность длительной потери управляемости у людей (состояние нокдауна), попавших в зону действия избыточного давления может быть определена по формуле [36]:

$$Pr = 5,0 - 5,74 \cdot \ln V_3 \quad (5.107)$$

$$V_3 = \frac{4,2}{\bar{p}} + \frac{1,3}{\bar{i}} \quad (5.108)$$

где $\bar{p}$ и $\bar{i}$ безразмерное давление и безразмерный импульс задаются выражениями [36]:

$$\bar{p} = 1 + \frac{\Delta P}{P_0} \quad (5.109)$$

$$\bar{i} = \frac{I}{P_0^{1/2} \cdot m^{1/3}} \quad (5.110)$$

Вероятность разрыва барабанных перепонок у людей от уровня перепада давления в воздушной волне определяется [36]:

$$Pr = -12,6 + 1,524 \cdot \ln \Delta P \quad (5.111)$$

Вероятность отброса людей волной давления определяется по формуле [36]:

$$Pr = 5,0 - 2,44 \cdot \ln V_4 \quad (5.112)$$

$$V_4 = \frac{7,38 \cdot 10^3}{\Delta P} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{\Delta P \cdot I} \quad (5.113)$$

Связь функции Pr с вероятностью той или иной степени поражения находится по таблице 3.2.

Для поражения человека тепловым излучением величина пробит-функции описывается формулой [36]:

$$Pr = -12,8 + 2,56 \cdot \ln \left(t \cdot q^{\frac{4}{3}} \right), \quad (5.114)$$

где t - эффективное время экспозиции, с;

q - интенсивность теплового излучения, кВт/м².

Величина эффективного времени экспозиции t может быть определяется по формулам [36]:

- для огненного шара:

$$t = 0,92 \cdot \sqrt[3]{m}, \quad (5.115)$$

- для пожара пролива:

$$t = t_o + \frac{x}{u}, \quad (5.116)$$

где m - масса горючего вещества, участвующего в образовании огненного шара, кг;

t_o - характерное время, за которое человек обнаруживает пожар и принимает решение о своих дальнейших действиях, с. (может быть принято равным 5);

x - расстояние от места расположения человека до безопасной зоны (зона, где интенсивность теплового излучения меньше 4 кВт/м²);

u - средняя скорость движения человека к безопасной зоне, м/с (принимается равной 5 м/с).

Условная вероятность поражения человека, попавшего в зону непосредственного воздействия пламени пожара пролива или факела, принимается равной 1.

Для пожара-вспышки следует принимать, что условная вероятность поражения человека, попавшего в зону воздействия высокотемпературными продуктами сгорания газопаровоздушного облака, равна 1, за пределами этой зоны условная вероятность поражения человека принимается равной 0.

Термическое воздействие на человека связано с перегревом и последующими биохимическими изменениями верхних слоев кожи. Человек ощущает сильную (едва переносимую) боль, когда температура верхнего слоя кожного покрова (0,1мм) повышается до 45⁰С. Время достижения «порога боли» t , с, связано с плотностью теплового потока q , кВт/м², соотношением [3]:

$$\tau = \left(\frac{35}{q}\right)^{1,33} \quad (5.117)$$

При плотности теплового потока менее 1,7 кВт/м², боль не ощущается даже при длительном тепловом воздействии. Степень термического воздействия зависит от величины теплового потока и длительности теплового излучения.

Вероятность поражения той или иной степени при термическом воздействии определяется по вышеприведенной формуле с использованием пробит-функций [36]:

$$\text{Ожог 1 степени:} \quad Pr = -34,8 + 3,02 \cdot \ln(q^{4/3} \cdot \tau) \quad (5.118)$$

$$\text{Ожог 2 степени:} \quad Pr = -38,1 + 3,02 \cdot \ln(q^{4/3} \cdot \tau) \quad (5.119)$$

$$\text{Смертельное поражение:} \quad Pr = -31,4 + 2,56 \cdot \ln(q^{4/3} \cdot \tau) \quad (5.120)$$

Поражающее действие теплового излучения характеризуется интенсивностью теплового излучения q – тепловым потоком излучения, падающим на площадку единичного размера (кВт/м^2).

Таблица 5.9 - Значения интенсивности теплового излучения для различных степеней поражения человека и повреждения материалов [36]

Степень поражения	Интенсивность излучения, кВт/м^2
Без негативных последствий в течение длительного времени	1,4
Безопасно для человека в брезентовой одежде	4,2
Непереносимая боль через 20-30 с Ожог 1 степени через 15-20 с Ожог 2 степени через 30-40 с	7,0
Воспламенение хлопка-волокна через 15 мин	7,0
Непереносимая боль через 3-5 с Ожог 1 степени через 6-8 с Ожог 2 степени через 12-16 с	10,5
Воспламенение древесины с шероховатой поверхностью (влажность 12 %) при длительности облучения 15 мин	12,9
Воспламенение древесины, окрашенной масляной краской по строганной поверхности; воспламенение фанеры	17,0

Для каждого материала существует критическое значение плотности теплового потока q , при котором воспламенение не происходит даже при длительном тепловом воздействии. При увеличении плотности теплового потока время до начала воспламенения материала уменьшается (таблица 5.10).

Таблица 5.10 - Характеристики критических тепловых нагрузок $q_{кр}$ и зависимость времени воспламенения (t, c) от плотности теплового потока q для различных веществ и материалов [36]

Вещество, материал	$q_{кр}$	Плотность теплового потока q				
		20	50	100	150	200
Солома	7,0	70,0	10,0	2,9	1,4	0,91
Пенопласт	7,4	73,7	10,3	2,9	1,5	0,91

Хлопок-волокно	7,5	74,7	10,4	2,9	1,5	0,92
Х/б ткани	8,37	83,9	10,7	3,0	1,5	0,92
Торф кусковой	9,8	103,6	11,4	3,1	1,5	0,93
Картон серый	10,8	122,4	11,8	3,1	1,5	0,93
Картон белый	10,88	124,1	11,9	3,1	1,5	0,94
Темная древесина, ДСП	12,56	172,3	12,7	3,2	1,5	0,96
Бензин А-76	12,6	173,8	12,8	3,2	1,6	0,96
Древесина сосновая, шероховатая	12,8	181,5	12,9	3,3	1,6	0,96
Резина	7,0	70,0	10,2	3,4	1,6	0,97
Битумная кровля	7,0	70,3	10,2	3,4	1,6	0,97
Пластик слоистый	7,0	70,3	10,2	3,4	1,6	0,98
Фанера	7,0	70,3	10,2	3,4	1,6	0,99
Древесина крашеная	7,0	70,3	10,2	3,4	1,7	1,00
Древесина обугленная	7,0	70,3	10,2	3,4	1,7	1,02

В общем случае зависимость времени воспламенения от величины плотности теплового потока имеют вид [36]:

$$\tau = \frac{A}{(q - q_{кр})^n} \quad (5.21)$$

где A и n – константы для конкретного вещества (например, для древесины $A=4360$, $n=1,61$).

5.16 Примеры моделирования аварийных рисков на взрывопожароопасных объектах

Пример 5.1. На трубопроводе диаметром 1,42 м с газом пропан с рабочим давлением $P_r = 2,5$ МПа произошел разрыв трубы. Температура газа $t=30$ °С. Скорость ветра $w=10$ м/с. Коэффициент расхода из образовавшегося отверстия $\mu=0,8$.

Определить: границы зоны детонации образовавшегося газового облака возможность нарушения жизнедеятельности в населенном пункте, расположенном на расстоянии 100 м от места аварии.

Решение. Определим удельную газовую постоянную пропана:

$$R = 8314 \sum_{k=1}^n \frac{g_k}{m_k}$$

где g_k - доля i -го компонента в газе;

m_k - молекулярная газовая постоянная, кг/(к·моль);

n - число компонентов;

8314 - универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К).

$$R = 8314 \left(\frac{0,615}{2} + \frac{0,185}{28} + \frac{0,2}{28} \right) = 2670,9 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$$

2. Определим удельный объем газа:

$$V_{\Gamma} = R_0 \cdot \frac{T}{P_{\Gamma}}$$

где T - температура газа, К;

P_{Γ} - давление газа в газопроводе, Па.

$$V_{\Gamma} = 2670,9 \cdot \frac{273 + 30}{2,5 \cdot 10^6} = 0,32 \text{ м}^3/\text{кг}$$

3. Далее необходимо определить массу газа в облаке при истечении из трубопровода. Для этого рассчитаем плотность газа по формуле 5.3:

$$\rho_{\Gamma} = \frac{0,044 \cdot 2,5 \cdot 10^6}{2670,9 \cdot (273 + 30)} = 0,14 \text{ кг/м}^3$$

Тогда по соотношению (5.2) получим массу газа в облаке:

$$m_{\text{ист}} = 66 \cdot \frac{3,14 \cdot 1,42^2}{4} \cdot (2,5 \cdot 10^6 \cdot 0,14)^{1/2} = 61804,3 \text{ кг}$$

4. Найдем приведенную массу $m_{\text{пр}}$ (5.51):

$$m_{\text{пр}} = \left(\frac{33,5 \cdot 10^6}{4,52 \cdot 10^6} \right) \cdot 61804,3 \cdot 0,1 = 45806,3 \text{ кг}$$

Определяем эффективный энергозапас ТВС E по формуле 5.26. Так как $c_{\Gamma} > c_{\text{ст}}$, следовательно,

$$E = 2 \cdot 45806,3 \cdot 4,64 \cdot 10^7 \cdot \frac{0,077}{0,14} = 2,3 \cdot 10^{12} \text{ Дж.}$$

Исходя из классификации веществ, определяем, что пропан относится к классу 2 опасности (чувствительные вещества). Геометрические характеристики окружающего пространства относятся к виду 4 (открытое пространство). По экспертной таблице **Ошибка! Источник ссылки не найден.** определяем ожидаемый режим взрывного превращения облака ТВС – дефлаграция с диапазоном видимой скорости фронта пламени от 150 до 200 м/с.

Для проверки рассчитываем скорость фронта пламени по соотношению (5.33):

$$u = 43 \cdot 45806,3^{1/6} = 266,6 \text{ м/с}$$

Полученная величина больше максимальной скорости диапазона данного взрывного превращения.

Для заданного расстояния $R_l = 100$ м рассчитываем безразмерное расстояние R_x по формуле 5.36:

$$R_x = \frac{100}{\left(2,3 \cdot 10^{12} / 101,2 \cdot 10^3\right)^{1/3}} = 0,35$$

Рассчитываем параметры взрыва при скорости горения 300 м/с. Для вычисленного безразмерного расстояния по соотношениям (5.41) и (5.43) определяем величины P_{x1} и I_{x1} :

$$P_{x1} = \left(\frac{300^2}{340^2}\right) \cdot \left(\frac{7-1}{7}\right) \cdot \left(\frac{0,83}{0,35} - \frac{0,14}{0,35^2}\right) = 0,82$$

$$W = \frac{300}{340} \cdot \left(\frac{7-1}{7}\right) = 0,75$$

$$I_{x1} = 0,75 \cdot (1 - 0,4 \cdot 0,75) \cdot \left(\frac{0,06}{0,35} + \frac{0,01}{0,35^2} - \frac{0,0025}{0,35^3}\right) = 0,1$$

Так как ТВС – газовая, величины P_{x2} , I_{x2} рассчитываем по соотношениям (5.37) и (5.38):

$$P_x = \exp(-1,124 - 1,66 \cdot (\ln(0,35) + 0,26 \cdot (\ln(0,35))^2) = 2,47$$

$$I_x = \exp(-3,4217 - 0,898 \cdot (\ln(0,35) + 0,0096 \cdot (\ln(0,35))^2) = 0,08$$

Определяем окончательные значения P_x и I_x по (5.45) и (5.46):

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}) = \min(0,82, 2,47) = 0,82$$

$$I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}) = \min(0,1, 0,08) = 0,08$$

Из найденных безразмерных величин P_x и I_x вычисляем искомые величины избыточного давления и импульса фазы сжатия в воздушной ударной волне на расстоянии 100 м от места аварии при скорости горения 300 м/с по формулам 5.47 и 5.48:

$$\Delta P = 101,2 \cdot 10^3 \cdot 0,82 = 83 \cdot 10^3$$

$$I^+ = (101,2 \cdot 10^3)^{2/3} \cdot 0,08 \cdot \frac{(2,3 \cdot 10^{12})^{1/3}}{340} = 11,7 \cdot 10^3$$

Используя полученные значения ΔP и I^+ , находим:

- для тяжелых разрушений по формуле 5.102:

$$Pr = 5,0 - 0,26 \cdot \ln\left(\frac{17500}{83 \cdot 10^3}\right)^{8,4} + \left(\frac{290}{11,7 \cdot 10^3}\right)^{9,3} = 4,81$$

- для полного разрушения по формуле 5.104:

$$Pr = 5,0 - 0,22 \cdot \ln\left(\frac{4000}{83 \cdot 10^3}\right)^{7,4} + \left(\frac{460}{11,7 \cdot 10^3}\right)^{11,3} = 4,82$$

- вероятность длительной потери управляемости у людей (состояние нокдауна), попавших в зону действия избыточного давления может быть определена по формуле 5.107:

$$Pr = 5,0 - 5,74 \cdot \ln\left(\frac{4,2}{1,8} + \frac{1,3}{8,7}\right) = -0,1$$

- вероятность разрыва барабанных перепонок у людей от уровня перепада давления в воздушной волне определяется (5.111):

$$Pr = -12,6 + 1,524 \cdot \ln(83 \cdot 10^3) = 4,7$$

- вероятность отброса людей волной давления определяется по формуле 5.112:

$$Pr = 5,0 - 2,44 \cdot \ln\left(\frac{7,38 \cdot 10^3}{83 \cdot 10^3} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{83 \cdot 10^3 \cdot 11,7 \cdot 10^3}\right) = 4,13$$

Согласно таблице 5.6 означает: 42 % вероятность тяжелых повреждений и 43 % вероятность сильных разрушений, а также 38 % вероятность разрыва барабанных перепонок у людей и 19 % вероятность отброса людей волной давления. Вероятности остальных критериев поражения равны нулю.

Пример 5.2. В результате внезапного раскрытия обратного клапана в пространство, загромажденное подводными трубопроводами, выброшено 200 кг этилена. Рядом с загазованным объектом на расстоянии 100 м находится помещение цеха. Концентрация этилена в облаке 0,08 кг/м³. Требуется определить степень поражения здания цеха и расположенного в нем персонала при взрыве облака ТВС.

Решение. Находим эффективный энергозапас горючей смеси E по формуле 5.26. Так как $C_r \leq C_{ст}$, следовательно,

$$E = 200 \cdot 4,6 \cdot 10^7 \cdot 2 = 18,4 \cdot 10^9 \text{ Дж.}$$

По таблице 5.1 определяем, что этилен относится к классу 2 опасности (чувствительные вещества). Геометрические характеристики окружающего пространства относятся к виду 1 (загромажденное пространство). По таблице 5.3 определяем диапазон ожидаемого режима взрывного превращения облака топливно-воздушной смеси – первый, что соответствует детонации.

Для заданного расстояния 100 м по формуле 5.73 определим безразмерное параметрическое расстояние $\lambda_{\text{пар}}$. Для этого по формуле 5.36 определим безразмерное расстояние:

$$R_x = \frac{100}{\left(18,4 \cdot 10^9 / 101,2 \cdot 10^3\right)^{1/3}} = 1,76$$

$$\lambda = 2,15 \cdot 1,76 = 3,78$$

По соотношениям для падающей волны (5.56) – (5.63) находим:

- амплитуду избыточного давления на фронте проходящей волны избыточного давления (фаза сжатия):

$$P_{r+} = P_0 \cdot \exp(0,299 - 2,058 \ln 3,78 + 0,26 (\ln 3,78)^2) = 13,8 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

- амплитуду избыточного давления фазы разрежения:

$$P_{r-} = P_0 \cdot \exp(-1,46 - 1,402 \ln 3,78 + 0,079 (\ln 3,78)^2) = 4,15 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

- импульс фазы сжатия:

$$I_{r+} = E^{1/3} \cdot \exp(-0,843 - 0,932 \ln 3,78 + 0,037 (\ln 3,78)^2) = 343,2 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

- импульс фазы разрежения:

$$I_{r-} = E^{1/3} \cdot \exp(-0,873 - 1,25 \ln 3,78 + 0,1327 (\ln 3,78)^2) = 262,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

- длительность фазы сжатия:

$$\tau_{r+} = 10^{-5} \cdot E^{1/3} \cdot \exp(-0,106 + 0,448 \ln 3,78 - 0,026 (\ln 3,78)^2) = 0,04 \text{ с}$$

- длительность фазы разрежения:

$$\tau_{r-} = 10^{-5} \cdot E^{1/3} \cdot \exp(1,299 + 0,412 \ln 3,78 - 0,079 (\ln 3,78)^2) = 0,15 \text{ с}$$

- декремент затухания в отраженной волне:

$$K_r = 0,889 - 0,356 \ln 3,78 + 0,105 (\ln 3,78)^2 = 0,604$$

- форму падающей волны с описанием фаз сжатия и разрежения:

$$\Delta P_r(t, \lambda_{\text{пар}}) = P_{r+} \cdot \frac{\sin \left[\pi \cdot \frac{(t - 0,04)}{0,15} \right]}{\sin \left(-\pi \frac{0,04}{0,15} \right)} \cdot \exp(-0,604 \cdot t/0,04)$$

Используя полученные значения P_{r+} и I_{r+} находим:

- для тяжелых разрушений по формуле 5.102:

$$\text{Pr} = 5,0 - 0,26 \cdot \ln \left(\frac{17500}{13,8 \cdot 10^3} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{342,2} \right)^{9,3} = 4,48$$

- для полного разрушения по формуле 5.104:

$$\text{Pr} = 5,0 - 0,22 \cdot \ln \left(\frac{4000}{13,8 \cdot 10^3} \right)^{7,4} + \left(\frac{460}{342,2} \right)^{11,3} = 4,26$$

- вероятность длительной потери управляемости у людей по формуле 5.107:

$$\text{Pr} = 5,0 - 5,74 \cdot \ln \left(\frac{4,2}{1,14} + \frac{1,3}{0,25} \right) = -7,5$$

- вероятность разрыва барабанных перепонки у людей от уровня перепада давления в воздушной волне определяется (5.111):

$$\text{Pr} = -12,6 + 1,524 \cdot \ln 13,8 \cdot 10^3 = 1,9$$

- вероятность отброса людей волной давления определяется по формуле 5.112:

$$\text{Pr} = 5,0 - 2,44 \cdot \ln \left(\frac{7,38 \cdot 10^3}{13,8 \cdot 10^3} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{13,8 \cdot 10^3 \cdot 342,2} \right) = -8,7$$

Согласно таблице 5.6 означает: 30 % вероятность тяжелых повреждений и 23 % вероятность сильных разрушений. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

По соотношениям для отраженной волны (5.64) – (5.72) находим:

- амплитуду отраженной волны давления:

$$P_{r+} = P_0 \cdot \exp(1,264 - 2,056 \ln 3,78 + 0,211 (\ln 3,78)^2) = 33,5 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

- амплитуда отраженной волны разрежения:

$$P_{r-} = P_0 \cdot \exp(-0,673 - 1,043 \ln 3,78 + 0,252 (\ln 3,78)^2) = 20,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

- импульс отраженной волны давления:

$$I_{r+} = E^{1/3} \cdot \exp(-0,07 - 1,033 \ln 3,78 + 0,045 (\ln 3,78)^2) = 0,8 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

- импульс отраженной волны разрежения:

$$I_{r-} = E^{1/3} \cdot \exp(-0,052 - 0,462 \ln 3,78 + 0,27 (\ln 3,78)^2) = 2,2 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

- длительность отраженной волны давления:

$$\tau_{r+} = 10^{-5} \cdot E^{1/3} \cdot \exp(-1,109 + 0,983 \ln 3,78 - 0,23 (\ln 3,78)^2) = 0,02 \text{ с}$$

- длительность отраженной волны разрежения:

$$\tau_{r-} = 10^{-5} \cdot E^{1/3} \cdot \exp(1,265 + 0,857 \ln 3,78 - 0,192 (\ln 3,78)^2) = 0,21 \text{ с}$$

- общее время действия отраженных волн на мишень:

$$\tau_{r+} + \tau_{r-} = \exp(1,497 + 0,908 \ln 3,78 - 0,404 (\ln 3,78)^2) = 7,43 \text{ с}$$

- декремент затухания в отраженной волне:

$$K_r = 0,978 - 0,554 \ln 3,78 + 0,26 \ln(\lambda)^2 = 0,7$$

- форму отраженной волны с описанием фаз сжатия и разрежения:

$$\Delta P_r(t, \lambda_{\text{пар}}) = P_{r+} \cdot \frac{\sin \left[\pi \cdot \frac{(t - 0,02)}{0,21} \right]}{\sin \left(-\pi \frac{0,02}{0,21} \right)} \cdot \exp \left(-0,7 \cdot \frac{t}{0,02} \right)$$

Используя полученные значения P_{r+} и I_{r+} находим:

- для тяжелых разрушений по формуле 5.102:

$$Pr = 5,0 - 0,26 \cdot \ln \left(\frac{17500}{33,5 \cdot 10^3} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{0,8 \cdot 10^3} \right)^{9,3} = 4,46$$

- для полного разрушения по формуле 5.104:

$$Pr = 5,0 - 0,22 \cdot \ln \left(\frac{4000}{33,5 \cdot 10^3} \right)^{7,4} + \left(\frac{460}{0,8 \cdot 10^3} \right)^{11,3} = 4,92$$

- вероятность длительной потери управляемости у людей по формуле 5.107:

$$Pr = 5,0 - 5,74 \cdot \ln \left(\frac{4,2}{1,33} + \frac{1,3}{0,58} \right) = -4,7$$

- вероятность разрыва барабанных перепонок у людей от уровня перепада давления в воздушной волне определяется (5.111):

$$Pr = -12,6 + 1,524 \cdot \ln(33,5 \cdot 10^3) = 3,3$$

- вероятность отброса людей волной давления определяется по формуле 5.112:

$$Pr = 5,0 - 2,44 \cdot \ln \left(\frac{7,38 \cdot 10^3}{33,5 \cdot 10^3} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{33,5 \cdot 10^3 \cdot 0,8 \cdot 10^3} \right) = -10,08$$

Согласно таблице 5.6 означает: 29 % вероятность тяжелых повреждений, 47 % вероятность сильных разрушений и 4 % вероятность разрыва барабанных перепонок. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

Пример 5.3. Провести оценку последствий аварийных утечек нефти из нефтепровода для различных сценариев аварии. Давление в нефтепроводе

составляет 3 МПа. Время перекрытия задвижек примем 3600 с., так как авария произошла на линейной части нефтепровода, расположенной в значительном удалении от нефтеперекачивающей станции. Диаметр магистрального трубопровода - 609,6 мм. Длина отрезка между соседними задвижками - 18,1 км.

Решение. Определим объем аварийного разлива нефти по формуле:

$$V_{APH} = 0,01 \cdot P_{\text{пер}} \cdot Q \cdot t + \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L$$

где $P_{\text{пер}}$ - давление перекачки в месте возникновения аварии, МПа;

Q – расход нефти, м³/с;

t – время перекрытия задвижек, с;

D - диаметр трубопровода, мм;

L - длина отрезка между соседними задвижками, км.

$$V_{APH} = 0,01 \cdot 3 \cdot 10^6 \cdot 0,6 \cdot 3600 + \frac{3,14 \cdot 0,609^2}{4} \cdot 18100 = 550 \text{ м}^3$$

Количество пролившейся нефти, вследствие разгерметизации нефтепровода, рассчитаем по формуле 5.4:

$$m_a = 0,84 \cdot 550 \cdot 0,79 = 365 \text{ тн}$$

Примем, что нефть свободно растекается по поверхности грунта. В этой связи определим диаметр разлива по формуле 5.79:

$$d = \sqrt{25,5 \cdot 550} = 118,4 \text{ м}$$

По формуле 5.15 определим площадь растекания нефти:

$$F_{\text{ж}} = \frac{3,14 \cdot 118,4^2}{4} = 11004,6 \text{ м}^2$$

Далее определим толщину слоя разлившейся нефти по формуле 5.3:

$$h = \frac{550}{11004,6} = 0,05 \text{ м}$$

Интенсивность испарения разлившейся нефти рассчитаем по формуле 5.9:

$$W = 10^{-6} \cdot 1 \cdot \sqrt{61,525} \cdot 13,3 = 1,03 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с} \cdot \text{м}^2$$

Массу паров нефти, поступившей в окружающее пространство при аварии, определим по формуле 5.11:

$$m_n = 1,03 \cdot 10^{-4} \cdot 11004,6 \cdot 3600 = 4080,5 \text{ кг}$$

Для определения интенсивности теплового излучения пожара пролива рассчитаем высоту пламени по формуле 5.80:

$$H = 42 \cdot 118,4 \left(\frac{0,04}{1,29 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 118,4}} \right)^{0,61} = 68,9 \text{ м}$$

Тогда,

$$h = 2 \cdot \frac{68,9}{118,4} = 1,16$$

$$S_1 = 2 \cdot \frac{100}{118,4} = 1,7$$

$$A = \frac{(1,16^2 + 1,7^2 + 1)}{(2 \cdot 1,7)} = 1,54$$

$$B = \frac{(1 + 1,7^2)}{(2 \cdot 1,7)} = 1,14$$

Значение высоты пламени согласно 5.80:

$$H = 42 \cdot 115,2 \cdot \left(\frac{0,04}{1,29 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 115,2}} \right)^{0,61} = 67,7 \text{ м.}$$

Фактор облученности для вертикальной и горизонтальной площадок определим по формулам 5.77 и 5.78:

$$F_V = \frac{1}{3,14} \cdot \left[\frac{1}{1,7} \cdot \arctg \left(\frac{1,16}{\sqrt{1,7^2}} \right) + \frac{1,16}{1,7} \left\{ \arctg \left(\sqrt{\frac{1,7-1}{1,7+1}} \right) - \frac{1,54}{\sqrt{1,54^2-1}} \cdot \arctg \left(\sqrt{\frac{(1,54+1) \cdot (1,7-1)}{(1,54-1) \cdot (1,7+1)}} \right) \right\} \right] = 0,02$$

$$F_H = \frac{1}{3,14} \cdot \left[\frac{(1,14 - 1/1,7)}{\sqrt{1,14-1}} \cdot \arctg \left(\sqrt{\frac{(1,14+1) \cdot (1,7-1)}{(1,14-1) \cdot (1,7+1)}} \right) - \frac{(1,81 - 1/1,7)}{\sqrt{1,81^2-1}} \cdot \arctg \left(\sqrt{\frac{(1,81+1) \cdot (1,7-1)}{(1,81-1) \cdot (1,7+1)}} \right) \right] = 0,19$$

Угловой коэффициент облученности рассчитаем по формуле 5.76:

$$F_q = \sqrt{0,02^2 + 0,19^2} = 0,19$$

Коэффициент пропускания атмосферы определим по формуле 5.81:

$$\tau = \exp[-0,7 \cdot 10^{-4} \cdot (100 - 0,5 \cdot 118,4)] = 2,7$$

Тогда интенсивность теплового излучения пожара составит (5.74):

$$q = 10 \cdot 0,19 \cdot 2,7 = 5,13 \text{ кВт/м}^2$$

Таким образом, интенсивность теплового потока от горящего разлива нефти на расстоянии 100 м. составит 5,13 кВт/м².

Время выгорания (5.82):

$$t_B = \frac{365000}{11004,6 \cdot 0,04} = 829 \text{ с} \approx 14 \text{ мин.}$$

Глубину зоны опасного теплового излучения определим по формуле 5.83:

- для людей:

$$x = 33 \cdot \ln \left(1,25 \cdot \frac{80000}{1400} \right) = 141 \text{ м.}$$

- для зданий и сооружений:

$$x = 33 \cdot \ln \left(1,25 \cdot \frac{80000}{7500} \right) = 85,5 \text{ м.}$$

Для определения избыточного давления ΔP и импульса фазы сжатия I^+ рассчитаем эффективный энергозапас смеси по формуле 5.35:

$$E = (41 \cdot 4080,5) = 167300,5$$

Соответствующее безразмерное расстояние по формуле 5.36:

$$R_x = \frac{100}{\left(167300,5 \cdot 10^6 / 101200\right)^{1/3}} = 0,85$$

Величины безразмерного давления P_x и импульс фазы сжатия I_x определяются по формулам 5.41-5.44:

$$v = 43 \cdot 4080,5^{\frac{1}{6}} = 171,9 \text{ м/с}$$

$$P_{x1} = \left(\frac{171,9^2}{340^2}\right) \cdot \left(\frac{7-1}{7}\right) \cdot \left(\frac{0,83}{0,85} - \frac{0,14}{0,85^2}\right) = 0,16$$

$$W = \frac{171,9}{340} \cdot \left(\frac{7-1}{7}\right) = 0,43$$

$$I_{x1} = 0,43 \cdot (1 - 0,4 \cdot 0,43) \cdot \left(\frac{0,06}{0,85} + \frac{0,01}{0,85^2} - \frac{0,0025}{0,85^3}\right) = 0,03$$

Таким образом, искомые величины избыточного давления и импульса фазы сжатия в воздушной ударной волне на расстоянии 100 м от места аварии при скорости горения 171,9 м/с рассчитаем по формуле 5.47-5.48:

$$\Delta P = 101,3 \cdot 0,16 = 16,2 \text{ кПа}$$

$$I^+ = 101,3 \cdot 10^{3^{2/3}} \cdot 0,03 \cdot \frac{167300,5^{\frac{1}{3}}}{340} = 10,3 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Глубину взрывоопасной зоны определим по формуле 5.24 [25]:

$$X_p = \sqrt{\frac{0,17 \cdot 1,15 \cdot 3600}{0,04}} = 132,6 \text{ м.}$$

Используя полученные значения ΔP и I^+ , находим:

- для тяжелых разрушений по формуле 5.102:

$$Pr = 5,0 - 0,26 \cdot \ln \left(\frac{17500}{106,2 \cdot 10^3} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{0,01 \cdot 10^3} \right)^{9,3} = -0,87$$

- для полного разрушения по формуле 5.104:

$$Pr = 5,0 - 0,22 \cdot \ln \left(\frac{4000}{106,2 \cdot 10^3} \right)^{7,4} + \left(\frac{460}{0,01 \cdot 10^3} \right)^{11,3} = -4,6$$

- вероятность длительной потери управляемости у людей (состояние нокдауна), попавших в зону действия избыточного давления может быть определена по формуле 5.107:

$$Pr = 5,0 - 5,74 \cdot \ln \left(\frac{4,2}{2,05} + \frac{1,3}{0,007} \right) = -25$$

- вероятность разрыва барабанных перепонок у людей от уровня перепада давления в воздушной волне определяется (5.111):

$$Pr = -12,6 + 1,524 \cdot \ln 106,2 \cdot 10^3 = 5,0$$

- вероятность отброса людей волной давления определяется по формуле 5.112:

$$Pr = 5,0 - 2,44 \cdot \ln \left(\frac{7,38 \cdot 10^3}{106,2 \cdot 10^3} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{106,2 \cdot 10^3 \cdot 0,01 \cdot 10^3} \right) = -12,3$$

Согласно таблице 5.6 означает: 50 % вероятность разрыва барабанных перепонок у людей. Вероятности остальных критериев поражения равны нулю.

Для расчета интенсивности теплового излучения «огненного шара» необходимо определить его диаметр и угловой коэффициент облученности по формулам 5.86 и 5.87:

$$D_s = 6,48 \cdot 4080,5^{0,325} = 96,6 \text{ м.}$$

$$F_q = \frac{96,6^2}{4 \cdot (96,6^2 + 100^2)} = 0,12$$

Коэффициент пропускания атмосферы рассчитаем по формуле 5.88:

$$\tau = \exp \left[-7 \cdot 10^{-4} \left(\sqrt{100^2 + 96,6^2} - \frac{96,6}{2} \right) \right] = 0,83$$

По формуле 5.85 определим интенсивность теплового потока «огненного шара»:

$$q_{\text{ош}} = 350 \cdot 0,12 \cdot 0,83 = 34,9 \text{ кВт/м}^2.$$

Таким образом, интенсивность теплового потока «огненного шара» на расстоянии 100 м. составит 34,9 кВт/м².

Время существования огненного шара определим по формуле 5.89:

$$t_s = 0,852 \cdot 4080,5^{0,26} = 7,4 \text{ с.}$$

Используя полученное значение $q_{\text{ош}}$, находим:

- время достижения «порога боли» по формуле 5.117:

$$\tau = \left(\frac{35}{34,9} \right)^{1,33} = 1 \text{ с}$$

- для ожога 1 степени по формуле 5.118:

$$Pr = -34,8 + 3,02 \cdot \ln \left(34,9^{4/3} \cdot 1 \right) = -20,5$$

- для ожога 2 степени по формуле 5.119:

$$Pr = -38,1 + 3,02 \cdot \ln \left(34,9^{4/3} \cdot 1 \right) = -23,8$$

- для смертельного поражения по формуле 5.120:

$$Pr = -31,4 + 2,56 \cdot \ln \left(34,9^{4/3} \cdot 1 \right) = -19,3$$

Согласно таблице 5.6 означает, что вероятность поражения термическим воздействием на расстоянии 100 м равны нулю.

Длину факела определим по формуле 5.90:

$$L_F = 13,5 \cdot 266^{0,4} = 125,9 \text{ м.}$$

Ширину факела при струйном горении определим по формуле 5.91:

$$D_F = 125,9 \cdot 0,15 = 18,9 \text{ м.}$$

Рассчитаем интенсивность теплового излучения факельного горения, для этого по формуле 5.94 определим коэффициент пропускания атмосферы:

$$\tau = \exp \left[-7 \cdot 10^{-4} \left(\sqrt{100^2 + 125,9^2} - \frac{18,9}{2} \right) \right] = 0,9$$

Угловой коэффициент облученности рассчитаем по формуле 5.93:

$$F_q = \frac{18,9^2}{4 \cdot (125,9^2 + 100^2)} = 0,003$$

Тогда интенсивность теплового излучения факельного горения составит (5.92):

$$q_{\text{фг}} = 350 \cdot 0,03 \cdot 0,9 = 9,45 \text{ кВт/м}^2$$

Таким образом, интенсивность теплового потока факельного горения на расстоянии 100 м. составит 9,45 кВт/м².

5.17 Задания для самостоятельной работы

Задание 5.1. В результате аварии автоцистерны, заполненной m кг газа, образовался огненный шар. Рассчитать вероятность гибели людей на расстоянии L_1 и L_2 м от центра огненного шара по данным представленным в таблице 5.11.

Таблица 5.11 - Исходные данные для решения задачи

№ п/п	Наименование газа	Масса газа m , м ³	L_1 , м	L_2 , м
1	Ацетальдегид	65000	50	180
2	Ацетон	75000	55	120
3	Бензол	58000	30	90
4	Гексан	60000	45	100

5	Гептан	72000	40	85
6	Диэтилэфир	94000	60	125
7	Изобутан	86000	10	150
8	Изопентан	90000	40	95
9	Изопропилбензол	72000	25	60
10	Метиловый спирт	94000	15	55
11	<i>n</i> -Петан	78000	20	45
12	<i>n</i> -Бутан	80000	25	85
13	<i>n</i> -Петан	92000	5	25
14	<i>n</i> -Пропиловый спирт	88000	10	75
15	Пропилен	89000	20	50

Задание 5.2. Провести оценку показателей риска (потенциальный, коллективный и средний индивидуальный риск) для объекта хранения опасного вещества.

Вероятность полной разгерметизации резервуара для хранения стабильной жидкости принять равной $P(A)=1 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹, для резервуара хранения перегретой жидкости (сжиженного газа) – $P(A)=1 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹.

Таблица 5.12 - Исходные данные для решения задачи

№ п/п	Опасное вещество	Объем резервуара, м ³	Количество резервуаров, шт.	Площадь резервуарного парка, м ²
1	Ацетальдегид	250	5	900
2	Ацетон	150	6	1500
3	Бензол	180	7	2000
4	Гексан	200	8	1000
5	Гептан	220	6	2500
6	Диэтилэфир	240	5	2700
7	Изобутан	260	7	2100
8	Изопентан	300	8	3100
9	Изопропилбензол	320	9	3400
10	Метиловый спирт	340	10	11000
11	<i>n</i> -Петан	380	6	950
12	<i>n</i> -Бутан	400	8	1300
13	<i>n</i> -Петан	420	7	1750
14	<i>n</i> -Пропиловый спирт	280	6	1250
15	Пропилен	500	5	13450

Задание 5.3. Провести оценку последствий аварийных утечек нефти из нефтепровода для различных сценариев аварии. Давление в нефтепроводе составляет P , МПа. Время перекрытия задвижек примем t , с. Диаметр

магистрального трубопровода d , мм. Длина отрезка между соседними задвижками L , км.

Таблица 5.13 - Исходные данные для решения задачи

№ п/п	P , МПа	t , с	d , мм	L , км
1	3,5	1800	550,5	90
2	3,7	3600	600,6	150
3	4,0	3600	705,5	200
4	4,5	1800	800,0	110
5	4,2	3600	655,6	250
6	4,8	1800	590,8	270
7	3,2	1800	710,2	210
8	3,9	1800	800,3	90
9	4,7	3600	610,5	66
10	5,0	3600	710,7	76
11	5,3	1800	695,6	95
12	5,5	3600	810,8	130
13	2,8	1800	730,5	115
14	3,3	1800	699,9	120
15	2,9	1800	595,4	135

6. Анализ аварийного риска на угольной шахте

6.1 Взрывы метана и угольной пыли

Взрывы метана и угольной пыли в шахтах являются одной из самых опасных аварий. Разрушительная сила взрывной волны бывает огромной. Взрывная волна, распространяясь по выработкам, разрушает крепь, в результате чего образуются завалы, в ряде случаев преграждающие выход пострадавшим из охваченных взрывом участков и проход к ним горноспасательных команд. Застигнутые аварией люди подвергаются угрозе поражения взрывной волной, а также опасности отравления ядовитыми продуктами взрыва.

6.1.1 Взрыв метана

Метан (CH_4) – газ, не имеющий ни цвета, ни запаха, ни вкуса. Удельный вес его 0,554, вследствие чего он обычно скапливается в верхних частях выработок. В смеси с воздухом он образует взрывоопасную смесь. Данная смесь взрывается при концентрации метана от 5 до 15%. Для предотвращения скопления метана в горных выработках правилами безопасности допускается содержание его в воздухе, исходящем из шахты, не свыше 0,75%, а в исходящих струях участков не выше 1% [39].

Воздух, использованный уже для проветривания подготовительных или очистных выработок, может быть направлен в другие выработки лишь в том случае, если он содержит не более 0,5% метана. При содержании газа свыше 1% принимаются меры по устранению его скоплений, а при 2% люди выводятся из загазованного участка и работы приостанавливаются [40].

Наибольшей силы взрыв достигает при концентрации метана 9,5%, так как в этом случае на его сжигание используется весь кислород воздуха. Температура взрыва метановоздушной смеси достигает 2150–2650°C, если взрыв происходит в замкнутом пространстве, и 1850°C, если продукты взрыва могут свободно распространяться [40].

Как уже говорилось, горючесть и взрывчатость метановоздушной смеси зависят от процентного содержания метана. Смесь, содержащая до 5% CH_4 , не взрывоопасна, но может гореть при наличии источника высокой температуры; смесь, содержащая от 5 до 15% CH_4 , взрывоопасна; смесь, содержащая свыше 15% метана, не взрывоопасна и не поддерживает горения,

а с притоком кислорода извне горит спокойным пламенем, как светильный газ. Наиболее легко воспламеняется газовая смесь, содержащая 8% CH_4 [40].

Указанные свойства метана необходимо иметь в виду при ликвидации рудничных пожаров в газовых шахтах. Нельзя вести активные работы по тушению пожара при концентрации метана в пределах от 5 до 15%.

Если выделяющийся горючий газ состоит не из чистого метана, а из смеси отдельных газов (метан, этан, водород и т.д.), то указанные пределы взрываемости смесей могут весьма сильно меняться.

Опасность взрыва метана в шахте главным образом заключается в том, что взрывной волной обычно разрушаются вентиляционные устройства и нарушается проветривание не только на участке, на котором произошел взрыв, но и на смежных участках, куда проникают продукты взрыва. Эти продукты взрыва и являются главной причиной несчастных случаев с людьми, застигнутыми аварией в шахте.

Метан выделяется в угольных шахтах из толщи угля и боковых пород, а также из отбитого угля и выработанных пространств. Различают три вида выделения газа в шахтных выработках: обыкновенное, суфлярное и внезапное [41].

Обыкновенное выделение метана происходит из не видимых глазу пор и трещин в угле или боковой породе по всей их обнаженной поверхности. Это медленное, но непрерывное и длительное выделение дает наибольшее количество газа. Его признаками являются шипение, тонкий свист, легкое потрескивание и шорох.

Суфлярное выделение представляет собой иногда довольно бурное истечение метана, скопившегося в трещинах и пустотах в толще угля или боковых пород, через видимые глазу трещины. Оно обычно сопровождается шипением, а, если газ выделяется через воду, бурным клокотанием. Дебит суфляров может достигать нескольких тысяч и даже десятков тысяч кубических метров в сутки. Давление газа в начале действия суфляра может измеряться несколькими атмосферами [41].

Внезапные выделения газа представляют собой выбросы в течение короткого времени огромных количеств метана (десятки и сотни тысяч кубических метров), сопровождающиеся выбросом угольной мелочи в количестве от нескольких тонн до нескольких сот и даже тысяч тонн. Внезапные выбросы угля и газа сопровождаются звуковыми явлениями, которые иногда доходят до грохота и гула, напоминающего орудийный выстрел. Скорость газовой волны иногда может достигать 200–300 км/ч [41].

Все три вида выделения метана в шахтах представляют серьезную опасность, так как могут явиться причинами загазирования выработок, взрыва газа, больших завалов и обрушений горных выработок.

6.1.2 Особенности образования и горения пылевоздушных смесей

Характерный признак аэрозолей – их неустойчивость: под действием силы тяжести частицы осаждаются на различных поверхностях, образуя осадки (отложения), а под действием воздушных потоков эти пылевые отложения могут вновь переходить во взвешенное состояние. Пожарную опасность представляют как пылевые облака, так и отложения пылей на строительных конструкциях и технологическом оборудовании. Воспламенение и горение горючей пыли происходит как в слое пылевых отложений, так и в пылевоздушном потоке. Горение пылевых отложений обычно протекает медленно и его часто называют тлением. Однако после перехода через некоторый критический предел горение отложений может перейти в быстрое горение, определяемое в основном диффузионным поступлением кислорода к поверхности частиц, т.к. горение протекает на поверхности частиц. При воспламенении и горении пылевоздушного потока ход процесса целиком определяется темпом насыщения газового объема пылевзвеси летучей частью горючей пыли и протеканием гомогенной реакции горения образовавшейся горючей газовой смеси. Но в обоих случаях (как в отложениях, так и в потоке) основной горючей составляющей являются газифицированные летучие части пыли. При воспламенении в потоке газифицирование пыли происходит при высокой температуре в зоне действия источника воспламенения. Частицы органических веществ плавятся и испаряются (или разлагаются) с образованием газообразных продуктов. Огромная поверхность пылевых частиц обуславливает возможность очень быстрого протекания процесса. Поэтому в потоке происходит взрыв пыли с формированием ударной волны. При низкотемпературном окислении частицы осевшей на поверхность пыли адсорбируют кислород из окружающей среды. Кислород, повидимому, вступает в реакцию, присоединяясь к отдельным ветвям топливных молекул. Эти ветви менее прочно соединены с основной группой атомов молекул, и поэтому они легко отрываются при нагреве (усилении теплового движения). Они и составляют летучую часть топлива [40].

В любом случае взрывы угольной пыли связаны с наличием летучей части. Это подтверждается тем, что при содержании в топливе менее 8%

летучих практически не наблюдалось взрывов пыли. Подобно взрывоопасным газовоздушным смесям взвеси пыли характеризуются нижним и верхним концентрационными пределами распространения пламени. (КПРП) Диапазон концентрационных пределов весьма широк – от десятков граммов до килограммов в 1 м^3 воздуха [41].

Верхний КПРП пыли обычно достаточно велик, и достичь его в производственных помещениях даже при аварийных ситуациях практически невозможно. Поэтому для пылей важнейшей характеристикой является нижний КПРП (сокращенно НКПРП).

НКПРП – минимальное содержание горючей пыли, при котором возможно распространение пламени на любое расстояние от источника зажигания. Горючие пыли имеющие значение НКПРП 65 г/м^3 и менее считаются взрывоопасными, а при НКПРП более 65 г/м^3 – относятся к пожароопасным [42].

Кроме этого уровень опасности пыли, находящейся во взвешенном состоянии, характеризуется объемной плотностью энергосодержания, максимальным давлением взрыва в замкнутом пространстве, скоростью распространения пламени, скоростью нарастания давления при взрыве, максимально допустимым содержанием кислорода в смеси пыли с воздухом, при котором пыль не воспламенится, минимальной энергией зажигания. Для пыли, находящейся в осевшем состоянии установлены следующие показатели: температура воспламенения, температура самовоспламенения, минимальная энергия зажигания.

На процессы воспламенения и распространения пламени взвесей, т.е. на показатели взрыво- и пожароопасности горючих пылей, влияют множество факторов: дисперсный состав, форма поверхности частиц, влагосодержание, химический состав пыли, начальные температура и давление, электризуемость и другие. Например, на основной показатель – величину НКПРП пыли – существенное влияние оказывают дисперсный состав (размер частиц, форма и характер поверхности, влажность, состав пыли, температура и давление). Взрывоопасность облаков пыли возрастает при уменьшении размеров частиц: частицы меньшего размера легче переходят во взвешенное состояние, дольше остаются во взвеси, легче зажигаются и быстрее сгорают. Это подтверждается тем, что максимальное давление взрыва и скорость его нарастания с уменьшением размера частиц возрастают. Но изменение НКПРП происходит неоднозначно: при увеличении размера частиц от 10 до 70-100 мкм НКПРП снижается; дальнейшее увеличение размера частиц приводит к его повышению [41].

НКПРП аэрозолей органических веществ с увеличением влагосодержания частиц всегда повышается и при влагосодержании около 20-25 % (масс) аэрозоли становятся вообще не взрывоопасными.

Присутствие в горючих пылях инертных компонентов снижает их взрывоопасность (повышается НКПРП и значение минимальной энергии зажигания, снижается максимальное давление взрыва и скорость его нарастания). Для каждой горючей пыли (с НКПРП 65 г/м³). С ростом начальной температуры аэрозоля наблюдается монотонное снижение НКПРП вплоть до температур, при которых происходит самовоспламенение аэрозоля.

Аварии на угольных шахтах могут происходить по различным причинам. Одной из причин может быть взрыв метановоздушной смеси (МВС) и пылевоздушной смеси (ПВС).

Взрыв МВС и ПВС может произойти при следующих условиях [42]:

- повышение концентрации метана;
- наличие достаточного объема взвешенной или осевшей угольной пыли влажностью менее 25%;
- наличие источника воспламенения.

Процесс добычи угля сопряжен с появлением в рудничной атмосфере метана и угольной пыли с ее оседанием и накапливанием на поверхности оборудования, полу и других поверхностях. Данное обстоятельство приводит к образованию взрывоопасной концентрации МВС, взрыв которой может привести к встряхиванию пыли с последующим образованием ПВС (рисунок 6.1).

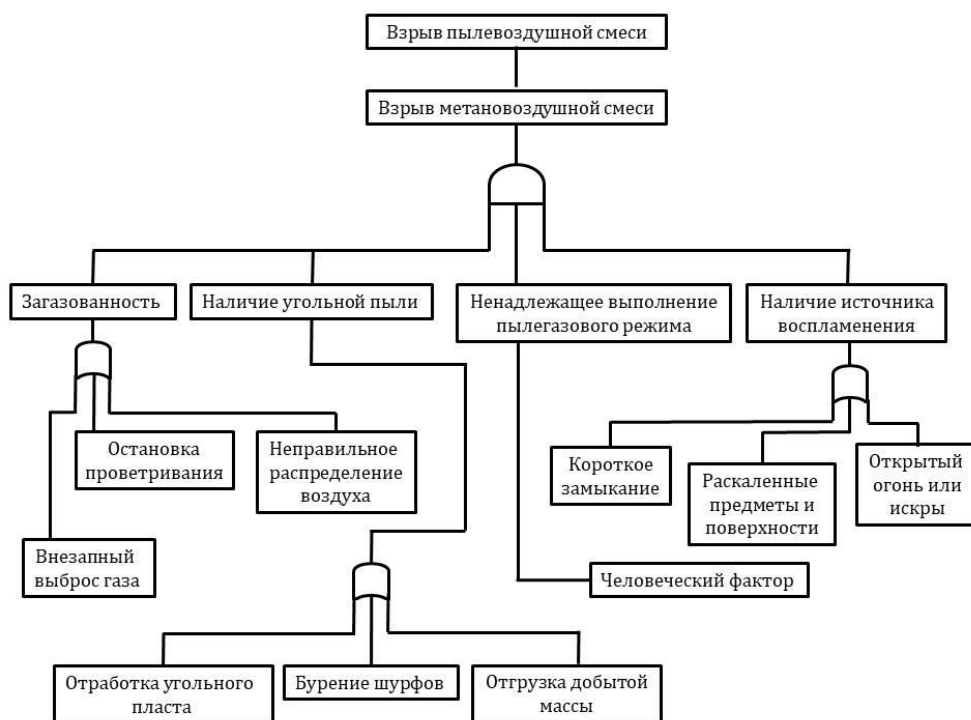


Рисунок 6.1 - «Дерево отказов» при взрыве метановоздушной и пылевоздушной смеси

ПВС может занять частично или полностью весь объем выработки. Затем этот объем ПВС заменяется расчетной сферой, радиус которой определяется с учетом объема выработки, типа и массы опасной смеси.

Источником зажигания может послужить открытое пламя (газовое пламя), искры (электрические искры от короткого замыкания, фрикционное искрение от контакта с породой бурового или врубового инструмента), нагретые и раскаленные предметы и поверхности конвейера и т.д.

Также возникновение аварии связанной с взрывом возможно при взрыве МВС. При взрыве МВС образуется избыточное давление ударной волны которое приводит угольную пыль в взвешенное состояние.

Учитывая выше изложенное, выделяется следующий сценарий развития аварии: появление в рудничной атмосфере превышений метана → появление источника воспламенения → детонация МВС → угольная пыль переходит во взвешенное состояние → детонация, взрыв ПВС → избыточное давление с последующим разрушением (повреждением) выработки, элементов крепи и др.

Таким образом, авария на угольной шахте с взрывом может проявляться в виде эффекта «домино», взрыв МВС с последующей детонацией ПВС.

6.2 Анализ аварийного риска в угольной шахте

Величина образовавшегося избыточного давления ΔP , кПа, при сгорании метановоздушной смеси определяется, по формуле [43]:

$$\Delta P = P_0 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_{\text{пр}}}}{r} + 3 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_{\text{пр}}^2}}{r^2} + 5 \cdot \frac{m_{\text{пр}}}{r^3} \right) \quad (6.1)$$

где r - расстояние от центра метановоздушного облака, м;

P_0 - атмосферное давление, кПа;

$m_{\text{пр}}$ - приведенная масса метановоздушной смеси, кг, определяемая по формуле [43]:

$$m_{\text{пр}} = M \cdot Z \cdot \frac{Q_{\text{сг}}}{Q_0} \quad (6.2)$$

где $Q_{\text{сг}}$ - удельная теплота сгорания метана, равная $50,2 \cdot 10^6$ Дж/кг;

Z - коэффициент участия горючих газов и паров в горении, который допускается принимать равным 0,5;

Q_0 - константа, равная $4,52 \cdot 10^6$ Дж/кг;

M - масса горючих газов, поступивших в результате аварии в окружающее пространство, кг.

Масса горючего вещества, определяется по формуле [43]:

$$M = p \cdot V \quad (6.3)$$

где p - плотность метана равная $0,657$ кг/м³.

Величина импульса волны давления i , Па·с, вычисляется по формуле [43]:

$$i = 123 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_{пр}}}{r} \quad (6.4)$$

Расчетная величина избыточного давления ΔP , кПа, пылевоздушной смеси может быть установлена с учетом величины эффективного энергозапаса взрывчатой смеси, которая зависит от объема смеси и содержания в ней угольной пыли [38]:

$$\Delta P = \frac{m_i \cdot H_T \cdot P_0 \cdot Z}{V_{II} \cdot \rho \cdot C_B \cdot T_0 \cdot K_H} \quad (6.5)$$

где: P_0 – атмосферное давление, Па;

m_i – масса вещества в смеси, кг;

H_T – теплота сгорания истекающего вещества, Дж/кг;

Z – доля участия взвешенной горючей пыли при сгорании пылевоздушной смеси (0,5 при газе и пыли; 0,3 при парах жидкости; 1 при водороде);

V_{II} – свободный объем помещения, который принимается как 80 % от геометрического объема помещения, м³;

ρ – плотность воздуха до сгорания пылевоздушной смеси при начальной температуре T_0 , кг/м³;

C_B – теплоемкость воздуха, кДж (кг К);

T_0 – начальная температура воздуха в помещении, К;

K_H – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения (принимается равным 3).

$$m_i = V_{св} \cdot C_{max} \quad (6.6)$$

где $V_{св}$ – свободный объем горной выработки, м³;

$$V_{св} = 0,8 \cdot V_n \quad (6.7)$$

где V_n – общий объем выработки, м³.

C_{max} - количество угольной пыли, которая могла сгореть в 1 м³ воздуха определяемое по формуле [43]:

$$C_{max} = \frac{1}{V_{вз}} \quad (6.8)$$

где $V_{вз}$ - необходимое количество воздуха для горения 1 кг угольной пыли при рабочих условиях, равная 9,08 м³/кг.

Степень и характер поражения, производимой избыточным давлением, зависят от мощности взрыва и расстояния от центра взрыва. В таблице 6.1 представлены критерии поражения рабочих находящихся в шахте в зависимости от избыточного давления.

Таблица 6.1 – Сравнительные данные по действию избыточного давления во фронте ударной волны [44]

Избыточное давление, МПа	Действие избыточного давления на различные объекты и оснащение горных выработок		Степень поражения рабочих
	Наименование объекта или оснащения	Степень воздействия избыточного давления	
1	2	3	4
0,003-0,01	Крепь и оборудование	Отсутствие заметных повреждений	Отсутствие норм
0,011-0,02	Деревянная крепь	Частичное разрушение	Легкие травмы, ушибы
	Вентиляционные сооружения (перемычки)	Нарушение герметичности	
0,021-0,06	Деревянная крепь. Вентиляционные сооружения	Значительные разрушения. Образования куполов	Травмы средней тяжести при давлении до 0,04 Мпа: контузии, потеря сознания, вывихи, переломы
	Вентиляционные трубопроводы	Полное разрушение. Обрыв крепей	
	Кабели и электросети	Обрываются с нарушением целостности изоляции	Тяжелые травмы при давлении до 0,06 Мпа: повреждение внутренних органов, тяжелые сотрясения мозга, переломы
	Оборудование массой до 1 тн (лебедки, пускатели и т.п.)	Смещение с фундаментов, опрокидывание, поломка	
0,061-0,3	Шахтные вагонетки порожние	Деформация боковых стенок кузова	Крайне тяжелые травмы, вплоть до нарушения целостности организма при
	Деревянная крепь	Полное разрушение с образованием сплошных завалов	

	Сборный железобетон	Значительные разрушения с образованием куполов	давлении до 0,15 МПа
	Металлическая и бетонная крепь	Частичное разрушение, образование трещин	
	Монолитный железобетон	Незначительные повреждения, образования трещин	Значительная вероятность смертельного поражения при давлении до 0,3 МПа
	Железнодорожные пути шахтного транспорта	Отрыв рельсов от шпал, деформация рельсов	
	Оборудование массой до 1 тн	Нарушение целостности, деформации, перемещения	
	Шахтные вагонетки (груженые)	Сбрасывание с рельсов. Общая деформация кузова и рамы	
	Оборудование массой более 1 тн (комбайны, электровозы)	Опрокидывание, смещения, деформация частей и деталей	
0,31-0,65	Сборный железобетон и металлическая крепь	Полное разрушение на всем протяжении выработки с образованием сплошного завала	При давлении 0,4 МПа 100% вероятность смертельного поражения людей
	Бетонная крепь	Значительные повреждения с образованием куполов	
	Монолитный железобетон	Частичные разрушения с образованием глубоких трещин и нарушением целостности бетона	
	Оборудование и оснащение	Полное разрушение	
0,66-1,7	Бетонная крепь. Монолитный железобетон	Полное разрушение с образованием сплошных завалов. Значительные разрушения с повреждением арматуры	При давлении 0,4 МПа 100% вероятность смертельного поражения людей
	Монолитный железобетон	Полное разрушение с образованием полных завалов	

Температура продуктов сгорания угольной пыли определяется по формуле [42]:

$$T_{\Gamma} = T_{\text{воз}} + q \cdot \frac{c_{\text{max}}}{c \cdot \rho} \quad (6.9)$$

где q – теплота, выделяющаяся при сгорании 1 кг угольной пыли, кДж/кг;

c – удельная теплоемкость воздуха, равная 1,1 кДж/(кг·К);

ρ – плотность воздуха, равная $\rho=1,2 \text{ кг/м}^3$;

$T_{\text{воз}}$ - температура воздуха при рабочих условиях, равная 278 К.

Давление избыточного давления, распространяющейся через местные сопротивления в виде поворотов, сопряжений и т.п., определяется по формуле [45]:

$$\Delta P_{\phi} = \frac{0,4 - 0,29 + \sqrt{(0,4 \cdot A - 0,29)^2 + 2,8A}}{4,8} \quad (6.10)$$

где ΔP_{ϕ} – избыточное давление во фронте взрывной волны после прохождения местного сопротивления, МПа;

A - величина, определяемая по таблице 6.2 в зависимости от вида местного сопротивления, МПа.

Таблица 6.2 - Расчетные формулы определения величины A для различных видов местных сопротивлений [45]

№ п/п	Виды сопротивлений	Расчетные формулы
1	$0^{\circ} < \gamma < 90^{\circ}$	$A_{\text{пов}} = \Delta P_{\phi} + \frac{5\Delta P_{\phi}^2(1 - 0,25\sin^2\gamma)}{\Delta P_{\phi} + 0,72}$
2	$\gamma = 90^{\circ}$	$A_{\text{пов}} = \Delta P_{\phi} + \frac{4\Delta P_{\phi}^2}{\Delta P_{\phi} + 0,72}$
3	$90^{\circ} < \gamma < 180^{\circ}$	$A_{\text{пов}} = \Delta P_{\phi} + \frac{4\Delta P_{\phi}^2}{\Delta P_{\phi} + 0,72} + \frac{\Delta P_{\phi}^2 \cdot \cos^2\gamma}{\Delta P_{\phi} + 0,72}$

В таблице 6.2 обозначены через ΔP_{ϕ} - давление во фронте ударной волны перед местным сопротивлением, МПа; γ - величина угла поворота или сопротивления.

6.3. Пример моделирования аварийного риска в угольной шахте

Пример 6.1. Провести оценку последствий аварийного выброса метана в выработке угольной шахты из трещин породы в объеме $0,02 \text{ м}^3$. В выработке имеется поворот в 90° .

Решение.

Определим массу горючего вещества по формуле 6.3:

$$M = 0,657 \cdot 0,02 = 0,013 \text{ кг}$$

Приведенную массу метановоздушной смеси определим по формуле 6.2:

$$m_{\text{пр}} = 0,013 \cdot 0,5 \cdot \frac{50,2 \cdot 10^6}{4,52 \cdot 10^6} = 0,07 \text{ кг}$$

По полученным значениям определим избыточное давление, образующееся при сгорании метановоздушной смеси на расстоянии 10, 20, 30, 40 и 50 м. от эпицентра взрыва по формуле 6.1:

$$\Delta P_{10} = 101,2 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,07}}{10} + 3 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,07^2}}{10^2} + 5 \cdot \frac{0,07}{10^3} \right) = 3,8 \text{ кПа}$$

$$\Delta P_{20} = 101,2 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,07}}{20} + 3 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,07^2}}{20^2} + 5 \cdot \frac{0,07}{20^3} \right) = 1,7 \text{ кПа}$$

$$\Delta P_{30} = 101,2 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,07}}{30} + 3 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,07^2}}{30^2} + 5 \cdot \frac{0,07}{30^3} \right) = 1,1 \text{ кПа}$$

$$\Delta P_{40} = 101,2 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,07}}{40} + 3 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,07^2}}{40^2} + 5 \cdot \frac{0,07}{40^3} \right) = 0,8 \text{ кПа}$$

$$\Delta P_{50} = 101,2 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,07}}{50} + 3 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,07^2}}{50^2} + 5 \cdot \frac{0,07}{50^3} \right) = 0,6 \text{ кПа}$$

Определим величину импульса волны давления i на расстоянии 10, 20, 30, 40 и 50 м. от эпицентра взрыва по формуле 6.4:

$$i_{10} = 123 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,07}}{10} = 5 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$i_{20} = 123 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,07}}{20} = 2,5 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$i_{30} = 123 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,07}}{30} = 1,7 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$i_{40} = 123 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,07}}{40} = 1,3 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$i_{50} = 123 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,07}}{50} = 1,0 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Таким образом, на расстояние до 50 м. от эпицентра взрыва произойдет поднятие пыли во взвешенное состояние, что в свою очередь приведет к образованию пылевоздушной смеси с последующим возгоранием.

Определим количество угольной пыли, которая может сгореть в 1 м³ воздуха по формуле 6.8:

$$C_{max} = \frac{1}{9,08} = 0,110 \text{ кг/м}^3$$

Свободный объем горной выработки рассчитаем по формуле 6.7:

$$V_{св} = 0,8 \cdot 1920 = 1536 \text{ м}^3$$

Определим массу пыли в смеси по формуле 6.6:

$$m_i = 1536 \cdot 0,110 = 169 \text{ кг}$$

Величина избыточного давления ΔP пылевоздушной смеси рассчитанная по формуле 6.5 составит:

$$\Delta P = \frac{169 \cdot 25 \cdot 10^6 \cdot 101,2 \cdot 10^3 \cdot 0,5}{1536 \cdot 1,2 \cdot 1010 \cdot 293 \cdot 3} = 130,6 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

Определим давление избыточного давления, распространяющейся через местные сопротивления в повороте 90° по формуле 6.10:

$$A_{пов} = 130,6 \cdot 10^3 + \frac{4 \cdot (130,6 \cdot 10^3)^2}{130,6 \cdot 10^3 + 0,72} = 652997,1$$

$$\Delta P_{\phi} = \frac{0,4 - 0,29 + \sqrt{(0,4 \cdot 652997,1 - 0,29)^2 + 2,8 \cdot 652997,1}}{4,8} = 54,4 \cdot 10^3$$

Согласно таблице 6.1, в рассматриваемой горной выработке при избыточном давлении 0,13 МПа все работники получают крайне тяжелые

травмы, вплоть до нарушения целостности организма. Металлическая крепь и бетонная крепь получают полное разрушение с образованием завалов.

Работники, находящиеся за поворотом, получают тяжелые травмы: повреждение внутренних органов, тяжелые сотрясения мозга, переломы. Оборудование массой до 1 тн (лебедки, пускатели и т.п.) будут смещены с фундаментов, опрокинуты и поломаны.

Рассчитаем температуру горения угольной пыли по формуле 6.9:

$$T_r = 278 + 22191 \cdot \frac{0,110}{1,1 \cdot 1,2} = 2130 \text{ K}$$

Таким образом, температура сгорания угольной пылевоздушной смеси составит $(2130-273) = 1857 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.4 Задание для самостоятельной работы

Задание 6.1. Провести оценку последствий аварийного выброса метана $V, \text{ м}^3$ в выработке угольной шахты объем $W, \text{ м}^3$. В выработке имеется поворот в γ° . Решение задачи выполнить в соответствии с данными, приведенными в таблице 6.3.

Таблица 6.3 Исходные данные для решения задачи

№ варианта	$V, \text{ м}^3$	$W, \text{ м}^3$	γ°
1	0,05	1750	58
2	0,08	1950	99
3	0,09	2250	150
4	0,1	2650	110
5	0,15	2500	45
6	0,18	3100	90
7	0,2	2000	180
8	0,22	2150	125
9	0,28	2450	175
10	0,25	2600	60

7. Анализ аварийного риска сосудов работающих под давлением

7.1 Расчет параметров взрыва резервуара с водяным паром

В различных отраслях промышленности используется оборудование, работающее под избыточным давлением пара, газа или воды, которое при неправильной эксплуатации может приводить к инцидентам, авариям и чрезвычайным ситуациям. Оборудованием, работающим под избыточным давлением, является оборудование, функционирующее под давлением более 0,07 мегапаскаля (МПа) [46]:

- а) пара, газа (в газообразном, сжиженном состоянии);
- б) воды при температуре более 115 °С;
- в) иных жидкостей при температуре, превышающей температуру их кипения при избыточном давлении 0,07 МПа.

Примерами такого оборудования являются котлы (паровые, водогрейные и др.), трубопроводы для транспортирования газообразных, парообразных и жидких сред, сосуды, работающие под избыточным давлением пара, газов и жидкостей, газовые баллоны, барокамеры.

Взрывы могут происходить при разрыве резервуара с перегретой водой, например в паровых котлах. В барабане парового котла находится кипящая вода при высоком давлении. При разрыве стенки барабана котла давление в нем резко падает до атмосферного. Перегретая вода, имеющая большой запас энергии, мгновенно вскипает. Происходит адиабатное (изоэнтропическое) расширение воды. Образуется большое количество пара, который разрывает барабан котла, и происходит физический взрыв [47].

Последствия таких взрывов очень тяжелые, т.к. кроме больших разрушений персонал подвергается термическому воздействию горячей воды и пара, что приводит в конечном итоге к тяжелым травмам и смерти.

Разрыв резервуара в очаге пожара с образованием волн давления получил в мировой практике название *BLEVE* (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion – взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости) [36].

Возможность возникновения взрыва *BLEVE* для конкретного вещества, хранящегося в замкнутой емкости, зависит от многих параметров.

Для определения возможности возникновения взрыва необходимо на первом этапе определить параметр δ по формуле [20]:

$$\delta = \frac{h_B - h_{BH}}{r_{\text{исп}}} \quad (7.1)$$

где h_B – удельная энтальпия воды в барабане котла при заданном давлении P_B , кДж/(кг);

h_{BH} – удельная энтальпия кипящей воды при атмосферном давлении, кДж/кг.

При расчетах ее можно принимать равной $h_{BH} = 419,1$ кДж/кг;

$r_{\text{исп}}$ – удельная теплота испарения воды при атмосферном давлении, кДж/кг.

Если испарение воды происходит при атмосферном давлении, то при расчетах ее можно принимать равной $r_{\text{исп}} = 2257$ кДж/кг.

Значения удельной энтальпии воды в зависимости от давления в барабане котла приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 - Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения

Абсолютное давление P_B , МПа	Энтальпия воды h_B , кДж/кг	Теплота испарения $r_{\text{исп}}$, кДж/кг
4,4	1110	1689
4,6	1123	1675
4,8	1136	1161
5,0	1149	1646
5,5	1177	1612
6,0	1207	1579
6,5	1234	1546
7,0	1260	1514
7,5	1285	1482
8,0	1310	1451
8,5	1333	1420
9,0	1356	1390
9,5	1378	1360
10,0	1399	1329

Если в результате расчета получаем, что $\delta < 0,35$, взрыва BLEVE не происходит. В противном случае, при $\delta \geq 0,35$, вероятность возникновения данного явления велика. Расчет избыточного давления ΔP может быть сделан по формуле [36]:

$$\Delta P = P_0 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_{\text{пр}}}}{r} + 3 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_{\text{пр}}^2}}{r^2} + 5 \cdot \frac{m_{\text{пр}}}{r^3} \right) \quad (7.2)$$

где r - расстояние от центра взрыва, м;

P_0 - атмосферное давление, кПа;

$m_{\text{пр}}$ - приведенная масса воды, кг, определяемая по формуле [36]:

$$m_{\text{пр}} = M_{\text{в}} \cdot \frac{h_{\text{в}} - h_{\text{вн}}}{Q_0} \quad (7.3)$$

где $h_{\text{в}} - h_{\text{вн}}$ - разность энтальпий в числителе показывает значение удельной тепловой энергии, выделяющейся при адиабатном расширении 1 кг кипящей воды, находящейся в барабане котла, кДж/кг;

Q_0 - константа, равная $4,52 \cdot 10^6$ Дж/кг;

$M_{\text{в}}$ - масса воды в барабане котла до взрыва, кг.

Масса воды до взрыва, кг, может быть определена, если известен объем воды в барабане котла, по формуле [45]:

$$M_{\text{в}} = \frac{V_{\text{в}}}{\varphi} \quad (7.4)$$

где $V_{\text{в}}$ - объем воды в барабане котла, м³;

φ - удельный объем кипящей воды при атмосферном давлении в барабане, м³/кг. При расчетах ее можно принимать равной $\varphi = 0,001044$ м³/кг.

Величина импульса волны давления i , Па·с, вычисляется по формуле [36]:

$$i = 123 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_{\text{пр}}}}{r} \quad (7.5)$$

Масса образовавшегося при взрыве пара $M_{\text{п}}$, кг, может быть определена по формуле [46]:

$$M_{\text{п}} = \frac{M_{\text{в}} \cdot (h_{\text{в}} - h_{\text{вн}})}{r_{\text{исп}}} \quad (7.6)$$

Объем образовавшегося пара, м³, определяется по формуле [47]:

$$V_{\text{п}} = M_{\text{п}} \cdot \epsilon \quad (7.7)$$

где ϵ - удельный объем пара в состоянии насыщения при атмосферном давлении, м³/кг. Его можно принимать равным $\epsilon = 1,675$ м³/кг.

7.2 Расчет параметров взрыва резервуара с химически инертным газом

Достаточно часто на производстве происходят аварии, сопровождающиеся физическими взрывами, т.е. когда сосуд или трубопровод, содержащие газ или пар под высоким давлением, разрушаются, что приводит к высвобождению значительной потенциальной энергии. Работу, Дж, которую совершает сжатый газ при физическом взрыве и которая соответствует энергии взрыва, ориентировочно можно определить по формуле [47]:

$$W = \frac{P_1 - P_0}{k - 1} \cdot V \quad (7.8)$$

где V – объем сосуда со сжатым газом, м³;

P_1 – давление сжатого газа в сосуде до взрыва, Па;

P_0 – атмосферное давление окружающей среды, до которого происходит расширение сжатого газа, Па;

k – показатель адиабатного расширения сжатого газа. При оценочных расчетах можно принять: $k = 1,67$ – для одноатомных газов; $k = 1,4$ – для двухатомных газов; $k = 1,33$ – для трех и многоатомных газов.

Масса газа в сосуде M , кг, может быть определена из уравнения состояния [47]:

$$M = \mu \cdot \frac{P_1 \cdot V}{R \cdot T} \quad (7.9)$$

где μ – молекулярная масса газа, кг/кмоль;

R – универсальная газовая постоянная, равная 8314 Дж/(кмоль К);

T – температура сжатого газа в сосуде до взрыва, К.

Приведенная масса расширяющегося газа в тротиловом эквиваленте, кг, может быть определена по формуле [47]:

$$m_{\text{тр}} = \frac{W}{Q_T} \quad (7.10)$$

где Q_T – удельная энергия взрыва тринитротолуола (тротила), кДж/кг. При расчетах она может быть принята равной $4,52 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Зная приведенную массу $m_{пр}$, по формуле (7.2) можно определить избыточное давление во фронте создаваемой ударной волной ΔP , а также импульс волны давления i формуле (7.5).

7.3 Расчет параметров волны давления при взрыве резервуара с перегретой жидкостью или сжиженным газом при воздействии на него очага пожара

При пожарах возможны взрывы различных баллонов со сжиженным газом или перегретой жидкостью. Замкнутый резервуар может оказаться в очаге пожара, происходит нагрев его содержимого до температуры, существенно превышающей нормальную температуру кипения, с соответствующим повышением давления. За счет нагрева несмоченных стенок сосуда уменьшается предел прочности их материала, в результате чего при определенных условиях оказывается возможным разрыв резервуара с возникновением волн давления и образованием «огненного шара».

На первом этапе расчета определяется возможность возникновения при пожаре взрыва *BLEVE*, для чего определяется параметр δ по формуле [46]:

$$\delta = \frac{c_p}{Q_{исп}} (T_n - T_{кип}) \quad (7.11)$$

где C_p – удельная теплоемкость жидкости в емкости, кДж/(кг·К);

T_n – температура жидкости, соответствующая температуре насыщенного пара при давлении срабатывания установленного предохранительного клапана, К;

$T_{кип}$ – температура кипения жидкости при атмосферном (нормальном) давлении, К;

$Q_{исп}$ – удельная теплота испарения жидкости при температуре кипения $T_{кип}$, кДж/кг.

Значения теплоты испарения, температуры кипения и удельной теплоемкости среды в жидкой фазе при нормальном давлении приводятся в справочниках, или они могут быть взяты для некоторых веществ по таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Теплофизические свойства веществ при давлении 101,2 кПа

Соединение	$T_{\text{кип}}, \text{ К}$	$Q_{\text{исп}}, \text{ кДж/кг}$	$C_p, \text{ кДж/(кг·К)}$	Константы уравнения Антуана		
				A	B	C_A
Ацетальдегид	293,3	584	2,180	7,18246	1287,625	161,330
Ацетон	329,3	525	2,491	7,25058	1281,741	237,088
Бензол	353,3	394	1,674	6,98426	1252,776	225,178
Гексан	341,9	332	2,262	6,87024	1166,274	223,661
Гептан	371,6	316	2,180	6,95154	1295,405	219,819
Диэтилэфир	307,7	384	2,320	6,99790	1098,945	232,372
Изобутан	261,5	366	2,240	5,95318	916,054	243,783
Изопентан	300,9	342	1,647	6,79306	1022,551	233,493
Изопропилбензол	370,3	316	1,717	6,93773	1460,668	207,652
Метилловый спирт	337,7	1100	2,547	8,22777	1660,454	245,818
<i>n</i> -Петан	282,7	315	1,670	6,84715	1062,555	231,805
<i>n</i> -Бутан	272,6	385	2,240	6,00525	968,098	242,555
<i>n</i> -Петан	309,3	357	2,670	5,97208	1062,555	231,805
<i>n</i> -Пропиловый спирт	370,3	750	0,766	8,31708	1751,981	225,125
Пропилен	225,5	438	2,430	5,94852	786,532	247,243
Толуол	383,6	412	1,138	6,0507	1328,171	217,713
Уксусная кислота	391,0	406	2,010	7,79545	1789,908	245,908
Хлорбензол	404,8	313	1,221	7,26112	1067,316	235,351
Циклогексан	353,0	358	1,859	6,64788	1095,531	210,064
Этиловый спирт	351,5	840	2,428	8,68665	1918,508	252,125

Приведенная масса расширяющегося газа определяется по формуле [47]:

$$m_{\text{пр}} = \frac{Q_A}{Q_0} \quad (7.12)$$

где Q_A – тепловая энергия, выделяющаяся при адиабатическом расширении жидкости, находящейся в резервуаре, кДж.

Значение выделяющейся при взрыве энергии, кДж, рассчитывается по формуле [46]:

$$Q_A = C_i \cdot m_{\text{ж}}(T - T_{\text{кип}}) \quad (7.13)$$

где $m_{\text{ж}}$ – масса жидкости в резервуаре, кг;

C_i – константа, равная 0,5 кДж/(кг·К);

T – температура вещества в резервуаре в момент его взрыва, К.

При наличии в резервуаре установленного предохранительного клапана температуру вещества T_H , К, рассчитывают по формуле [47]:

$$T_H = \frac{B}{A - \lg P_K} - C_A + 273,15 \quad (7.14)$$

где A , B , C_A – константы уравнения Антуана для определенного вещества, приведены в таблице 7.2;

C_A – давление срабатывания предохранительного клапана, кПа. Константа A должна соответствовать давлению, выраженному в кПа.

7.4 Примеры моделирования аварийного риска сосудов работающих под давлением

Пример 7.1. При работе парового котла из-за нарушения технологического режима произошло повышение давления в барабане котла, и образовалась трещина. Произошел резкий сброс давления до атмосферного. Это вызвало мгновенное вскипание и испарение воды, что привело к взрыву. Рассчитать избыточное давление и импульс положительной фазы волны давления при взрыве барабана парового котла, имеющего объем 10 м^3 , заполненный наполовину кипящей водой под давлением $P_B = 10 \text{ МПа}$. Расстояние от центра взрыва до объекта составляет 15 м.

Определим массу воды до взрыва по формуле 7.4:

$$M_B = \frac{10}{0,001044} = 9578,5 \text{ кг}$$

Рассчитаем приведенную массу воды по формуле 7.3:

$$m_{пр} = 9578,5 \cdot \frac{1399 \cdot 10^3 - 419,1 \cdot 10^3}{4,52 \cdot 10^6} = 2076,5$$

Рассчитаем избыточное давление и импульс волны давления на расстоянии 15 м по формулам 7.1 и 7.5:

$$\Delta P = P_0 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{\sqrt[3]{2076,5}}{15} + 3 \cdot \frac{\sqrt[3]{2076,5^2}}{15^2} + 5 \cdot \frac{2076,5}{15^3} \right) = 610,8 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$i = 123 \cdot \frac{\sqrt[3]{2076,5}}{15} = 104,3 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Масса образовавшегося при взрыве пара составит (7.6):

$$M_{\text{п}} = \frac{9578,5 \cdot (1399 \cdot 10^3 - 419,1 \cdot 10^3)}{1329 \cdot 10^3} = 7062,4 \text{ кг}$$

Объем образовавшегося пара составит (7.7):

$$V_{\text{п}} = 7062,4 \cdot 1,675 = 11829,6 \text{ м}^3$$

где ϵ – удельный объем пара в состоянии насыщения при атмосферном давлении, $\text{м}^3/\text{кг}$. Его можно принимать равным $\epsilon = 1,675 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Используя полученные значения ΔP и i находим:

- для тяжелых разрушений по формуле 5.102:

$$\text{Pr} = 5,0 - 0,26 \cdot \ln \left(\frac{17500}{610,8 \cdot 10^3} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{104,3} \right)^{9,3} = 2,53$$

- для полного разрушения по формуле 5.104:

$$\text{Pr} = 5,0 - 0,22 \cdot \ln \left(\frac{4000}{610,8 \cdot 10^3} \right)^{7,4} + \left(\frac{460}{104,3} \right)^{11,3} = 1,3$$

- вероятность длительной потери управляемости у людей по формуле 5.107:

$$\text{Pr} = 5,0 - 5,74 \cdot \ln \left(\frac{4,2}{7} + \frac{1,3}{0,08} \right) = -11,2$$

- вероятность разрыва барабанных перепонки у людей от уровня перепада давления в воздушной волне определяется (5.111):

$$\text{Pr} = -12,6 + 1,524 \cdot \ln 610,8 \cdot 10^3 = 7,7$$

- вероятность отброса людей волной давления определяется по формуле 5.112:

$$\text{Pr} = 5,0 - 2,44 \cdot \ln \left(\frac{7,38 \cdot 10^3}{610,8 \cdot 10^3} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{610,8 \cdot 10^3 \cdot 104,3} \right) = -2,4$$

Согласно таблице 5.6 означает: 99,6 % вероятность разрыва барабанных перепонок у людей. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

Пример 7.2. В сферическом резервуаре радиусом 2 м давление азота в момент взрыва составило 3,2 МПа при температуре 300 К. Молекулярная масса азота равна 28,013 кг/моль. Определить энергию взрыва и избыточное давление на расстоянии 500 м от эпицентра взрыва.

Решение. Рассчитаем массу сжатого газа в резервуаре, кг, по формуле (7.9):

$$M = 28,013 \cdot \frac{3,2 \cdot 10^6 \cdot 2}{8314 \cdot 300} = 71,9 \text{ кг}$$

Объем сферического резервуара, м³, составляет:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot 2^3 = 33,5 \text{ м}^3$$

По формуле 7.8 определим энергию взрыва:

$$W = \frac{3,2 \cdot 10^6 - 101,2 \cdot 10^3}{1,4 - 1} \cdot 33,5 = 2,6 \cdot 10^8$$

Приведенную массу рассчитаем по формуле (7.10):

$$m_{\text{пр}} = \frac{2,6 \cdot 10^8}{4,52 \cdot 10^6} = 57,5$$

Рассчитаем избыточное давление и импульс волны давления на расстоянии 50 м по формулам 7.2 и 7.5:

$$\Delta P = 101,2 \cdot 10^3 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{\sqrt[3]{57,5}}{50} + 3 \cdot \frac{\sqrt[3]{57,5^2}}{50^2} + 5 \cdot \frac{57,5}{50^3} \right) = 8,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$i = 123 \cdot \frac{\sqrt[3]{57,5}}{50} = 9,4 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Пример 7.3. При пожаре в цехе в зоне очага горения оказался баллон, в котором находилось 24 кг бензола. В результате нагрева оболочка баллона не выдержала и разрушилась. Бензол испарился, и его пары взорвались. Температура паров бензола в момент взрыва составила 500 К. Определить, какое избыточное давление в положительной фазе волны давления создается на расстоянии 5 м от баллона?

Решение. Определим, относится ли данный взрыв к взрыву *BLEVE*, для чего найдем параметр δ по формуле (7.11):

$$\delta = \frac{1,674}{394} (500 - 353,3) = 0,623$$

Так как параметр $\delta = 0,623 > 0,35$, то произойдет взрыв *BLEVE*.

Определим значение энергии, кДж, выделяющейся при взрыве, по формуле (7.13):

$$Q_A = 0,5 \cdot 24(500 - 353,3) = 1766$$

Приведенная масса расширяющегося газа определим по формуле (7.12):

$$m_{пр} = \frac{1766}{4520} = 0,391$$

Рассчитаем избыточное давление и импульс волны давления на расстоянии 5 м по формулам 7.2 и 7.5:

$$\Delta P = 101,2 \cdot 10^3 \cdot \left(0,8 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,391}}{5} + 3 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,391^2}}{5^2} + 5 \cdot \frac{0,391}{5^3} \right) = 19,8 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$i = 123 \cdot \frac{\sqrt[3]{0,391}}{5} = 17,9 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

7.5 Задания для самостоятельной работы

Задание 7.1. При работе парового котла из-за нарушения технологического режима произошло повышение давления в барабане котла и образовалась трещина. Произошел резкий сброс давления до атмосферного. Это вызвало мгновенное вскипание и испарение воды, что привело к взрыву.

Рассчитать избыточное давление и импульс волны давления при взрыве барабана парового котла, имеющего объем V , заполненный наполовину кипящей водой под давлением P_B . Относится ли этот взрыв к взрыву BLEVE? Сколько образовалось при взрыве пара по массе и объему? Какое создалось избыточное давление ΔP и чему равен импульс волны давления i ? К каким последствиям приведет данный взрыв, если расстояние от центра взрыва до объекта составляет r ?

Решение задачи выполнить в соответствии с данными, приведенными в таблице 7.3.

Таблица 7.3 Исходные данные для решения задачи

№ варианта	Давление кипящей воды в барабане котла P_B , МПа	Объем барабана котла V , м ³	Расстояние r , м
1	4,8	4	5
2	10,0	8	10
3	7,0	6	8
4	6,5	10	15
5	5,5	7	20
6	9,0	16	21
7	4,4	11	9
8	8,5	20	24
9	9,5	24	10
10	7,5	26	7
11	4,4	6	2
12	8,0	27	14
13	6,0	22	20
14	5,8	17	7
15	4,2	5	10

Задание 7.2. На промышленной площадке находится металлическая цистерна цилиндрической формы, в которой находится газ под давлением. Вследствие неправильных действий обслуживающего персонала произошла разгерметизация сосуда. Произошел физический взрыв.

Рассчитать избыточное давление ΔP и импульс волны давления i при разрыве цилиндрического сосуда, если в нем находился химически инертный газ с давлением P_1 и температурой T . Диаметр сосуда d , длина l . Расстояние от эпицентра взрыва r . Чему будет равна энергия взрыва, и к каким последствиям приведет данный взрыв, если расстояние от центра взрыва до объекта составляет r ?

Решение задачи выполнить в соответствии с данными приведенными в таблице 7.4.

Таблица 7.4 Исходные данные для решения задачи

№ п/п	Газ	μ , кг/моль	P_1 , МПа	T , К	Размеры сосуда, м		r , м
					d	l	
1	Азот	28,013	2	296	1	2,5	10
2	Кислород	31,999	3	302	2	3,1	15
3	Диоксид углерода	44,01	4	308	1,2	3	5
4	Гелий	4,003	5	304	2,1	4,1	25
5	Воздух	28,98	6	296	1,1	4,8	30
6	Аргон	39,948	2,4	298	2,3	6,5	35
7	Неон	20,179	3,6	303	1,3	7,4	45
8	Хлор	35,45	4,2	299	2,4	8,2	50
9	Криптон	83,80	5,6	301	1,4	9,1	40
10	Ксенон	131,30	2,7	305	1,5	2,2	55
11	Азот	28,013	4,8	307	0,9	1,8	60
12	Кислород	31,999	3,9	279	0,8	1,4	75
13	Диоксид углерода	44,01	5,8	287	1,1	3,8	65
14	Гелий	4,003	3,6	292	2,1	4,7	70
15	Воздух	28,98	4,5	295	1,6	7,2	90

Задание 7.3. Рассчитать избыточное давление и импульс фазы сжатия при пожаре и нагреве цистерны со сжатым углеводородным соединением, если сработает предохранительный клапан. Связан ли этот взрыв с развитием взрыва *BLEVE*?

В цистерне находится углеводородное соединение в жидкой фазе массой $m_{\text{ж}}$ при температуре 293 К. Давление срабатывания клапана P_K равно 2,0 МПа. К каким последствиям приведет данный взрыв, если расстояние от эпицентра взрыва до объекта составляет r .

Решение задачи выполнить в соответствии с данными приведенными в таблице 7.5.

Таблица 7.5 Исходные данные для решения задачи

№ п/п	Газ	$m_{\text{ж}}$, кг	r , м	P_K , МПа
1	Ацетальдегид	1000	15	5
2	Ацетон	1500	25	3,5
3	Бензол	1800	35	4
4	Гексан	2000	12	5
5	Гептан	2200	20	6
6	Диэтилэфир	2400	25	2,4
7	Изобутан	2600	55	3,6
8	Изопентан	3000	40	4,2
9	Изопропилбензол	3200	50	5,6

10	Метиловый спирт	3400	65	2,7
11	<i>n</i> -Петан	3800	70	4,8
12	<i>n</i> -Бутан	4000	25	3,9
13	<i>n</i> -Петан	4200	30	5,8
14	<i>n</i> -Пропиловый спирт	2800	42	3,6
15	Пропилен	10000	18	4,5

Список литературы

1. Алымов, В.Т. Техногенный риск. Анализ и оценка: учебное пособие для вузов/ В.Т. Алымов – М.: Академкнига, 2004. – 118 с.
2. Егоров, А.Ф. Анализ риска, оценка последствий аварий и управление безопасностью химических, нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств/ А.Ф. Егоров, Т.В. Савицкая – М.: КолосС, 2010. - 526 с.
3. Приказ Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 30.12.2014 г. №341 «Об утверждении Правил, определяющих критерии отнесения опасных производственных объектов к декларируемым, и Правил разработки декларации промышленной безопасности опасного производственного объекта» [Электрон. ресурс]. – URL: <http://adilet.zan.kz>.
4. Лисанов, М.В. О техническом регулировании и критериях приемлемого риска/ М.В. Лисанов // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – №5. – С. 11-14.
5. Основные показатели риска в терминах теории вероятностей/ Гражданкин А.И., Дегтярев Д.В., Лисанов М.В. и др.// Безопасность труда в промышленности. – 2002. – №7. – С. 35-39.
6. Галеев А.Д. Анализ риска аварий на опасных производственных объектах : учебное пособие / А. Д. Галеев, С. И. Поникаров; Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2017. – 152 с.
7. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере / П.Г. Белов. – М.: Академия, 2003. – 512 с.
8. Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р. Техногенный риск и безопасность. Учебное пособие. Пенза. -2002. -171 с.
9. Bosch, C.J.H. van den Yellow Book, Methods for the calculation of the physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases) / C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M. Weterings - Third edition. - The Netherlands: Committee for the Prevention of Disasters, CPR-14E, The Hague, 1997. – 870 p.
10. Blocken, B. CFD simulation of the atmospheric boundary layer / B. Blocken, T. Stathopoulos, J. Carmeliet // Atmospheric Environment. – 2007. – № 41(2). – P.238.
11. Britter, R. Toxic industrial chemical (TIC) source emissions modeling for pressurized liquefied gases / R. Britter, J. Weil, J. Leung, S. Hanna // Atmospheric Environment. – 2011. – № 45. – P. 1.
12. Choudhury, D. Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling / D. Choudhury. - Lebanon, NH: Fluent Inc., 1993. – 70 p.

13. Conrado, C. The influence of chemical composition on vaporization of LNG and LPG on unconfined water surfaces / C. Conrado, V. Vesovic // Chemical engineering science. – 2000. – V 55. – P.4549.
14. Crowl, D.A. Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications / D.A. Crowl, J.F. Louvar. - 3 Ed. - Prentice Hall, 2011. – 752 p.
15. Fauske, H.K. Flashing flows: some practical guidelines for emergency releases / H.K. Fauske // Plant/Operation Progress. – 1985. – № 4. – P.132. 9. Fauske, H.K. Source term considerations in connection with chemical accidents and vapour cloud modeling / H.K. Fauske, M. Epstein // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 1988. – № 1. – P.75.
16. Fingas, M. F. Studies on the evaporation of crude oil and petroleum products: I. The relationship between evaporation rate and time / M. F. Fingas // J. Hazardous Materials. – 1997. – № 3. – P.227.
17. Fingas, M. F. Studies on the evaporation of crude oil and petroleum products: II. Boundary layer regulation / M. F. Fingas // J. Hazardous Materials. - 1998. – № 1-3. – P.41.
18. Fingas, M. F. Modeling evaporation using models that are not boundary layer regulated / M. F. Fingas // J. Hazardous Materials. – 2004. – № 1- 2. – P.27.
20. Gavelli, F. Application of CFD (Fluent) to LNG spills into geometrically complex environments / F. Gavelli, E. Bullister, H. Kytomaa // J. Hazard. Mater. – 2008. – № 159. – P .158.
21. Hanna, S. R. Modeling VOC emissions and air concentration from the Exxon Valdez oil spill / S. R. Hanna, P. J. Drivas // Air & Waste. – 1993. – N 3. – P.298.
22. Hansen, O. R. Validation of FLACS against experimental data sets from the model evaluation database for LNG vapor dispersion / O. R. Hansen, F. Gavelli, M. Ichard, S. G. Davis // J. Loss Prev. Process Ind. – 2010. – № 23. – P.857.
23. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М. : Наука, 1989. 330 с.
24. Incropera, F.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer / F.P. Incropera, D. P. DeWitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine. - 6th Edition. - Wiley, 2006. – 1024 p.
25. Kalinin, E.K. Film boiling heat transfer / E.K. Kalinin, I.I. Berlin, V.V. Kostyuk // Advances in Heat Transfer. – 1975. – № 11. – P.51.
26. Khajehnajafi, S. Correlations for mass transfer from a liquid spill: comparisons and recommendations / S. Khajehnajafi, R. Pourdarvish // Process Safety Progress. – 2011. – № 2. – P.178.

27. Launder, B. E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B. E. Launder D. B. Spalding. - London, England: Academic Press, 1972. – 169 p.
28. Law, C.K. Combustion physics / C.K. Law. - New York: Cambridge University Press, 2006. – 722 p.
29. Leonelli, P. The modeling of pool vaporization / P. Leonelli, C. Stramigioli, G. Spadoni // J. Loss Prevention Process Industries. – 1994. – № 6. – P. 443.
30. Luketa-Hanlin, A. On the application of computational fluid dynamics codes for liquefied natural gas dispersion / A. Luketa-Hanlin, R.P. Koopman, D.L. Ermak // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – № 140. – P.504.
31. Mikesell, J. L. Evaporation of contained spills of multicomponent nonideal solutions / J. L. Mikesell, A. C. Buckland, V. Diaz, J. J. Kives // Proceedings of International Conference and Workshop on Modeling and Mitigating the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials. - 1991. CCPS, AIChE. – P.103.
32. Okamoto, K. Evaporation characteristics of multi-component liquid. / K. Okamoto, N. Watanabe, Y. Hagimoto, K. Miwa, H. Ohtahi // J. Loss Prevention Process Industries. – 2010. – № 1. – P.89.
33. Papanikolaou, E. Validation of a numerical code for the simulation of a short-term CO₂ release in an open environment: Effect of wind conditions and obstacles / E. Papanikolaou, M. Heitsch, D. Baraldi // Journal of Hazardous Materials. – 2011. – № 190. – P. 268.
34. Shih, T. H. A new k- ϵ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows – model development and validation / T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, J. Zhu // Computers & Fluids. - 1995. – № 3. – P.227.
35. Schlichting, H. Boundary-Layer Theory / H. Schlichting. - 6th Edition. - New York: McGraw-Hill Book Company, 1968. – 817 p.
36. Национальный стандарт Республики Казахстан СТ РК 3019-2017 «Безопасность пожарная. Оценка пожарного риска. Метод определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» [Электрон. ресурс]. – URL: <http://adilet.zan.kz>
37. Мартынюк, В.Ф. Защита окружающей среды в чрезвычайных ситуациях: учебное пособие для вузов / В.Ф. Мартынюк, Б.Е. Прусенко. - М.: ФГУП Изд-во "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 336 с.
38. Приказ Министра по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан «Об утверждении технического регламента «Общие требования к пожарной безопасности»» от 17 августа 2021 года № 405 [Электронный

ресурс] // Информационный портал ПАРАГРАФ [сайт]. Режим доступа: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2100024045#z1460> (дата обращения 06.02.2024).

39. Шашенко А.Н. Управление устойчивостью протяженных выработок глубоких шахт: Монография / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин, А.В. Мартовицкий. Днепропетровск: ООО «ЛизуновПресс», 2012. – 384 с.

40. Васильев, А.А. Расчетные и экспериментальные параметры горения и детонации смесей на основе метана и угольной пыли / А.А. Васильев, В.А. Васильев // Научно-технический журнал «Вестник». – 2016. – № 2. – С. 8-39.

41. Гончаров, Е.В. Геодинамические методы оценки распределения метана в каменноугольных месторождениях и мероприятия по интенсификации метанопритоков при скважинных методах дегазации / Е.В. Гончаров, С.В. Цирель // Записки Горного института. – 2016. – Т. 222. – С. 803-808.

42. Медведев, А.Е. Методики оценки риска на угольных шахтах / А.Е. Медведев // Горный информационно-технический бюллетень. – 2009. – № 8. – С. 86-90.

43. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (РД 03-409-01) // Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: сборник документов. Сер. 27. Вып. 2 / Кол. авт. – М.: ЗАО «НТЦ ПБ», 2010. – 208 с.

44. Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах: рук. по безопасности. – Сер. 27. – Вып. 16. – М.: ЗАО «НТЦ ПБ», 2017. – 56 с.

45. Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на угольных шахтах: рук. по безопасности. – Сер. 05. – Вып. 52. – М.: ЗАО «НТЦ ПБ», 2017. – 36 с.

46. Сафонов, В.С. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности / В.С. Сафонов, Г.Э. Одишария, А.А. Швыряев. - М.: НУМЦ Минприроды России, 1996. – 208 с.

47. Старовойтова, Е.В. Прогнозирование последствий аварийных залповых выбросов сжиженных газов: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.03 / Старовойтова Евгения Валерьевна. – Казань, 2012. – 195 с.

[illegible]

[illegible]

Для заметок

[illegible]

Издание Академии гражданской защиты имени Малика Габдуллина
Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан

Арман Булатович Кусаинов

Практические аспекты оценки аварийных рисков опасных
производственных объектов

учебное пособие для магистрантов АГЗ им. М.Габдуллина
МЧС Республики Казахстан

Начальник НИЦ
Редактор
Компьютерная верстка

И. Захаров
С. Садвокасова
К. Шаймерденов

Научно-исследовательский центр Академии гражданской защиты им.
Малика Габдуллина МЧС Республики Казахстан
г.Кокшетау, ул. Акана-серэ, 136

Подписано в печать 15.10.2024 г.
Тираж 500 экз. Формат 60х84 1/16.
Бумага «SvetoCopy».

Усл. п.л. 8,7. Заказ №148