

**И. В. Антонов  
С. В. Ефремов**

**ОПАСНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
ПРОЦЕССЫ И ПРОИЗВОДСТВА**

**Учебное пособие**

**Санкт-Петербург  
2022**

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет  
промышленных технологий и дизайна»  
Высшая школа технологии и энергетики**

**И. В. Антонов  
С. В. Ефремов**

# **ОПАСНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ПРОИЗВОДСТВА**

**Учебное пособие**

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург  
2022

**УДК 658.345 (075)**  
**ББК 66.72я7**  
**А 724**

*Рецензенты:*

доктор технических наук, профессор Высшей школы техносферной безопасности  
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

*В. Г. Бурлов;*

доктор технических наук, профессор Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна

*Н. П. Мидуков*

**Антонов, И. В.**

**А 724** Опасные технологические процессы и производства: учебное пособие /  
И. В. Антонов, С. В. Ефремов. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2022. — 114 с.  
ISBN 978-5-91646-299-9

Учебное пособие соответствует программам и учебным планам дисциплины «Опасные технологические процессы и производства» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность». В пособии изложены основы теории техногенных опасностей, рассмотрены подходы к оценке опасностей на опасных производственных объектах, приведены алгоритмы этой оценки.

Пособие предназначено для подготовки магистров очной и заочной форм обучения.

УДК 658.345 (075)  
ББК 66.72я7

ISBN 978-5-91646-299-9

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2022  
© Антонов И. В., Ефремов С. В., 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ТЕХНОСФЕРА И ЕЕ ОПАСНОСТИ.....	8
1.1. Определение и структура техносферы .....	8
1.2. Типы опасностей.....	8
1.3. Причины аварий и катастроф .....	12
1.4. Классификация чрезвычайных ситуаций.....	13
2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ТЕХНОГЕННЫХ ОПАСНОСТЕЙ.....	14
2.1. Структура понятийного ряда в области техногенных опасностей.....	14
2.2. Понятия, связанные с опасностью.....	15
2.3. Понятия опасных событий.....	17
2.4. Понятия, связанные с поражением.....	18
2.5. Понятия риска.....	19
2.6. Понятия опасных технологий и производств.....	21
2.7. Понятия, связанные с безопасностью.....	22
3. ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА, ПОРАЖАЮЩИЕ ФАКТОРЫ И ПАРАМЕТРЫ.....	24
3.1. Оценка опасности объекта.....	24
3.2. Краткая характеристика поражающих факторов и поражающих параметров.....	25
3.3. Общий подход к определению вероятности поражения.....	32
3.4. Общие подходы к анализу риска.....	34
4. ОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ, СОДЕРЖАЩИХ ГОРЮЧИЕ И ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА.....	39
4.1. Трубопроводы и емкости.....	39
4.2. Диаграмма состояния однокомпонентной системы.....	41
4.3. Выбор технологии хранения и перемещения вещества в зависимости от диаграммы его состояния.....	42
4.4. Аварийные выбросы на объектах сжиженного газа.....	45
4.4.1. Постепенное опорожнение сосуда.....	45
4.4.2. Эффект «BLEVE».....	48
4.5. Приближенная оценка количества вещества, переходящего в первичное и вторичное облака при разливе сжиженных газов и жидкостей.....	49
4.6. Опасности объектов, содержащих сжатые газы.....	50
4.6.1. Выбросы газа.....	50
4.6.2. Взрыв емкости, содержащей газ под давлением.....	55
4.7. Опасности, связанные с взрывами конденсированных взрывчатых веществ и пылевых облаков .....	55
4.8. Оценка последствий взрывов.....	57
4.9. Методика оценки опасности объектов, содержащих горючие и взрывчатые вещества.....	61

5. МАСШТАБЫ ЗАРАЖЕНИЯ ПРИ АВАРИЯХ И РАЗРУШЕНИЯХ ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	74
5.1. Свойства аварийно химически опасных веществ.....	74
5.2. Выбросы токсичных веществ.....	79
5.3. Методика прогнозирования масштабов заражения при авариях и разрушениях химически опасных объектов.....	82
6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАТЕГОРИИ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БЛОКА.....	88
6.1. Категории взрывоопасности технологического блока.....	88
6.2. Определение категории взрывоопасности технологического блока, включающего ректификационную колонну непрерывного действия.....	92
6.3. Определение категории взрывоопасности технологического блока по горючей пыли.....	94
7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «РВС – ЛВЖ».....	98
7.1. Общие положения по взрывопожароопасности технологических систем.....	98
7.2. Уровень взрывоопасности технологической системы.....	100
7.3. Геометрические и теплофизические параметры пожарной опасности разлива ЛВЖ при полном разрушении РВС.....	105
8. УСТРОЙСТВА И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ВЗРЫВОВ.....	108
8.1. Клапаны предохранительные на емкостях и трубопроводах.....	108
8.2. Предохранительные мембраны на трубопроводах и газоходах.....	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	113
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	114

## Список сокращений

АХОВ	– аварийно химически опасное вещество
BLEVE	– Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion
ЗПВ	– зона поражающих воздействий
ИИ	– ионизирующие излучения
ИИИ	– источник ионизирующих излучений
ИО	– источник опасности
КВИО	– коэффициент возможности ингаляционного отравления
ОБВ	– опасное биологическое вещество
ОП	– очаг поражения
ОПД	– объект поражающих действий
ОХВ	– опасное химическое вещество
ПДК	– предельно допустимая концентрация
ПОИ	– потенциально опасный источник
ПОО	– потенциально опасный объект
ПОТ	– потенциально опасная территория
ПОЭ	– потенциально опасный элемент
ПП	– поражающий параметр
ПФ	– поражающий фактор
ФДС	– фазовая диаграмма состояния
ХОО	– химически опасный объект
ЧС	– чрезвычайная ситуация

## ВВЕДЕНИЕ

Часто причинами чрезвычайных ситуаций техногенного характера являются аварии на объектах, использующих опасные технологии. К таким объектам относят, прежде всего, те, на которых находятся сжиженные и сжатые газы, опасные химические вещества и источники ионизирующих излучений. В результате аварий могут возникать взрывы, пожары, токсические и радиационные поражения.

Для принятия обоснованных инженерных и управленческих решений по защите людей и материальных ценностей необходимо разбираться в процессах формирования поражающих факторов, знать характеристики опасных веществ и источников, уметь прогнозировать масштабы и последствия аварий. Все эти вопросы изложены в данном учебном пособии.

Пособие предназначено для подготовки магистров по государственному образовательному стандарту направления подготовки 20.04.01 – «Техносферная безопасность». Дисциплина «Опасные технологические процессы и производства» является своеобразным мостиком между естественнонаучными и специальными дисциплинами. Она рассматривает прикладные аспекты математического анализа, теории вероятностей, теплотехники, ядерной физики и химии для оценки опасностей производственных объектов. Знания, полученные при ее изучении, понадобятся в дальнейшем при освоении таких дисциплин как «Экспертиза безопасности», «Охрана труда промышленного предприятия».

Пособие разбито на 8 глав.

*Первая глава* посвящена техносфере и ее опасностям. В ней рассмотрены структура техносферы, типы аварий, характеристика основных техногенных и природно-техногенных опасностей.

Во *второй главе* приведен понятийный ряд в области техногенных опасностей, даны определения понятий, связанных с опасными технологиями и производствами, поражениями и рисками.

В *третьей главе* анализируются общие подходы к анализу риска и определению вероятности поражений, дается краткая характеристика поражающих факторов и поражающих параметров.

*Четвертая глава* посвящена рассмотрению опасностей объектов, содержащих сжиженные и сжатые газы. В ней показано, как на основе диаграммы состояния однокомпонентной системы можно выбрать технологию хранения и перемещения вещества. Разобраны процессы формирования поражающих факторов при разрушении емкостей и трубопроводов, содержащих взрывопожароопасные сжиженные и сжатые газы. Приведена одна из методик оценки обстановки при взрывах и пожарах.

В *пятой главе* приводятся физические, химические и токсические свойства аварийно химически опасных веществ. Приведены зависимости для определения масштабов заражения при авариях и разрушениях химически опасных объектов, при этом рассчитываются глубина зоны заражения, количества веществ в первичном и вторичном облаках заражения, глубина зоны

распространения облака и время, за которое опасные вещества дойдут до обозначенных объектов.

*Шестая глава* посвящена вопросам категорирования технологических блоков по их взрывоопасности. В зависимости от агрегатного состояния приводятся закономерности определения категории взрывоопасности, в частности: технологического блока, включающего ректификационную колонну непрерывного действия; технологического блока по горючей пыли.

В *седьмой главе* рассматривается технологическая система «РВС-ЛВЖ». Общие положения по взрывопожароопасности технологических систем. Уровень взрывоопасности технологической системы. Геометрические и теплофизические параметры пожарной опасности разлива ЛВЖ при полном разрушении РВС.

В *восьмой главе* описываются устройства для предотвращения взрывов на технологических блоках. Клапаны предохранительные на емкостях и трубопроводах. Предохранительные мембраны на трубопроводах и газоходах.

Пособие содержит основные теоретические положения для разработки расчетно-графических работ.

Учебное пособие написано на основе опыта чтения лекций по дисциплине «Опасные технологические процессы и производства» для студентов Высшей школы технологии и энергетики.



# 1. ТЕХНОСФЕРА И ЕЕ ОПАСНОСТИ

## 1.1. Определение и структура техносферы

Биосфера – область существования и функционирования живой материи. В биосфере можно выделить три элемента: люди, природа, техносфера.

Техносфера – это часть биосферы, коренным образом преобразованная человеком в инженерно-технические сооружения: города, заводы и фабрики, карьеры и шахты, дороги, плотины, водохранилища и т. п.

В структуру техносферы входят следующие потенциально опасные объекты:

1. Ядерно-опасные и радиационно опасные объекты (атомные электростанции, исследовательские реакторы, предприятия топливного цикла, хранилища временного и долговременного хранения ядерного топлива и РАО).

2. Химически и биологически опасные объекты

3. Объекты, содержащие взрывчатые вещества с энергией возможного взрыва, эквивалентной 4,5 тонн тринитротолуола.

4. Объекты добычи, переработки, хранения и транспортировки нефти и газа;

5. Гидротехнические сооружения 1 и 2 классов.

6. Тепловые электростанции мощностью свыше 600 МВт.

7. Морские порты, аэропорты с длиной основной взлетно-посадочной полосы 1800 м и более, мосты и тоннели длиной более 500 м, метрополитены.

8. Предприятия по подземной и открытой (глубина разработки свыше 150 м) добыче и переработке (обогащению) твердых полезных ископаемых.

## 1.2. Типы опасностей

Техносфера порождает опасности техногенного и природно-техногенного характера.

Под техногенными опасностями будем понимать опасности, возникающие в ходе функционирования потенциально опасных объектов.

Под природно-техногенными опасностями понимают опасные природные процессы, возникшие под воздействием техносферы

К **техногенным опасностям** отнесем:

1. Взрывные и пожарные опасности.

2. Радиационные опасности.

3. Химические опасности.

4. Гидротехнические опасности.

5. Транспортные опасности.

6. Опасности, связанные с коммунальным хозяйством. (Каждая вторая авария в РФ происходит на сетях теплоснабжения, а каждая пятая – на сетях водоснабжения и канализации).

К числу **природно-техногенных опасностей** относят:

1. Наведенную сейсмичность;

2. Опускание территорий;
3. Подтопление территорий;
4. Карстово-суффозионные провалы;
5. Техногенные геофизические поля (вибрационные, электрические, тепловые).

**Большого внимания заслуживает такой феномен, как наведенная сейсмичность.** К мощным факторам наведенной сейсмичности относятся мегаполисы, крупные водохранилища, шахты и карьеры, закачка в глубокие горизонты земной коры, подземные атомные взрывы. Каждый из факторов вызывает наведенную сейсмичность по-своему. Один, увеличивая неоднородность напряженного состояния земной коры, создает дополнительную нагрузку (мегаполис), другой — разгрузку (шахты, карьеры), но оба тем самым способствуют проявлению сейсмических явлений.

Землетрясения могут возникнуть и из-за создания крупных водохранилищ. Накопление огромных масс воды приводит, с одной стороны, к дополнительной нагрузке на земную кору, достигающей 20 кг/см и выше, а с другой — к изменению гидростатического давления в породах на территории, выходящей далеко за контуры водохранилища. Повышение гидростатического давления способствует возникновению землетрясения.

**Опускание урбанизированных территорий** происходит из-за дополнительной статической и динамической нагрузки от зданий, сооружений и транспортных систем города на почву. Еще больший эффект производит извлечение подземных вод. Впервые на это обратили внимание японские специалисты, зафиксировав опускание территории Токио за период 70-х годов примерно на 4,5 м.

Катастрофических размеров достигло опускание поверхности г. Мехико, начавшееся в конце прошлого столетия в связи с интенсивным забором подземных вод. На отдельных участках города в 1948 – 52 гг. оно происходило со скоростью 30 см/год. К концу 70-х годов вся территория города опустилась более чем на 4 м, а его северо-восточная часть — на 9 м. В настоящее время этот процесс удалось стабилизировать за счет сокращения объемов откачки воды и поставки ее в город из других регионов.

Опускание поверхности земли происходит также при добыче жидких и газообразных полезных ископаемых — нефти и газа. Территория американского города Лонг-Бич по этой причине опустилась к началу пятидесятых годов на 8,8 м. В результате серьезно пострадали промышленные предприятия, жилые здания, транспортные пути, морской порт.

В РФ данная проблема является актуальной для Западной Сибири, поскольку опускание этой территории даже на несколько десятков сантиметров может существенно увеличить и без того ее сильную заболоченность.

**Суть подтопления территорий** заключается в подъеме уровня грунтовых вод к земной поверхности, что приводит к переувлажнению грунтов, заболачиванию земель, затоплению подвальных и технических помещений. Вследствие подтопления повышается сейсмичность территории, идет снижение несущей способности грунтов, а в итоге происходят преждевременные

деформации и выход из строя сооружений и подземных коммуникаций, ухудшается экологическая обстановка.

Подтопление нередко вызывает активизацию оползней, просадки, провалы и набухания грунтов, загрязнение грунтовых вод, усиливает коррозионные процессы в подземных конструкциях, приводит к деградации почв и угнетению растительных комплексов. На территориях, где подземные воды загрязнены нефтью и нефтепродуктами, их подъем к поверхности Земли может способствовать созданию взрыва и пожароопасной обстановки.

Процесс подтопления освоенных территорий России охватывает примерно 9 млн. га земель, в том числе 5 млн га сельскохозяйственных и 1 млн га находящихся на границах городов. Из насчитывающихся в государстве 1064 городов подтоплению подвержены 792 (74,4 %), из 2065 рабочих поселков – 460 (22,3 %), а также 762 сельских населенных пунктов. От него страдают практически все крупные города, в том числе Москва и Санкт-Петербург.

**Карстово-суффозионные провалы.** На территориях, где залегают мощные пласты растворимых пород (солей гипса, известняка, мела), широко развиты процессы локального их растворения и образования карстовых пустот. (Карст – это процесс растворение горных пород). В том случае, если карстовые полости находятся на небольшой глубине (до 100 м), кровля перекрывающих их пород может терять устойчивость и обрушаться с образованием на поверхности Земли специфических карстовых воронок.

Интенсивная откачка подземных вод и нарушение установившегося гидродинамического режима на территориях, пораженных древним карстом, могут вызвать развитие так называемых карстово-суффозионных процессов. (Суффозия – это процесс выноса мелких минеральных частиц и растворенных веществ водой, фильтрующийся в толще горных пород). Они приводят к образованию воронок, опасных не только для зданий и сооружений, но для людей. В некоторых районах указанные процессы идут достаточно быстро. Так, например, за последние 25 лет в северо-западной части Москвы возникло 42 карстово-суффозионных провала, которые ранее на территории города не фиксировались. Эти провалы имели диаметр от нескольких до 40 м, глубину от 1,5 до 5 – 8 м. В результате их образования пострадали три пятиэтажных дома, жителей которых пришлось переселить. Здания же были разобраны.

**Формирование техногенных геофизических полей.** Хозяйственная деятельность городских и промышленных агломераций вызывает образование на их территории еще одного источника опасностей — техногенных физических полей: вибрационных, электрических и тепловых.

**Вибрационные поля** возникают в основном от движения транспорта. Вибрационные поля обуславливают динамическое воздействие на грунты, вызывая снижение их несущей способности, влияют на техническое состояние зданий и сооружений, отрицательно сказываются на условиях жизни и работы людей.

**Электрические поля** блуждающих токов формируются за счет утечек тока с электрифицированного рельсового транспорта, заземленных промышленных установок, со станций катодной защиты. Они повышают

коррозионную активность грунтов по отношению к находящимся в них подземным коммуникациям. Коррозия металлов под воздействием таких полей ускоряет разрушение стальных трубопроводов в 5 – 10 раз.

**Тепловые поля** территории городов образуются под влиянием ряда факторов: нарушение естественного режима поглощения солнечного тепла из-за повышенной задымленности атмосферы и экранирования значительной площади различными объектами, использование подземных вод в качестве охладителей в системах, кондиционирующих воздух, тепловыделения промышленных предприятий; утечка нагретых вод из подземных коммуникаций и непосредственного сброса их в открытые водоемы. В результате в геологической среде урбанизированных территорий создаются зоны тепловых аномалий с превышением температуры над фоном на 10 и более градусов. Изменение теплового режима территории вызывает агрессивность грунтов и грунтовых вод по отношению к подземным сооружениям и коммуникациям, в ряде случаев создает непредвиденные трудности при ведении строительных работ.

### **Понятие о синергетических процессах**

Катастрофы часто носят синергетический характер (*синергетикус* означает «согласованно действующий»). Суть заключается в том, что одно катастрофическое явление вызывает цепочку других. Синергетические процессы подчиняются «принципу домино».

Например, землетрясение может стать причиной возникновения цунами, оползней, селей, обвалов подтопления порождают просадки лесов; нагонные ветры – затопления территорий. Еще большая опасность создается, когда в синергетический процесс втягивается техносфера. На урбанизированных территориях из-за высокой концентрации промышленных объектов практически любое стихийное бедствие способно вызвать серию техногенных катастроф — пожары, взрывы, выбросы и разливы химических веществ.

Ликвидировать синергетическую катастрофу во много раз труднее, чем природную или техногенную, поскольку действия, направленные против какой-либо одной из них, оказываются неадекватными при одновременном возникновении той и другой. Подтверждением сказанному могут служить примеры землетрясений, произошедших в Японии. Землетрясение в Набате (июнь 1964 г.), продолжавшееся всего 15 сек., нанесло огромный ущерб городу. Многие здания рухнули. Почти трое суток бушевали массовые пожары в порту, где размещались нефтеперерабатывающие предприятия и хранилища нефти. Тушение их было затруднено, поскольку дороги, мосты и подземные пути к порту были разрушены. В результате огонь уничтожил не только объекты нефтехимии, но и более 300 жилых домов.

### 1.3. Причины аварий и катастроф

К причинам аварий и катастроф в России (табл. 1.1) относятся:

1. Неизбежное увеличение объема производства, увеличение объема перевозок и хранения взрывоопасных, пожароопасных, токсичных химических и радиоактивных веществ (*увеличение объема производства*).

2. Введение в производство новых технологий, требующих высокой концентрации энергии, опасных для жизни человека веществ и оказывающих ощутимое воздействие на компоненты ОПС (*введение технологий с высокой концентрацией энергии*).

3. Высокая концентрация населения вблизи ПОО экономики, связанной с общей урбанизацией образа жизни. Так, в РФ численность городского населения составляет 75 % численности страны, при этом только 15 % горожан проживают на территории с уровнем загрязнения атмосферы, отвечающим гигиеническим нормам (*высокая концентрация населения вблизи ПОО*).

#### Факторы повышения техногенной опасности в России

К факторам повышения техногенной опасности в России относятся:

1. Стремление иностранных фирм и государств к инвестированию, созданию и развитию вредных производств на территории РФ (*иностранное инвестирование вредных производств*).

2. Высокий прогрессирующий уровень износа основных производственных фондов (*старение основных фондов*).

3. Снижение производственной и технологической дисциплины, а также квалификации технического персонала (*снижение дисциплины и квалификации*).

4. Накопление отходов производства, представляющих угрозу окружающей среде. В РФ ежегодно образуется около 75 млн т отходов, из них утилизируются лишь 50 млн т (*накопление отходов производства*).

5. Возрастание вероятности терроризма на объектах техносферы (*терроризм*).

Таблица 1.1 – Причины аварий и катастроф

Причины аварий и катастроф	Факторы повышения техногенной опасности в России
1. Увеличение объема производства, перевозок и хранения опасных веществ	1. Ввоз в Россию вредных производств
2. Введение в производство новых технологий	2. Старение основных фондов
3. Высокая концентрация населения вблизи опасных объектов	3. Снижение дисциплины и квалификации персонала
	4. Накопление отходов производства
	5. Возрастание вероятности терроризма на объектах техносферы

## 1.4. Классификация чрезвычайных ситуаций

Для установления единого подхода к оценке ЧС и адекватного реагирования на них ЧС классифицируются по нескольким признакам. В первую очередь всю совокупность ЧС можно разделить на *конфликтные* и *бесконфликтные*. Мы будем рассматривать только бесконфликтные ЧС и только невоенного времени. Они могут быть классифицированы по многим признакам. Остановимся на двух наиболее часто используемых классификациях.

**Первая** – базовая классификация ЧС, практически используемая в Российской системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, построена по типам и видам чрезвычайных событий, инициирующих ЧС (табл. 1.2).

Таблица 1.2 – Классификация ЧС по типам и видам чрезвычайных событий

<b>ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ</b>		
▼	▼	▼
<b>ЧС техногенного характера</b>	<b>ЧС природного характера</b>	<b>ЧС экологического характера</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- пожары, взрывы</li> <li>- обрушение зданий</li> <li>- гидродинамические явления</li> <li>- <b>аварии:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- транспортные</li> <li>- с выбросом ХОВ</li> <li>- с выбросом РВ</li> <li>- с выбросом БОВ</li> <li>- на КЭС</li> <li>- на очистных сооружениях</li> <li>- на электроэнергетических системах</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- опасные явления: <ul style="list-style-type: none"> <li>- геофизические</li> <li>- геологические</li> <li>- метеорологические</li> <li>- морские</li> <li>- гидрологические</li> <li>- гидрогеологические</li> </ul> </li> <li>- природные пожары</li> <li>- инфекционные заболевания людей</li> <li>- инфекционные заболевания с/х животных</li> <li>- поражение с/х растений болезнями и вредителями</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- изменение состояния суши (почвы, недр, ландшафта)</li> <li>- изменение состава и свойств атмосферы (воздушной среды)</li> <li>- изменение состояния гидросферы (водной среды)</li> <li>- изменение состояния биосферы</li> </ul>

**Вторая** классификация ЧС построена по масштабам распространения чрезвычайных событий и тяжести последствий, является важной для структур управления народным хозяйством. Эта классификация введена Постановлением Правительства Российской Федерации от 21 мая 2007 года № 304 «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

## 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ТЕХНОГЕННЫХ ОПАСНОСТЕЙ

### 2.1. Структура понятийного ряда в области техногенных опасностей

Основой любой конкретной деятельности является некоторое связанное множество понятий – понятийный ряд. Этот ряд позволяет строить образы, модели объектов и исследовать их свойства и поведение, обмениваться информацией, воспринимаемой однозначно. Для того, чтобы построить понятийный ряд, необходимо выбрать исходное понятие, то есть такое, которое можно не определять.

Выберем в качестве исходного понятия понятие «вред», а опасность определим как свойство объекта, выраженное в его способности причинять вред себе и другим объектам. Опасности реализуются в ходе некоторых событий, назовем их «опасные события». При реализации опасного события причиняется вред. Результат причинения вреда назовем «поражением». Нереализованную (потенциальную) опасность будем характеризовать таким понятием как «риск», понимая под риском вероятность реализации опасного события или поражения. Технологии и производства, для которых величина риска выше приемлемого, назовем «опасными технологиями и производствами».

Свойство объекта противостоять опасности назовем «безопасностью». Комплекс мероприятий по обеспечению требуемого уровня безопасности назовем «обеспечением безопасности». Анализ состояния опасного производственного объекта называют «анализ безопасности». Введем в ряд еще два понятия «требования промышленной безопасности», «декларация промышленной безопасности опасного производственного объекта».

Из приведенных суждений можно сделать следующее умозаключение: В структуру понятийного ряда, применяемого в области техногенных опасностей, следует включить шесть групп понятий (табл. 2.1):

1. Понятия, связанные с опасностью.
2. Понятия опасных событий.
3. Понятия, связанные с поражением.
4. Понятия риска.
5. Понятия опасных технологий и производств
6. Понятия, связанные с безопасностью.

Таблица 2.1 – Структура понятийного ряда в области техногенных опасностей

<b>ВРЕД</b>	▶	<b>1. ОПАСНОСТЬ</b> Свойство объекта, выраженное в его способности причинять вред себе и другим объектам ▼	<b>2. ОПАСНЫЕ СОБЫТИЯ</b> События, при реализации которых причиняется вред ▼	<b>3. ПОРАЖЕНИЕ</b> Результат причинения вреда ▼
		-Источник опасности -Потенциально опасный источник -Постоянно действующий источник опасности -Опасные вещества -Опасные воздействия	-Инцидент -Авария -Катастрофа -Чрезвычайная ситуация	-Поражающий фактор -Поражающий параметр -Критерий поражения -Объект поражения -Процесс поражения -Зона поражения
	▶	<b>4. РИСК</b> Вероятность реализации опасного события или поражения ▼	<b>5. ОТП</b> Тип, для которых величина риска выше приемлемого ▼	<b>6. БЕЗОПАСНОСТЬ</b> Свойство объекта противостоять опасности ▼
		-Технический риск -Индивидуальный риск -Коллективный риск -Потенциальный территориальный риск -Социальный риск -Приемлемый риск	-Технология -Производство -Установка -ОТ, ОП -Категории опасных производственных объектов	-Безопасность -Обеспечение безопасности -Анализ безопасности -Декларация безопасности -Требования безопасности

## 2.2. Понятия, связанные с опасностью

**Опасность** – свойство объекта, выраженное в его способности причинять вред себе и другим объектам.

**Источники опасности (ИО)** — это объекты и процессы, способные причинить вред (объекты и процессы, способные создавать угрозы и оказывать негативные (поражающие) воздействия на человека и окружающую среду).

**Опасные вещества** – это вещества, способные причинить вред. Опасные вещества можно разделить на 4 группы (табл. 2.2):

- взрывопожароопасные вещества;
- опасные химические вещества;
- опасные биологические вещества;
- радиоактивные вещества.

**Опасные воздействия** – это энергетические воздействия, причиняющие вред (поле давления, световое, электрическое, акустическое, информационное и другие поля).



Таблица 2.2 – Определения основных видов опасных веществ

<b>ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫЕ ВЕЩЕСТВА</b>			
<b>Воспламеняющиеся вещества</b>	<b>Окисляющие вещества</b>	<b>Горючие вещества</b>	<b>Взрывчатые вещества</b>
Газы, которые при нормальном давлении и в смеси с воздухом становятся воспламеняющимися, и температура кипения которых при нормальном давлении составляет 20 градусов Цельсия или ниже	Вещества, поддерживающие горение, вызывающие воспламенение или способствующие воспламенению других веществ в результате окислительно-восстановительной экзотермической реакции	Жидкости, газы, пыли, способные самовозгораться, а также возгораться от источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления	Вещества, которые при определенных видах внешнего воздействия способны на очень быстрое самораспространяющееся химическое превращение с выделением тепла и образованием газов
<b>ОПАСНЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА</b>			
<b>Характеристики</b>	<b>Токсичные вещества</b>	<b>Высокотоксичные вещества</b>	
	Вещества, способные при воздействии на живые организмы приводить к их гибели и имеющие следующие характеристики	Вещества, способные при воздействии на живые организмы приводить к их гибели и имеющие следующие характеристики	
Средняя смертельная доза при введении в желудок LD <sub>P50</sub> (перорально)	От 15 до 200 миллиграммов на килограмм	Не более 15 миллиграммов на килограмм	
Средняя смертельная доза при нанесении на кожу LD <sub>R50</sub> (резорбтивно)	От 50 до 400 миллиграммов на килограмм	Не более 50 миллиграммов на килограмм	
Средняя смертельная концентрация в воздухе LC <sub>50</sub>	От 0,5 до 2 миллиграммов на литр	Не более 0,5 миллиграмма на литр	
<b>Вещества, представляющие опасность для окружающей природной среды - вещества, характеризующиеся в водной среде следующими показателями острой токсичности:</b>			
Средняя смертельная доза при ингаляционном воздействии на рыбу в течение 96 часов LD <sub>50</sub> .		Не более 10 миллиграммов на литр	
Средняя концентрация яда, вызывающая определенный эффект при воздействии на дафнии в течение 48 часов LC <sub>50</sub>		Не более 10 миллиграммов на литр	
Средняя ингибирующая концентрация при воздействии на водоросли в течение 72 часов IC <sub>50</sub>		Не более 10 миллиграммов на литр	

**Ингибирование** – замедление, угнетение

### 2.3. Понятия опасных событий

**Инцидент** – отказ или повреждение технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, отклонение от режима технологического процесса, нарушение положений федеральных законов и иных нормативных правовых актов Российской Федерации, а также нормативных технических документов, устанавливающих правила ведения работ на опасном производственном объекте (ФЗ о ПБ). Классификация событий представлена в виде схемы на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Виды опасных событий

**Авария** – разрушение сооружений или технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрыв или выброс опасных веществ.

Сценарий аварии – последовательность отдельных логически связанных событий, обусловленных конкретным иницирующим событием, приводящим к аварии с опасными последствиями.

Аварии чаще всего проходят в своем развитии пять характерных фаз:

- первая – накопление отклонений от нормального процесса функционирования;
- вторая – иницирование аварии;
- третья – развитие аварии, во время которой оказывается воздействие на людей, окружающую среду и объекты экономики;
- четвертая – проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ, локализация аварии;
- пятая – ликвидация последствий аварии.

**Катастрофа** – крупная авария, внезапное бедствие, сопровождающееся гибелью людей, материальных и природных ценностей, образованием очага поражения. (К катастрофам относятся: стихийные бедствия, военные конфликты, эпидемии, крупные аварии, при которых возникают гибельные ситуации для людей).

**Чрезвычайная ситуация** – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

## 2.4. Понятия, связанные с поражением

Под **поражением** будем понимать результат причинения вреда (табл. 2.3 и рис. 2.2).

Таблица 2.3 – Понятия, связанные с поражением

Под поражением будем понимать результат причинения вреда			
Поражающий фактор	Поражающий параметр	Критерий поражения	Процесс поражения
Сила, причиняющая вред	Количественная характеристика поражающего фактора	Численное значение поражающего параметра, соответствующее определенной степени поражения	Процесс причинения вреда
	<b>Поле поражающего параметра</b>		<b>Зона поражения</b>
	Область пространства вокруг ИО, в каждой точке которого можно указать значение поражающего параметра		Пространство, в пределах которого поражающие параметры превышают допустимые значения

ПОРАЖЕНИЕ	
▼	▼
ОБЪЕКТЫ (ущерб)	ЧЕЛОВЕК (потери)
Разрушение	Гибель (L)
Уничтожение	Временная потеря дееспособности(I)
Загрязнение	Пороговые поражения (P)
Затопление	Хронические поражения (заболевания)

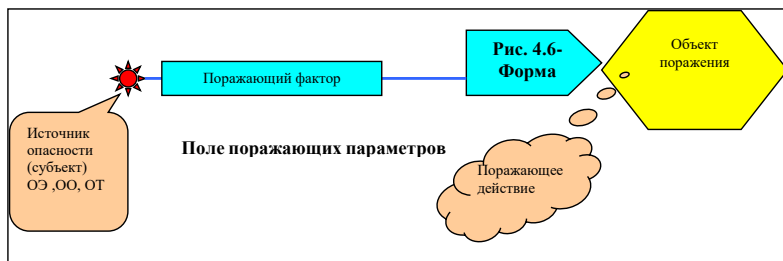


Рис. 2.2. Графика процесса поражения

Силу, причиняющую вред, назовем **поражающим фактором**. То есть это сила (форма движения материи), с помощью которой поражающие эффекты (энергия, вещество, информация) передаются от источника опасности к объекту

поражения. Примеры: ударная волна, электромагнитное излучение, скоростной напор, радиоактивное загрязнение.

**Поражающий параметр (ПП)** – это количественная характеристика **поражающего фактора** (это параметр, определяющий степень воздействия поражающего фактора на объекты). Примеры: избыточное давление, скорость, интенсивность излучения, плотность потока, доза облучения, энергия и масса рабочего тела и другие.

**Критерий поражения (КП)** – это численное значение поражающего параметра, соответствующее определенной степени поражения (разрушения: полные, сильные, средние, слабые; поражения: смертельные, временно-выводящие, пороговые).

**Поле поражающего параметра** – область пространства вокруг источника опасности, в каждой точке которого можно указать значение поражающего параметра.

**Объект поражения** – объект, на который воздействуют поражающие факторы.

**Процесс поражения** (поражающее действие) – это процесс причинения вреда (то есть это процесс взаимодействия поражающего фактора с объектом, в результате которого возникает поражение этого объекта).

**Зона поражения** (зона поражающих воздействий) – это пространство, в пределах которого значения поражающих параметров выше допустимых (или других установленных) уровней воздействия.

**Зона чрезвычайной ситуации** – это территория, на которой сложилась ЧС.

## 2.5. Понятия риска

Степень опасности негативного явления определяется интенсивностью воздействия поражающих факторов. Но так как мера поражения является случайной величиной, то ее нельзя характеризовать только значением критерия поражения, требуется еще знать вероятность поражения при данном критерии. Поэтому требуется использовать специальную характеристику для меры опасности.

В настоящее время общепринятой мерой опасности является риск. Под термином «риск» в общем случае понимают многокомпонентную величину, включающую показатели ущерба и вероятность возникновения рассматриваемого негативного фактора.

**Риск** – мера опасности, характеризующая вероятность возникновения возможных аварий и тяжесть их последствий.

Есть еще такое определение **риска (или степени риска)** – это сочетание **частоты (или вероятности) и последствий определенного опасного события**.

Понятие риска всегда включает два элемента: частоту, с которой осуществляется опасное событие, и последствия этого события.

**Приемлемый риск** – риск, уровень которого допустим и обоснован, исходя из экономических и социальных соображений.

**Риск поражения объекта** – частота сложного опасного события, определяемая как произведение риска возникновения опасного события на субъекте на условную вероятность заданного вида и степени поражения объекта опасности.

**Риск возникновения опасного события на объекте** – частота реализации на нем опасного события.

Количественные показатели риска приводятся в табл. 2.4 и представляют собой:

**Технический риск** – вероятность отказа технических устройств с последствиями определенного уровня за определенный период функционирования ОПО.

**Потенциальный территориальный риск** – пространственное распределение частоты реализации негативного воздействия определенного уровня;

**Индивидуальный риск** — частота поражения отдельного индивидуума в результате воздействия исследуемых факторов опасности, то есть индивидуальный риск – это риск поражения человека.

**Коллективный риск** — ожидаемое количество пораженных в результате возможных аварий за определенный период времени.

В РД 08-120-96 есть такое определение: коллективный риск – это ожидаемое количество смертельно травмированных в результате возможных аварий за определенный период времени.

Таблица 2.4 – Показатели риска

1. Технический риск $R_a, R_{ст}$	Вероятность отказа технических устройств с последствиями определенного уровня за определенный период функционирования ОПО
2. Потенциальный территориальный риск	Частота реализации поражающих факторов аварии в рассматриваемой точке территории ( $R_{пот}$ )
3. Индивидуальный риск	Частота поражения отдельного человека в результате воздействия исследуемых факторов опасности аварий. $R_{инд} = R_{нахожд} \times R_{пот}$
4. Коллективный риск	Ожидаемое количество пораженных в результате возможных аварий за определенный период времени
5. Социальный риск	Зависимость частоты возникновения событий, в которых пострадало на определенном уровне не менее $N$ человек, от этого числа $N$ . (вероятность того что пострадало не менее $N$ человек)
6. Ожидаемый ущерб	Математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии, за определенный период времени $R_{ущерб} = M(y)$

**Социальный риск** — зависимость частоты возникновения событий ( $F$ ), в которых пострадало на определенном уровне не менее  $N$  человек, от этого числа  $N$ . В РД 08-120-96 дается такое определение: социальный риск – это зависимость частоты событий  $F$ , в которых пострадало на том или ином уровне

число людей, больше определенного N, от этого определенного числа людей. То есть социальный риск есть риск получения поражения количеством людей, не менее заданного. При этом поражающие факторы подразделяются на 5 типов, которые описаны в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Поражающие факторы

<b>ПОРАЖАЮЩИЕ ФАКТОРЫ</b>				
<b>Механические</b>	<b>Термические</b>	<b>Радиационные</b>	<b>Химические</b>	<b>Психогенные</b>
Взрывная волна; метательное воздействие; осколки; придавливание разрушенными конструкциями зданий и другими тяжелыми предметами	Высокая или низкая температура; лучистая энергия	Проникающая радиация; радиоактивное загрязнение	Химические отравления; химическое загрязнение	Страх за свое здоровье и жизнь, за родных и близких людей

## **2.6. Понятия опасных технологий и производств**

Понятия опасных технологий и производств представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6 – Понятия опасных технологий и производств

<b>Технология</b>	<b>Опасная технология</b>	<b>Производственный объект</b>	<b>Опасный произв. объект (ОПО)</b>
Способ производства или переработки продукции в совокупности с приборно-аппаратным оформлением	Технология, при реализации которой возможно возникновение опасностей	Совокупность технологических установок для выпуска определенных продуктов или продукции, размещаемых на определенной площадке	Производственные объекты, которые в определенных условиях могут стать источником опасностей

В соответствии с «Законом о промышленной безопасности опасных производственных объектов» к категории опасных производственных объектов относятся объекты 5 категорий (табл. 2.7).

Таблица 2.7 – Категории опасных производств

<b>ОБЪЕКТЫ</b>				
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>категории</b>	<b>категории</b>	<b>категории</b>	<b>категории</b>	<b>категории</b>
Объекты, на которых имеются опасные вещества	Объекты, на которых используется оборудование, работающее под давлением более 0,07 МПа или при температуре нагрева воды более 115 °С	Объекты, на которых используются стационарно установленные грузоподъемные механизмы, эскалаторы, канатные дороги, фуникулеры	Объекты, на которых получают расплавы черных и цветных металлов и сплавы на основе этих расплавов	Объекты, на которых ведутся горные работы, работы по обогащению полезных ископаемых, а также работы в подземных условиях

## 2.7. Понятия, связанные с безопасностью

**Промышленная безопасность опасных производственных объектов** – состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и последствий указанных аварий.

**Обеспечение промышленной безопасности (или управление риском)** – системный подход к принятию политических решений, процедур и практических мер в решении задач предупреждения или уменьшения опасности промышленных аварий для жизни человека, заболеваний или травм, ущерба имуществу и окружающей среде.

**Требования промышленной безопасности** – условия, запреты, ограничения и другие обязательные требования, содержащиеся в федеральных законах и иных нормативных правовых актах Российской Федерации, а также в нормативных технических документах, которые принимаются в установленном порядке и соблюдение которых обеспечивает промышленную безопасность.

Рассматривая безопасность как меру защищенности человека и окружающей среды от опасностей, можно поставить вопрос о единицах ее измерения. Защищенность определенным образом влияет на качество жизни человека. Для человека обобщенным показателем качества жизни является ее продолжительность. Тогда средняя ожидаемая продолжительность жизни может быть количественным показателем уровня безопасности.

Оценивание защищенности природной среды оказывается более сложным процессом, так как экосистемы в широких пределах изменяют свои параметры в ответ на внешние воздействия, не утрачивая способности к устойчивому существованию. В некоторых странах защищенность природной среды определяется близостью экологических нагрузок к пропускной способности экологического пространства.

Учитывая большие неопределенности таких показателей, в настоящее время защищенность человека и окружающей среды от опасностей оценивается не по показателям качества жизни, а по неким предельным величинам (предельно допустимые концентрации – ПДК, предельно допустимые выбросы – ПДВ и т. п.), которые характеризуют надежность и эффективность технических систем безопасности.

В соответствии с этим различают безопасность:

- по видам (промышленная, радиационная, химическая, пожарная, биологическая, сейсмическая, экологическая);
- по объектам (население, объект экономики, окружающая природная среда);
- по основным источникам (опасные природные явления, аварии и техногенные катастрофы).

Несмотря на недостатки такого «технократического» подхода к оценке защищенности человека, он в настоящее время является единственно приемлемым по многим причинам. Во-первых, определение такого интегрального показателя качества жизни, как ее продолжительность, требует длительного наблюдения, и сама она подвержена влиянию многих не зависящих от человека факторов (например, солнечной активности и других явлений космического масштаба); во-вторых, очень сложно и неоднозначно распределение ответственности в снижении интегральных показателей между отдельными негативными факторами; в-третьих, могут оказаться несовместимыми интересы и действия разных стран при обеспечении защищенности своих народов и т. д.



### 3. ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА, ПОРАЖАЮЩИЕ ФАКТОРЫ И ПАРАМЕТРЫ

#### 3.1. Оценка опасности объекта

Рассмотрим какой-либо отвлеченный объект и постараемся определить степень его опасности. То есть, с какой вероятностью он может стать источником опасности (создать поражающие факторы) и какой при этом может быть ущерб.

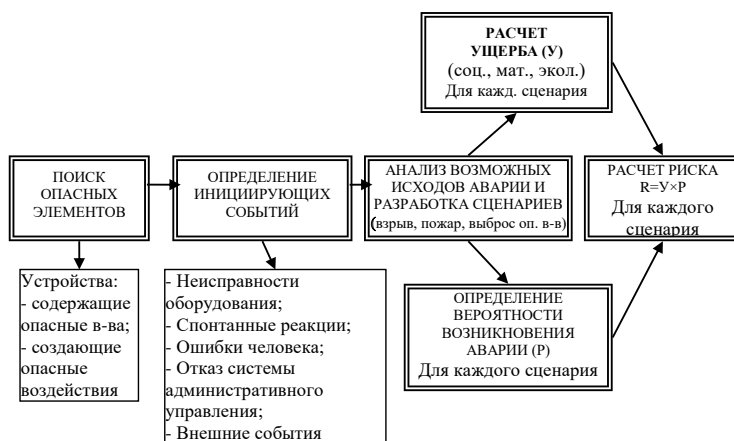


Рис. 3.1. Схема оценки опасности объекта

Для начала выделим на объекте опасные элементы: то есть устройства, содержащие опасные вещества и устройства, создающие экстремальные физические условия (устройства, создающие опасные воздействия). Устройства, содержащие опасные вещества, характеризуются типом вещества и его количеством. По типу их можно разделить на взрывопожароопасные вещества, вредные химические вещества, радиоактивные вещества. По объему хранящихся веществ объекты можно разделить на объекты, требующие лицензирования, и объекты, не требующие лицензирования. К экстремальным физическим условиям (опасным воздействиям) относят: высокие и низкие температуры; высокие давления и вакуум; циклические изменения давления; циклические изменения температуры; гидравлические удары.

Далее определим, какие события могут привести к возникновению поражающих факторов. Обычно эти события объединяют в несколько групп:

- отклонения технологических параметров; возникновение спонтанных реакций;

- разгерметизация устройств; неисправности оборудования и систем обеспечения;
- ошибки человека;
- отказ системы административного управления;
- внешние события.

Считается, что человеческими ошибками обусловлены 45 % экстремальных ситуаций на АЭС, 60 % – при авиакатастрофах, 80 % – при катастрофах на море.

После этого проанализируем, каков возможный исход аварии. Исходами могут быть: выбросы опасных веществ, пожары и взрывы, гидродинамические удары.

Затем определим вероятность реализации каждого из исходов и причиняемый при этом ущерб. Ущерб обычно делят на социальный, материальный и экологический. Потом рассчитывают риск.

### **3.2. Краткая характеристика поражающих факторов и поражающих параметров**

Основными техногенными опасностями являются взрывы, пожары, выбросы опасных химических и радиоактивных веществ, прорыв гидротехнических сооружений (табл. 3.1).

#### **Взрывная опасность**

Взрываться могут конденсированные взрывчатые вещества (ВВ), газы, пары и аэрозоли. Взрывы характеризуются барическими эффектами, то есть возникновением областей экстремальных давлений. При взрывах возникают два основных поражающих фактора: воздушная ударная волна и разлет осколков.

Воздушная ударная волна характеризуется тремя поражающими параметрами:

- избыточным давлением во фронте ударной волны,  $\Delta P_{\phi}$ , кПа;
- длительностью фазы сжатия,  $\tau_+$ , сек;
- импульс фазы сжатия,  $(I_+)$  кПа×сек.

Основным поражающим параметром является избыточное давление во фронте ударной волны. Избыточное давление во фронте ударной волны определяется по формуле Садовского:

$$\Delta P_{\phi} = a_1 \times \frac{\sqrt[3]{G}}{R} + a_2 \times \left( \frac{\sqrt[3]{G}}{R} \right)^2 + a_3 \left( \frac{\sqrt[3]{G}}{R} \right)^3 \quad G, \text{ кг}; \quad R, \text{ м} \quad (3.1)$$

$$I = \frac{\sqrt[3]{G}}{R}; \quad (3.2)$$

$$\Delta P_{\phi} = a \times I + b \times I^2 + c I^3. \quad (3.3)$$

Таблица 3.1 – Техногенные опасности и их поражающие факторы

ПОРАЖЕНИЕ			
▼	▼	▼	▼
Поражающий эффект	Поражающий фактор	Поражающий параметр	Критерий поражения
Опасность		Поражающий фактор	
<b>Взрывная</b>		Воздушная ударная волна	
		Разлет осколков	
<b>Пожарная</b>		Тепловое излучение пламени	
		Экстремальный нагрев воздуха	
		Изменение состава воздуха	
<b>Токсическая (выбросы ОХВ)</b>		Токсические нагрузки (отравление)	
		Химическое загрязнение сред и поверхностей	
<b>Радиационная (выбросы РВ)</b>		Проникающая радиация	
		Радиоактивное загрязнение сред и поверхностей	
<b>Гидродинамическая</b>		Волна прорыва	

### Краткая характеристика степеней разрушений зданий

Зона слабых разрушений ( $\Delta P_{\phi} = 10 - 20$  кПа);

Зона средних разрушений ( $\Delta P_{\phi} = 20 - 30$  кПа);

Зона сильных разрушений ( $\Delta P_{\phi} = 30 - 50$  кПа);

Зона полных разрушений, соответствует давлениям  $\Delta P_{\phi} > 50$  кПа.

**Слабое разрушение.** Повреждение или разрушение оконных и дверных проемов, легких перегородок. Частичное разрушение или повреждение крыши. Возможны трещины в стенах верхних этажей. Эти разрушения могут быть устранены в порядке ремонта различной сложности и объема. Ущерб составляет 10 – 15 % от стоимости здания.

**Среднее разрушение.** Разрушение крыш, окон, дверей, встроенных перегородок, трещины в стенах, частичное обрушение чердачных перекрытий и стен верхних этажей. После расчистки и ремонта можно использовать помещения нижних этажей. Полное восстановление возможно при капитальном ремонте здания. Ущерб составляет 30-40 % от стоимости здания.

**Сильное разрушение.** Разрушение несущих конструкций и перекрытий верхних этажей, деформация перекрытий нижних этажей. Ремонт и восстановление затруднительны. Ущерб достигает 50 – 70 % от стоимости здания, сооружения.

**Полное разрушение.** Разрушение или обрушение всех или большей части стен, сильная деформация или обрушение перекрытий. Из обломков образуется завал в пределах контура здания и вокруг него. Ущерб составляет ~ 100 % от стоимости здания, сооружения.

### Поражения людей

Поражение незащищенных людей может быть непосредственным и косвенным.

К непосредственному поражению относят травмы, получаемые в результате воздействия избыточного давления и скоростного напора воздуха. Избыточное давление приводит к мгновенному ударному обжатию, которое длится в течение времени  $t_+$ , постепенно ослабевая. Поток воздуха, движущийся за фронтом ударной волны, создает давление скоростного напора, которое может перемещать тело в пространстве, приводя к столкновению с преградами и падению.

Косвенные поражения люди могут получить в результате ударов осколками и обломками зданий, оборудования, обломками деревьев, камнями, осколками разбитых стекол. При этом поражения осколками стекол могут наблюдаться до расстояний, соответствующих избыточным давлениям  $\Delta P_{\phi} = 2 \dots 5$  кПа (4 кПа) и считающихся безопасными по воздействию ударной волны.

Избыточное давление  $\Delta P_{\phi} < 10$  кПа считается безопасным для людей вне сооружений.

**Зона безопасности для открыто расположенных людей** определяется величиной избыточного давления  $\Delta P_{\phi} = 10$  кПа (0,1 атм).

Различают легкие, средние, тяжелые и смертельные поражения.

**Легкие травмы (поражения)** имеют место при давлениях  $\Delta P_{\phi} = 20 \dots 40$  кПа. Наблюдаются ушибы, вывихи, временные функциональные расстройства, понижение слуха, расстройства речи, головная боль. Выздоровление – в течение 7...15 суток.

**Травмы средней тяжести** возникают при давлениях  $\Delta P_{\phi} = 40 \dots 60$  кПа. Характеризуются контузией, сотрясением головного мозга. Имеют место повреждения органов слуха, кровотечений изо рта, носа, ушей, повреждения опорно-двигательного аппарата, разрывы связок, сухожилий, переломы мелких и некоторых крупных костей. Лечение до 2-х месяцев.

**Тяжелые травмы** наблюдаются при давлениях  $\Delta P_{\phi} = 60 - 100$  кПа. К ним относятся: общая контузия, потеря сознания, повреждения внутренних органов и внутренние кровоизлияния, сильные кровоизлияния из носа, рта, ушей, переломы костей. Лечение свыше 3-х месяцев.

**Смертельные поражения** имеют место при давлениях  $\Delta P_{\phi} > 100$  кПа.

### **Разлет осколков**

Осколочные поля создаются летящими осколками технологического оборудования. Разлет осколков характеризуется такими параметрами, как:

- масса осколка,  $m_{ос}$ , кг;
- скорость разлета осколка,  $V_{ос}$ , м/с.

### **Пожарная опасность**

К техногенным пожарам относят пожары разлития, огневые шары, струевые пламена. Пожары характеризуются термическими эффектами (термической радиацией), то есть возникновением областей высоких температур. При пожарах возникают три основных поражающих фактора:

- тепловое излучение пламени (степени ожогов 1, 2, 3А – поверхностные ожоги; 3Б, 4 – глубокие ожоги);
- экстремальный нагрев воздуха (среды);
- изменение состава воздуха (действие ядовитых веществ, выделяющихся при взрывах и пожарах, а также недостаток кислорода).

**То есть опасными факторами пожара являются: пламя, высокая температура среды и дым.**

Тепловое излучение можно охарактеризовать двумя поражающими параметрами:

- интенсивностью теплового излучения (плотностью теплового потока),  $J \equiv q, \text{Вт/м}^2$ ;
- световым импульсом,  $U, \text{Дж/м}^2$ .

**Количество теплоты  $Q$**  – это энергия источника теплового излучения, Дж; ккал.

**Тепловой поток  $W$**  – это количество теплоты, излучаемое через изотермическую поверхность в единицу времени, Дж/с; Вт; ккал/час.  $1 \text{ ккал/ч} = 1,163 \text{ Вт}$ .  $W = Q/t$  [кВт].

**Плотность теплового потока  $q$**  (интенсивность теплового излучения) – это тепловой поток, отнесенный к единице изотермической поверхности,  $\text{Вт/м}^2$  ( $I \equiv q$ ).

$$q \equiv I = W/S = Q/(t \times S), [\text{кВт/м}^2] \quad (3.4)$$

По плотности определяется мощность:

**Световой импульс  $U$**  – это произведение интенсивности излучения на время существования светящейся области, Дж/м<sup>2</sup>:

$$U = q \times t_c = (Q \times t_c) / (S \times t_c) = Q/S [\text{Дж/м}^2], \quad (3.5)$$

где  $t_c$  – время действия источника теплового излучения (время свечения).

Радиус зоны теплового воздействия на людей определяется радиусом зоны с интенсивностью излучения  $I = 4,2 \text{ кВт/м}^2$ . При действии излучения такой интенсивности на открытые участки тела люди испытывают болевые ощущения.

Наиболее корректным представляется решение задачи о поражающем действии тепловой радиации (табл. 3.2) на человека с использованием критериев интегральной величины количества тепла, полученного телом человека за время облучения. В этом случае интегральный показатель  $Q(t, R)$  рассчитывается как произведение плотности теплового потока ( $q$ ) на конкретное время облучения. То есть рассчитывается удельная (приведенная к 1 м<sup>2</sup>) тепловая энергия, полученная телом человека за время облучения (это световой импульс  $U$ ):

$$U = Q(t, R) = q(R) \times t = q \times t_c, \quad (3.6)$$

где  $Q(t, R)$  – тепловая энергия, приходящаяся на единицу площади тела человека, кДж/м<sup>2</sup>;

$q(R)$  – плотность падающего теплового потока на расстоянии  $R$  от центра пожара, кВт/м<sup>2</sup>;

$t$  – время облучения человека, сек.

При ЯВ световой импульс вызывает ожоги: 1 степень – 2...4 кал/см<sup>2</sup>; 2 степень – 4...10 кал/см<sup>2</sup>; 3 степень – 10...15 кал/см<sup>2</sup>.

Экстремальный нагрев воздуха характеризуется таким поражающим параметром, как температура воздуха,  $t_{в}$ , °С.

Изменение состава воздуха характеризуется несколькими параметрами: концентрация продуктов горения в воздухе (окись углерода, двуокись углерода); концентрация кислорода в воздухе; показатель ослабления света дымом.

Риск поражения населения от пожаров не должен быть выше  $10^{-6}$  год<sup>-1</sup>, т.е.  $P_{вн} \leq 10^{-6}$  год<sup>-1</sup> (в – воздействие; н – нормированный риск).

Таблица 3.2 – Интегральные критерии поражения человека тепловым облучением

Степень ожога	$U \equiv Q$ , кДж/м <sup>2</sup>	Характер поражения	Последствия
Первая	100...200	Покраснение и припухлости кожи. Ожоги быстро заживают	Работоспособность не теряется
Вторая	200...400	Образование пузырей, наполненных жидкостью. Требуют лечения	Потеря работоспособности Санитарные потери
Третья	400...600	Полное разрушение кожного покрова, образование язв. Требуется госпитализация	Длительная потеря работоспособности Санитарные потери
Четвертая	Более 600	Омертвление кожной клетчатки, мышц и костей, обугливание. Обязательная госпитализация	Возможен летальный исход. Безвозвратные потери

Предельное значение опасных факторов пожара, при которых еще не происходит поражения:

1) Тепловое излучение – 500 Вт/м<sup>2</sup> (Интенсивность теплового излучения  $I \leq 500$  Вт/м<sup>2</sup>).

2) Температура газа – 70 °С ( $t_{ср} \leq 70$  °С).

3) Концентрации: углекислого газа 0,01...6%; окиси углерода – менее 0,1%; кислорода – 17...24 % (15...30 %).

4) Показатель ослабления света дымом на единицу длины  $n_d = 2,38$ .

### Токсическая опасность

**Выбросы опасных химических веществ** создают такие поражающие факторы, как:

- токсические нагрузки (отравление);
- химическое загрязнение сред и поверхностей.

Токсические нагрузки характеризуются таким параметром, как:

- концентрация опасного химического вещества в воздухе,  $C$ , мг/л;
- доза опасного химического вещества  $D$ , мг/кг.

Химическое загрязнение сред и поверхностей характеризуются двумя параметрами:

- концентрация опасного химического вещества в среде, С, мг/л;
  - плотность химического заражения поверхности, Δ, мг/м<sup>2</sup>.
- Критериями поражения являются:
- при острых отравлениях токсодозы (LD, ID, PD);
  - при хронических поражениях предельно допустимые концентрации (ПДК, мг/л) и предельно допустимые выбросы (кг/год).

### Радиационная опасность

Выбросы радиоактивных веществ создают два поражающих фактора:

- проникающая радиация;
  - радиоактивное загрязнение сред и поверхностей.
- Проникающая радиация характеризуется:
- дозой излучения, D, Зв;
  - мощностью дозы излучения P, Зв/час.
- Критерием является годовая эффективная доза излучения E:
- для персонала РОО  $E_{перс} = 20$  мЗв/год;
  - для населения  $E_{насел} = 1$  мЗв/год.
- Радиоактивное загрязнение характеризуется такими параметрами, как:
- плотность радиоактивного загрязнения, Δ, (поверхностная активность  $A_{пов}$ ), Бк/м<sup>2</sup>;
  - концентрация радиоактивного загрязнения, С (объемная активность  $A_{об}$ ), Бк/м<sup>3</sup>.

### Гидротехническая опасность

В результате прорыва гидротехнических сооружений создается волна прорыва. Волна прорыва является поражающим фактором и характеризуется следующими параметрами:

- скоростью движения фронта волны прорыва,  $N_{ф}$ , м/с (основной параметр);
- энергией волны прорыва,  $E_{п}$ , Дж;
- скоростью движения гребня волны прорыва,  $N_{г}$ , м/с;
- глубиной волны прорыва, η, м.

Обобщая материалы раздела, общие поражающие факторы приведены в таблицах 3.3 и 3.4.

Таблица 3.3 – Техногенные опасности, их поражающие факторы и параметры

Техногенные опасности, их поражающие факторы и параметры									
▼ Взрывы		▼ Пожары			▼ Выбросы ОХВ		▼ Выбросы РВ		▼ Прорыв ГТС
▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
ВУВ	РО	ТИ	ЭНВ	ИСВ	ТН	ХЗПС	ПР	РЗПС	Волна прорыва
ΔP <sub>Ф</sub>	m <sub>ос</sub>	I	t <sub>В</sub>	CO <sub>2</sub>	D	Δ	D	A <sub>пов</sub>	—E
τ <sub>+</sub>	V <sub>ос</sub>	U		CCO <sub>2</sub>		C	P	A <sub>об</sub>	—N <sub>Ф</sub>
I <sub>+</sub>				CCO					—N <sub>Г</sub>
				n <sub>д</sub>					—h

Таблица 3.4 – Техногенные опасности, их поражающие факторы и параметры

Опасность	Поражающий фактор	Поражающий параметр	Обозначение	Ед. измер.	Критерий (для чел)
Взрывная	Воздушная ударная волна	Избыточное давление во фронте ударной волны	$\Delta P_{\phi}$	кПа	10 кПа
		Длительность фазы сжатия	$\tau_{+}$	сек	
		Импульс фазы сжатия	$I_{+}$	кПа×с	
	Разлет осколков	Масса осколка	$m_{oc}$	кг	
Скорость разлета осколка		$V_{oc}$	м/с		
Пожарная	Тепловое излучение пламени	Интенсивность теплового излучения (плотностью теплового потока)	$J=q$	кВт/м <sup>2</sup>	4,2 кВт/м <sup>2</sup> (Возгорание древесины 7 кВт/м <sup>2</sup> )
		Световой импульс	$U$	кДж/м <sup>2</sup>	100
	Экстремальный нагрев воздуха	Температура воздуха	$t_{в}$	°С	70 °С
		Изменение состава воздуха	Концентрация продуктов горения в воздухе (СО; СО <sub>2</sub> )	$C$	%
	Концентрация кислорода в воздухе		$C$	%	$C_o=17\%$
	Показатель ослабления света дымом		$n_d$	-	2,38
Токсическая (выбросы ОХВ)	Токсические нагрузки (отравление)	Доза опасного химического вещества	$D$	мг/кг	LD ID PD
	Хим. загрязнение сред и поверхностей	Концентрация опасного вещества в среде	$C,$	мг/л, мг/кг	
		Плотность химического заражения поверхностей	$\Delta$	мг/м <sup>2</sup>	
Радиационная (выброс РВ)	Проникающая радиация	Доза излучения (1 мЗв/год – население; 20 мЗв/год – персонал)	$D$	Зв	1/20 мЗв/год
		Мощность дозы излучения	$P$	Зв/час	
	Радиоактивное загрязнение	Концентрация радиоактивного загрязнения в среде	$A_{об}$	Бк/м <sup>2</sup>	
		Плотность рад. загрязнения	$A_{пов}$	Бк/м <sup>3</sup>	
Прорыв гидротехнических сооружений	Волна прорыва	Энергия волны прорыва	$E_{п}$	Дж	
		Скорость движения фронта волны прорыва	$N_{\phi}$	м/с	
		Скорость движения гребня волны прорыва	$N_{г}$	м/с	
		Глубина волны прорыва	$h$	м	



### 3.3. Общий подход к определению вероятности поражения

Одна и та же мера воздействия, то есть одно и то же значение поражающего параметра может вызвать последствия различной степени тяжести у различных людей. Следовательно, эффект поражения носит вероятностный характер. Величина поражения ( $P_{\text{пор}}$ ) измеряется в долях от единицы или в % и выражается, как правило, функцией Гаусса (функцией ошибок), записываемой в виде:

$$P_{\text{пор}} = f(\text{Pr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}} e^{-0,5t^2} dt, \quad (3.7)$$

в которой верхний предел интегральной функции ( $\text{Pr}$ ) является так называемой пробит-функцией. Она отражает связь между вероятностью поражения и поражающим эффектом. Пробит-функция может быть вычислена по уравнению вида:

$$\text{Pr} = a + b \times \ln(X), \quad (3.8)$$

где  $a$ ,  $b$  – константы для каждого вещества или процесса, характеризующие специфику и меру опасности его воздействия.

$X$  – поглощенная субъектом доза негативного воздействия.

#### Термические воздействия

Для вероятности смертельного поражения при термических воздействиях  $X$  будет произведением интенсивности излучения на длительность теплового импульса:

$$a = 14,5; \quad b = 2,56; \quad X = q^{4/3} \cdot \tau \cdot 10^{-4}, \quad (3.9)$$

где  $q$  – действующий на человека тепловой поток ( $[Дж/м^2 \cdot с] \equiv [Вт/м^2]$ );

$\tau$  – длительность воздействия (сек).

Пробит-функция для таких поражений будет определяться следующей формулой:

$$\text{Pr} = 14,5 + 2,56 \times \ln(q^{4/3} \cdot \tau \cdot 10^{-4}), \quad (3.10)$$

#### Барические воздействия

$$X = f(\Delta P_{\phi}). \quad (3.11)$$

Для определения вероятности летального исхода от прямого воздействия на людей избыточного давления  $P_s$  и импульса  $I_s$  используется пробит-функция:

$$\text{Pr} = -2,44 \times \ln[(7380/P_s) + 1,9 \cdot 10^9/(P_s \cdot I_s)]. \quad (3.12)$$

Для случая полного разрушения зданий при газовом взрыве

$$\text{Pr} = -0,22 \times \ln[(40/P_s)^{7,4} + (460/I_s)^{11,3}]. \quad (3.13)$$

Размерность  $P_s$  –  $Н/м^2$ ;  $I_s$  –  $Н/м^2 \cdot с$ .

## Токсические воздействия

**Острые токсические воздействия.** Токсическая нагрузка вычисляется с учетом изменения концентрации вещества за принятый период времени T:

$$D = \int_0^T C(\tau) d\tau. \quad (3.14)$$

Здесь  $C(\tau)$  – функция концентрации в той точке пространства, куда помещен объект. Она зависит от относительной плотности газа (по воздуху), параметра устойчивости атмосферы, скорости ветра, интенсивности и длительности выброса из источника, высоты источника относительно земли и т.п.

$n$  – показатель степени, характеризующий механизм воздействия и природу токсиканта.

Относительная вероятность поражения (от 0 до 1) представляется в виде зависимости от пробит-функции:

$$P = f(\text{Pr}), \quad (3.15)$$

$$\text{Pr} = a + b \times \ln(D). \quad (3.16)$$

В случае пребывания объекта в атмосфере с постоянной концентрацией

$$\text{Pr} = a + b \times \ln(C^n \times \tau). \quad (3.17)$$

Для различных веществ пробит-функция имеет различные константы, определяемые в результате медико-биологических исследований и отнесенные к среднестатистическому составу населения или к определенному контингенту людей (табл. 3.4).

Таблица 3.5 – Константы для вычисления пробит-функции летального поражения технического персонала ( $C$  – ppm,  $T$  – мин)

Вещество	$\text{Pr} = a + b \times \ln(C^n \times \tau)$		
	a	b	n
Аммиак	-35,9	1,85	2
Хлор	-8,29	0,92	2

1% объемный = 10000 ppm; 1ppm =  $10^{-6}$  доли.

**Длительное воздействие токсичных веществ.** Проблема длительного (хронического) воздействия малых концентраций вредных веществ на человека является на сегодня одной из наиболее сложных, так как последствия токсических поражений в этом случае должны определяться путем продолжительного сравнительного медико-биологического изучения большого количества людей, проживающих на загрязненной и чистой территории.

Многие исследователи для определения последствий длительного воздействия малых доз вредных веществ на человека используют линейные модели вида:

$$P_{\text{пор}} = k_c \times C, \quad (3.18)$$

где  $k$  – коэффициент дозовой зависимости для определенного вида ущерба за период всей жизни человека в данном районе;

$C$  – средняя величина концентрации вредного вещества за год ( $\text{мг}/\text{м}^3 \cdot \text{год}$ ).

Эти модели строятся на основании данных о смертности и заболеваемости и, как правило, достаточно точно отражают последствия воздействия малых доз токсиканта на человека за продолжительный период времени.

### 3.4. 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.

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.

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

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 рис. 3.2.

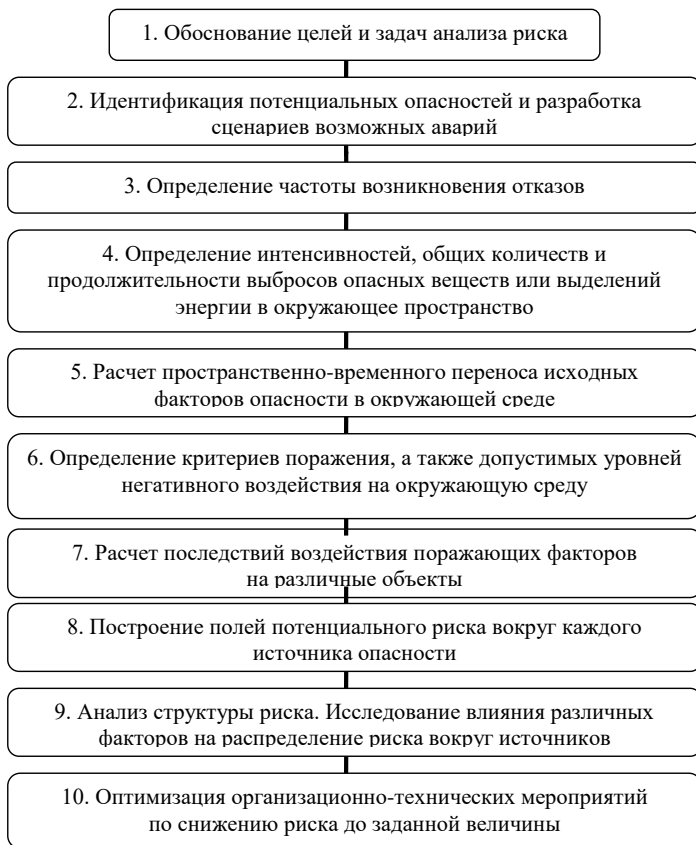


Рис. 3.2. Блок-схема анализа риска

**На первом этапе**, на основании «Исходных требований...» Заказчика формулируются основные цели работы. С учетом исходной информации и имеющихся ресурсов определяется необходимая глубина анализа и **строится общий алгоритм (стратегия) решения поставленной задачи.**

Далее, 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.

**Второй этап.** Большинство опасностей на промышленных объектах возникает в результате плановых (организованных) или аварийных (нерегламентированных) поступлений (выбросов) в атмосферу вредных (токсичных) или взрывопожароопасных веществ, также в результате быстротечных выделений больших количеств энергии. Эти 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.

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 отраслевые банки статистических данных по характерным отказам и авариям. [9]

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». (Вы их будете изучать в теории надежности).

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, то есть достоверное описание «функции источника» негативного воздействия, причем для всего спектра нежелательных событий.

**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 и не менее 8 основных географических направлений) 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 с сжиженным газом (образование огневого шара (эффект BLEVE), термическая радиация, ударная волна).

**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).

**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.

**Девятый этап.** На этом этапе строятся локальные и интегральные (для предприятия в целом) поля риска, производится анализ структуры риска, исследуется влияние различных факторов на уровень и пространственно-временное распределение риска вокруг источников.

**Десятый этап** заключается в оптимизации организационно-технических мероприятий по снижению риска до заданной величины.

## 4. ОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ, СОДЕРЖАЩИХ ГОРЮЧИЕ И ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА

### 4.1. Трубопроводы и емкости

В промышленности эксплуатируются различные емкости для хранения и транспортировки нефтепродуктов, химических веществ, сжиженных газов под давлением (табл. 4.1). Сосуды и трубопроводы применяются в тепловых и химических технологических процессах.

Хранимые и транспортируемые жидкости (нефть, дизтопливо, мазут, бензин, спирты, капролактаны, метанол, аммиак) отличаются по плотности, огне и взрывоопасности, токсичности, коррозионной активности.

Аварии резервуаров большой емкости чреват взрывами хранилищ и взрывами облаков газопаровоздушных смесей (ГПВС).

Таблица 4.1 – Устройства для хранения и транспортировки жидкостей и газов

Устройства для хранения и транспортировки жидкостей и газов			
Трубопроводы	Емкости		
▼	Сосуды	Резервуары	Газгольдеры
«Красные»	Цистерны	Вертикальные	Мокрые
«Зеленые»	Бочки	Горизонтальные	Сухие
«Желтые»	Баллоны	Шаровые	

#### Трубопроводы

**Трубопроводы** — это устройства для транспортирования жидкостей и газов. На трубопроводы с транспортируемым веществом наносят краской предупредительные (сигнальные) цветные кольца. Количество сигнальных колец определяет степень опасности.

**Красные:** взрывоопасные, огнеопасные, легковоспламеняющиеся вещества;

**Зеленые:** безопасные или нейтральные вещества;

**Желтые:** токсичные или иного вида опасности, например, глубокий вакуум, высокое давление, наличие радиации.

#### Емкости

По определению, емкость – это вместилище для жидких и сыпучих тел. Емкости делят на сосуды, резервуары и газгольдеры.

**Сосуды.** Согласно «Правилам устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением», под **сосудом** понимается герметически закрытая емкость, используемая для хранения, транспортировки сжатых, сжиженных и растворенных газов и жидкостей под давлением, а также ведения тепловых и химических процессов. Сосуды делятся на цистерны, бочки, баллоны.

**Цистерна** (от лат. cisterna — водоем, водохранилище) – большая ёмкость, а также вагон или автомобиль с такой емкостью для хранения и перевозки



жидкостей. Вместимость автомобильных цистерн обычно 1,5–5 м<sup>3</sup>, железнодорожных цистерн до 140 м<sup>3</sup>.

**Бочка** – деревянное, обтянутое обручами, или металлическое цилиндрическоеместилище с двумя днищами и обычно с несколько выгнутыми боками. Дубовая б. Б. для воды. Б. с цементом. (Старая русская мера жидкостей, равная сорока вёдрам, около 490 л).

**Баллон** (фр. ballon – полый шар) – шарообразный или цилиндрический сосуд специального назначения для жидкостей или газов. Различают баллоны малой (0,4... 12 л), средней (20...50 л) и большой (80...500 л) емкости.

Криогенные сосуды предназначены для хранения и транспортировки различных сжиженных газов: воздуха, кислорода, аргона. Их выпускают шести типоразмеров: 6; 3; 10; 16; 25 и 40 л.

**Резервуар** (франц. reservoir, от лат. reservo — сберегаю) –местилище (наземное или подземное) для хранения жидкостей и газов. Распространены металлические и железобетонные резервуары, реже — каменные, деревянные, из полимерных и др. материалов.

В России применяются стальные вертикальные цилиндрические резервуары емкостью от 100 м<sup>3</sup> до 30 тыс. м<sup>3</sup>; шаровые и горизонтальные резервуары для различных продуктов;

Сжиженные газы под давлением  $\Delta P = 0,25...2,5$  МПа хранят в шаровых резервуарах объемом 600...2000 м<sup>3</sup>.

Нефтепродукты, сжиженные газы и другие жидкости под давлением до 2 МПа хранят в горизонтальных цилиндрических резервуарах надземных – емкостью до 600 м<sup>3</sup>, и подземных – емкостью до 1000 м<sup>3</sup>.

Особую опасность представляют изотермические резервуары для хранения сжиженных газов при температурах от минус 33 до минус 160 градусов Цельсия, имеющие диаметр от 15 до 46 м, высоту 20...35 метров, объем 10...50 тысяч м<sup>3</sup>, содержащие до 30 тысяч тонн легковоспламеняющихся, горючих и токсичных жидкостей.

для хранения больших количеств сжиженных газов используют стационарные резервуары (объемом до 500 тыс. л), а для их перевозки — транспортные сосуды (цистерны), имеющие объем до 35 тыс. л.

**Газгольдер** (англ. gasholder, от gas – газ и holder – держатель) – это стационарное стальное сооружение для приёма, хранения и выдачи газов в распределительные газопроводы или установки по их переработке и применению. Сооружение для приемки, хранения и отпуска газа в газопроводную сеть. Газгольдеры предназначены для хранения и выдачи больших количеств сжатых газов.

Различают газгольдеры переменного (мокрые) и постоянного (сухие) объёма. Газгольдер переменного объёма состоит из цилиндрического вертикального резервуара (бассейна), наполненного водой, и колокола (цилиндрический вертикальный резервуар без нижнего днища). Сверху этот резервуар снабжён сферической крышей. Через дно бассейна под колокол подводится газопровод. При заполнении внутреннего пространства газгольдера газом колокол поднимается; при отборе газа – опускается.

В России функционируют мокрые газгольдеры ёмкостью от 10 до 50 тыс. м<sup>3</sup>, их недостатки: большие расходы металла, увлажнение газа, переменный режим давления и трудности эксплуатации в зимнее время. Этим недостаткам в значительной степени лишены так называемые сухие, или поршневые, газгольдеры, которые представляют собой неподвижный корпус с поршнем. Как и в мокром газгольдере, при наполнении газом поршень поднимается, а при выдаче газа опускается. В России функционируют сухие газгольдеры ёмкостью до 100 тыс. м<sup>3</sup>, к их недостаткам относятся сложность монтажа и трудность обеспечения герметичности между корпусом и поршнем.

#### 4.2. Диаграмма состояния однокомпонентной системы

Основной причиной аварий емкостей и трубопроводов, содержащих жидкости и сжиженные газы, является потеря герметичности. Для того чтобы разобраться в процессах таких аварий, необходимо понять фазовую диаграмму состояния однокомпонентной системы (рис. 4.1). Диаграмма показывает те состояния вещества, которые термодинамически устойчивы при определенных значениях температуры и давления. Она состоит из четырех кривых, разграничивающих все возможные температуры и давления на 4 области, отвечающие твердой, жидкой, паровой и газовой фазам.

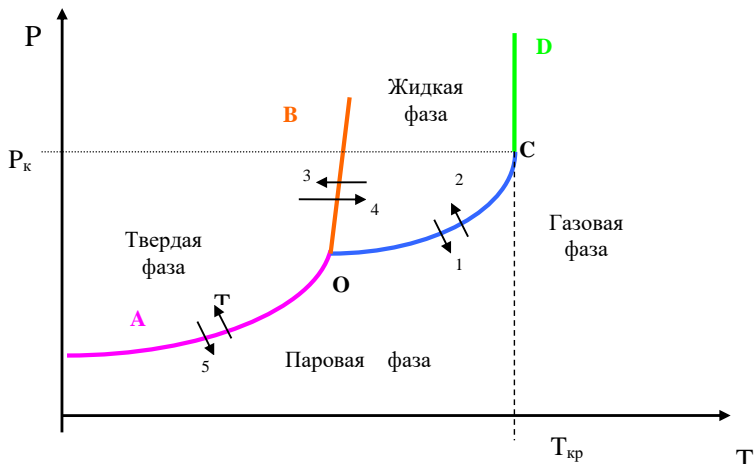


Рис. 4.1. Типовая фазовая диаграмма состояния однокомпонентной системы

Кривая ОС представляет собой график зависимости давления насыщенного пара от температуры. Она называется «кривой кипения». Процесс 1 – испарение, процесс 2 – конденсация. Точка С соответствует критической температуре. При температурах больших, чем критическая, вещество не может

находиться в жидком состоянии. Газовая фаза имеет подфазу, именуемую «паровой фазой». Она лежит в области температур ниже критической (кривая АОС). При нахождении вещества в этой области для перевода в жидкость его надо просто сжать. Область газообразной фазы, лежащей выше критической температуры, можно назвать областью «перманентных» (постоянных) газов. Кривая ОВ – отделяет область жидкой фазы от твердой фазы. Эта кривая называется «кривой плавления». Процесс 3 – затвердевание, процесс 4 – плавление. Кривая ОА – это кривая равновесия твердое состояние – пар (или кривая сублимации). Процесс 5 – сублимация, процесс 6 – десублимация.

### 4.3. Выбор технологии хранения и перемещения вещества в зависимости от диаграммы его состояния

Технология хранения и перемещения вещества устанавливается исходя из свойств этого вещества в диапазоне температур окружающей среды. А эти свойства определяются диаграммой состояния. Диапазон температур окружающей среды в общем случае изменяется от минус 40 °С до плюс 50 °С. По способам хранения и перемещения вещества делят на 4 категории (рис. 4.2).

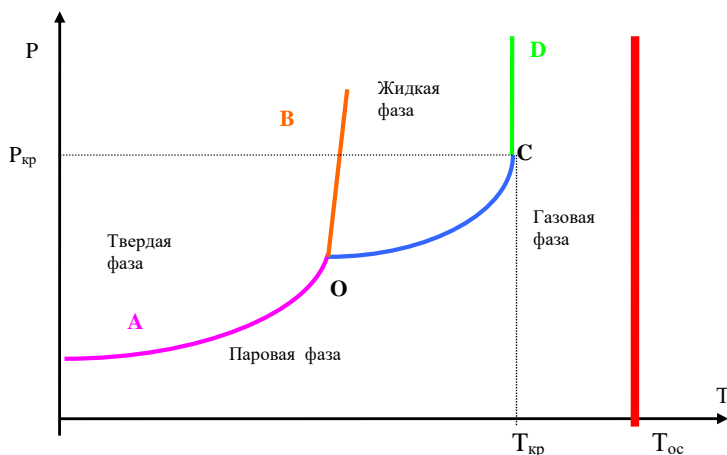


Рис. 4.2. Фазовая диаграмма состояния для веществ 1 категории

**1 категория** – вещества, у которых критическая температура ниже температуры окружающей среды. Эти вещества называют перманентными газами, а в жидком состоянии – криогенными жидкостями. Из криогенных веществ наиболее широко используются: сжиженный природный газ (СПГ), состоящий главным образом из метана; азот; кислород (табл. 4.2).

Таблица 4.2 – Вещества 1 категории

№	Наименование вещества	Критическая температура $T_{кр}, ^\circ\text{C}$
1.	Водород	минус 240
2.	Азот	минус 147
3.	Кислород	минус 118
4.	Сжиженный природный газ (метан)	минус 82

Для веществ 1 категории технология перемещения и хранения основывается на применении высококачественной термоизоляции с использованием, как правило, вакуумных оболочек. Отметим, что содержать метан, кислород или азот в жидкой фазе посредством охлаждения трудно, так как это можно сделать только при наличии еще более холодных жидкостей. Образующиеся при неизбежном выкипании пары можно либо сразу использовать, либо снова сжижать, либо просто выбрасывать в атмосферу.

Таким образом, вещества 1 категории хранятся в изотермических хранилищах либо при атмосферном, либо при пониженном давлении. При изотермическом способе хранения емкости искусственно охлаждаются.

**2 категория** – вещества, у которых критическая температура выше, а точка кипения ниже температуры окружающей среды (рис 4.3 и табл. 4.3). Для сжижения этих веществ их достаточно только сжать. В жидком состоянии они относятся к очень важной категории сжиженных газов, в которую входят: сжиженные нефтяные газы, пропан, бутан, аммиак, хлор. Вещества этой категории отличаются способностью к «мгновенному испарению». То есть при разгерметизации часть жидкости мгновенно испаряется, а оставшаяся охлаждается до точки кипения при атмосферном давлении.

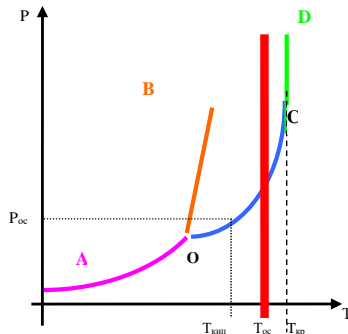


Рис. 4.3. Диаграмма состояния для веществ 2 категории

При этом могут образовываться паровые облака, которые представляют значительную часть проблем с точки зрения опасности. Хранятся вещества 2

категории под давлением при температуре окружающей среды, хотя можно их хранить и в охлажденном состоянии.

Таблица 4.3 – Вещества 2 категории

№	Наименование вещества	Температура кипения при атмосферном давлении $T_{кип}$ , °С	Критическая температура $T_{кр}$ , °С
1.	Пропан	минус 42,0	плюс 96,8
2.	Хлор	минус 34,5	плюс 144,0
3.	Аммиак	минус 33,0	плюс 132,0
4.	Бутан	минус 0,5	плюс 152,3

**3 категория** – вещества, у которых критическое давление выше атмосферного, а температура кипения выше температуры окружающей среды (рис. 4.4). Этот класс включает в себя вещества, находящиеся при атмосферном давлении в жидком состоянии. Те из них, которые имеют более низкую точку кипения, в зависимости от температуры окружающей среды могут входить также и в предыдущую вторую категорию. Так, в холодную погоду бутан – жидкость ( $T_{кип} = 0,5$  °С), а этиленоксид в жаркую погоду – сжиженный газ ( $T_{кип} = 13,5$  °С).

Все вещества, находящиеся при температуре окружающей среды в твердом состоянии, также попадают в эту категорию. Однако твердые вещества в данном случае опасны, если они взрывчатые или если они находятся в воздухе в диспергированном виде. Жидкости 3 категории хранят в закрытых емкостях при температуре окружающей среды.

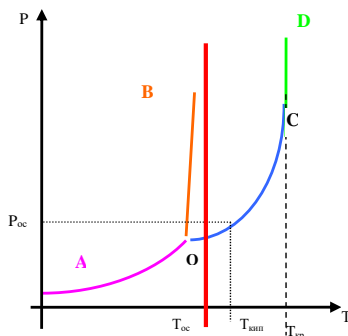


Рис. 4.4. Диаграмма состояния для веществ 3 категории

**4 категория** – вещества, содержащиеся при повышенных температурах. К ним относятся жидкости 3 категории, которые содержатся при подводе тепла и под давлением при температурах выше их атмосферной точки кипения. Это водяной пар в котлах, циклогексан. Вещества 4 категории ведут себя подобно веществам 2 категории.

#### 4.4. Аварийные выбросы на объектах сжиженного газа

При аварийном выбросе сжиженного газа возможны две группы процессов:

1) Постепенное опорожнение резервуара (сосуда, аппарата) при частичной разгерметизации его корпуса или же истечение жидкости из протяженного трубопровода за конечный промежуток времени при его частичной разгерметизации. При этом происходит двухфазное истечение жидкости в атмосферу с дальнейшим испарением.

2) Взрывное вскипание сразу жидкости в емкости при значительном нарушении его герметичности с последующим резким возрастанием давления, полным разрушением сосуда с возможностью образования огневого шара и разлета осколков (эффект «BLEVE»).

«Мгновенное» (взрывное) вскипание сразу всего объема «сильно» термодинамически перегретой жидкости в сосуде или аппарате при значительном нарушении его герметичности с последующим резким возрастанием давления и полным разрушением сосуда с очевидной расположенностью к воспламенению и далее к интенсивному сгоранию расширяющегося аэрозольного облака переобогащенной топливно-воздушной смеси (эффект «BLEVE»).

##### 4.4.1. Постепенное опорожнение сосуда

При постепенном опорожнении происходят следующие процессы:

- истечение сжиженных газов;
- растекание и испарение сжиженных газов на поверхности;
- движение и рассеивание облаков тяжелого газа в приземном слое атмосферы;
- сгорание углеводородных облаков.

##### **Истечение, растекание и испарение сжиженных газов на поверхности**

При аварийной разгерметизации сосудов или трубопроводов происходит истечение под давлением сжиженного газа и «мгновенное» испарение в окружающее пространство определенной его части. Оставшаяся часть вытекшей жидкости охлаждается, растекается по поверхности и испаряется.

Таким образом, массовая интенсивность испарения сжиженного газа при аварийном истечении определяется тремя факторами:

- резким падением давления;
- теплопритоком из массива грунта;
- турбулентно-диффузионным потоком тепла из атмосферы.

**Испарение жидкостей 1 категории.** Вытекающая криогенная жидкость будет находиться в равновесии со своими парами при давлении равном атмосферному. Следовательно, при подводе тепла возникает немедленное кипение жидкости с интенсивностью, пропорциональной скорости подвода

тепла. Однако по мере того, как основание охлаждается и уменьшается подвод тепла, то и резко падает скорость испарения.

Так, когда жидкий азот растекается по основанию, имеющему температуру +20 °С, скорость его испарения равна 100 грамм в секунду с 1м<sup>2</sup> (0,1 кг/с·м<sup>2</sup>). Однако, когда основание замерзает, то скорость испарения уменьшается в 10 раз и составляет всего 10 кг/с·м<sup>2</sup> (Таким образом, в случае разрушения оболочки изотермического хранилища и последующего разлива большого количества вещества в обваловку испарения за счет разности упругости насыщенных паров вещества в емкости и парциального давления в воздухе практически не наблюдается).

Для разлития таких жидкостей характерны два периода:

- период нестационарного испарения;
- период стационарного испарения.

В период нестационарного испарения происходит неустойчивое испарение вещества за счет тепла поддона (обваловки), изменения теплосодержания жидкости и притока тепла от окружающего воздуха. Этот период характеризуется резким падением интенсивности испарения в первые минуты после разлива с одновременным понижением температуры жидкого слоя ниже температуры кипения.

Стационарное испарение происходит за счет тепла окружающего воздуха. Испарение в этом случае будет зависеть от скорости ветра, температуры окружающего воздуха и жидкого слоя. Подвод тепла от поддона (обваловки) практически будет равен нулю. Продолжительность стационарного периода в зависимости от типа вещества, его количества и внешних условий может составить часы, сутки и более.

Формирование первичного облака осуществляется в период нестационарного испарения за счет тепла поддона (обваловки), изменения теплосодержания жидкости и притока тепла от окружающего воздуха. При этом количество вещества, переходящее в первичное облако, как правило, не превышает 3...5 % при температуре воздуха 25...30 °С.

**Испарение жидкостей 2 категории.** Рассмотрим теперь разлитие жидкостей, имеющих критическую температуру выше температуры окружающей среды. Их свойства отличаются от свойств криогенных жидкостей, и содержатся такие жидкости в резервуарах под давлением.

В случае разрушения оболочки емкости, содержащей вещество под давлением, и последующего разлива большого количества вещества в поддон (обваловку), его поступление в атмосферу может осуществляться в течение длительного времени. Процесс испарения в этом случае делится на три периода (а не на два, как с веществами 1 категории):

- 1 период – период мгновенного испарения;
- 2 период – период нестационарного (неустойчивого) испарения;
- 3 период – период стационарного испарения.

**1 период.** Основное отличие веществ 2 категории от веществ 1 категории заключается в явлении «мгновенного испарения», которое возникает тогда, когда в системе, включающей жидкость, находящуюся в равновесии со своими

парами, понижается давление. При этом происходит бурное, почти мгновенное испарение за счет разности упругости насыщенных паров вещества в емкости и парциального давления в воздухе.

Данный процесс обеспечивает основное количество паров вещества, поступающего в атмосферу в этот период времени. Кроме того, часть вещества переходит в пар за счет изменения теплосодержания жидкости, температуры окружающего воздуха и солнечной радиации. В результате температура жидкости понижается до температуры кипения.

Учитывая, что за данный период времени испаряется значительное количество вещества, может образоваться облако с концентрациями, приводящими к взрыву или токсическому поражению (в зависимости от типа вещества).

**Второй и третий периоды** аналогичны жидкостям 1 категории.

Наиболее опасной стадией аварии, безусловно, являются первые 10 минут, когда испарение вещества происходит интенсивно. При этом в первый момент выброса сжиженного газа, находящегося под давлением, образуется аэрозоль в виде тяжелых облаков.

Если считать, что мгновенное испарение происходит адиабатически (то есть система не получает и не отдает тепло), то доля мгновенно испарившейся части жидкости при температуре  $T$  равна:

$$D_T = (H_T - H_x) \times L_x, \quad (4.1)$$

где  $H_T$  – удельная энтальпия жидкости при температуре  $T$ ;

$H_x$  – удельная энтальпия жидкости в точке кипения при атмосферном давлении;

$L_x$  – удельная скрытая теплота парообразования в точке кипения при атмосферном давлении.

Анализ гидродинамики мгновенного испарения дает три варианта:

а) мгновенное испарение, сопряженное с полным разрушением сосуда под давлением;

б) мгновенное испарение при утечке над уровнем жидкости в парожидкостной системе;

в) мгновенное испарение при утечке ниже уровня жидкости в парожидкостной системе.

**Испарение жидкостей 3 категории.** Жидкости 3 категории обычно называют высококипящими жидкостями. Они хранятся в закрытых емкостях при температуре окружающей среды. Полное разрушение такой емкости маловероятно.

Поэтому существенное значение (с точки зрения опасности) имеет утечка ниже уровня жидкости. Интенсивность такой утечки зависит от давления жидкости.

Испарение разлитой жидкости осуществляется по стационарному процессу и зависит от физико-химических свойств вещества, температуры воздуха и скорости ветра. При этом первичное облако не образуется.

**Испарение жидкостей 4 категории.** Жидкости 4 категории при температурах выше их точки кипения при атмосферном давлении являются



сжиженными парами. В этом они схожи с жидкостями 2 категории и поэтому при их разлитии наблюдается явление мгновенного испарения.

Натурные опыты с аммиаком показывают, что первичное облако моментально поднимается вверх примерно на 20 метров, а затем под действием собственной силы тяжести опускается на грунт. Границы облака на первом этапе очень отчетливы, так как оно имеет большую оптическую плотность и только через две-три минуты становится прозрачным. Ввиду его большой плотности на начальном этапе разбавление облака и его движение осуществляется под действием собственной силой тяжести.

На этом этапе формирование и направление движения облака носят крайне неопределенный характер, в результате чего при прогнозировании распространения (движения) облака в данном случае выделяют «зону неопределенности», в которой нельзя предсказать местоположение облака, руководствуясь только метеорологическими условиями. Радиус этой зоны лежит в пределах от 0,5 до 1 км.

Но в отличие от жидкостей 2 категории при разлитии этих веществ часть выброшенного пара конденсируется. Это явление происходит из-за потери тепла в окружающую относительно холодную среду.

#### **Движение и рассеивание облаков тяжелого газа в приземном слое атмосферы**

При выбросе сжиженного газа градиенты плотности, температуры и давления формируют «локальное» поле сил плавучести, которое приводит к распространению облака не только по направлению ветра, но и в поперечном и даже в противоположенном ветру направлениях.

Облако тяжелых паров при достижении им источников зажигания может сгорать с образованием воздушной ударной волны. Сгорание топливно-воздушной смеси (ТВС) может протекать как в режиме детонации, так и в режиме дефлограции (быстрого горения).

При детонации образуется эффект самовоспламенения за счет интенсивного сжатия смеси сверхзвуковой ударной волной.

При дефлограции действует механизм радиационно-конвективного нагревания до температуры воспламенения слоев смеси перед фронтом горения.

#### **4.4.2. Эффект «BLEVE»**

Одним из возможных сценариев развития арий на объекте, содержащим сжиженные газы, является образование огневых шаров и взрывные явления типа «BLEVE» (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion).

Данный сценарий характеризуется совокупностью физических процессов, сопровождающих взрывное вскипание углеводородных жидкостей в резервуарах высокого давления, выброс содержимого резервуара в окружающее пространство с образованием быстро сгорающего аэрозольного

облака (огневого шара) и ударной волны, а также с разрушением сосуда и разлетом его осколков.

Для возникновения «BLEVE» необходимы три предпосылки:

1. Жидкость должна быть «термодинамически перегретой» выше некоторого характерного предела относительно состояния насыщения при атмосферном давлении.

2. Должно произойти резкое падение давления над поверхностью раздела жидкой и паровой фаз.

3. Величина термодинамической неустойчивости жидкости при сбросе давления должна достигнуть области локального перегрева, при которой происходит мгновенное вскипание перегретой жидкости по всему объему за счет высокой плотности центров парообразования (до  $10^6$  в одном кубическом миллиметре).

При «провале» за границу предельного перегрева произойдет «паровой взрыв». Давление в сосуде возрастет в сотни раз, вследствие чего сосуд будет разорван. Часть жидкости превратится в пар, а остальная – в аэрозоль. В результате образуется аэрозольное облако расширяющихся паров, которая с вероятностью 0,7...0,8 воспламенится, за счет взаимодействия разрушенных частей сосуда и будет сгорать с высокой интенсивностью и мощным излучением тепла в окружающее пространство.

За счет эффекта расширения паров газа и продуктов сгорания образуется воздушная ударная волна (до 0,5 атм.). Также образуются осколки и огневой шар диаметром  $D_{\text{ош}}$  (м) и временем существования  $\tau_{\text{ош}}$  (с.).

$$D_{\text{ош}} = 55 \times M^{0,375}, \quad (4.2)$$

$$\tau_{\text{ош}} = 3,8 \times \sqrt{M}, \quad (4.3)$$

где  $M$  – масса сжиженного газа, выброшенного в атмосферу (т).

Из 130 аварий типа «BLEVE» в 89 случаях наблюдали огневой шар с разлетом осколков, в 24 случаях – только огневой шар, в 17 случаях – только разлет осколков. Число осколков от 3 до 7, разлет на расстояние не более 300 метров. А термические поражения наблюдались на расстоянии до 500 м. Поэтому при оценке последствий аварий типа «BLEVE» следует, прежде всего, рассчитывать зоны термических поражений.

#### **4.5. Приближенная оценка количества вещества, переходящего в первичное и вторичное облака при разливе сжиженных газов и жидкостей**

**Первичное облако** – это облако, формируемое в периоды мгновенного и нестационарного испарения (время образования – 10 мин, время прохода – 20 мин).

**Вторичное облако** – это облако, формируемое в период стационарного испарения (время существования определяется временем испарения разлитой жидкости).

Для приближенной оценки количества вещества ( $Q_1$ ), переходящего в первичное облако, можно использовать формулу:

$$Q_1 = \frac{Q \times C_v (t_a - t_k)}{\lambda}, \quad (4.4)$$

где  $Q$  – общее количество вещества в емкости, кг;

$C_v$  – удельная теплоемкость жидкости, кДж/(кг·град);

$t_a$  – температура жидкого вещества до разрушения емкости, °С;

$t_k$  – температура кипения вещества, °С;

$\lambda$  – удельная теплота испарения, кДж/кг.

При разрушении емкостей с высококипящими жидкостями, то есть с жидкостями 3 категории (гидразин, тетраэтилсвинец и др.) первичное облако практически не образуется. Основным процессом, определяющим поступление вещества во вторичное облако, является процесс его испарения с площади поверхности зеркала пролива.

Количество вещества, поступающего во вторичное облако, можно определить по формуле:

$$Q_2 = 3600 \times E \times S_{np} \times \tau, \quad (4.5)$$

где  $E$  – удельная скорость испарения, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$S_{np}$  – площадь поверхности зеркала пролива вещества, м<sup>2</sup>;

$\tau$  – время испарения, час.

Площадь поверхности зеркала пролива определяется по формуле:

$$S_{np} = \frac{\pi \times d_{np}^2}{4}, \quad (4.6)$$

где  $d_{np}$  – приведенный диаметр площади пролива.

При наличии поддона (обваловки):

$$d_{np} = 1,22 \times \sqrt{\frac{Q - Q_1}{\rho}}, \quad (4.7)$$

При отсутствии поддона (обваловки)

$$d_{np} = 5,04 \times \sqrt{\frac{Q - Q_1}{\rho}}, \quad (4.8)$$

где 1,22 и 5,04 – размерные коэффициенты, м<sup>-0.5</sup>.

## 4.6. Опасности объектов, содержащих сжатые газы

На объектах, содержащих сжатые газы, возможны следующие аварийные ситуации:

1. Выбросы газа: из скважины; из трубопровода при его разрыве на полное сечение; из сосуда высокого давления через отверстие.
2. Взрыв емкости, содержащей газ под давлением.

### 4.6.1. Выбросы газа

При выбросах газа можно выделить три этапа:

- истечение газа;
- рассеивание газа в атмосфере;

- горение высокоскоростной струи (в случае возгорания);
  - взрыв газовоздушной смеси в открытой атмосфере.
- Рассмотрим каждый из этих этапов.

### Истечение газа из скважины

При описании истечения газа из скважины выделяют три элемента:

- источник (скопление газа в природном пласте);
- канал (участок ствола, по которому поступает газ от источника);
- выходной участок (характеризуется выходным сечением оборудования или кратера).

Время истечения газа в зависимости от условий месторождения и мер по ликвидации аварии может составить от нескольких часов до нескольких лет. Поэтому основным параметром является объем газа, вытекаемый в единицу времени  $Q_H$  (дебит).

Для оценки среднего дебита пользуются методами гидрогазодинамического расчета скважин. Приток газа к забою описывают уравнением фильтрации [9]. Канал, по которому движется неуправляемый поток, описывается уравнениями сохранения массы и импульса. При описании процесса истечения газа на выходном участке считается, что скорость потока на выходе равна скорости звука. При таких условиях количество газа, истекаемого в единицу времени, определится по формуле:

$$Q_H = C_y \times W_{зв} \times F_y \times \frac{\rho_y}{\rho_H}, \quad (4.9)$$

где  $C_y$  – поправочный коэффициент, учитывающий специфику формирования конфигурации выходного сечения канала при аварии;

$W_{зв}$  – скорость звука;

$F_y$  – площадь поперечного сечения канала на устье скважины;

$\rho_y$  – плотность газа на устье скважины;

$\rho_H$  – плотность газа в нормальных условиях;

$Q_H$  – дебит газа из скважины в нормальных условиях.

Анализ аварий показывает, что дебит может находиться в пределах от 300 тысяч до 10 млн. м<sup>3</sup>/сутки, а давление на срезе – от 100 до 1000 кПа.

### Истечение газа при разрыве трубопровода на полное сечение

Описание истечения газа при разрыве трубопровода проводят системой дифференциальных уравнений массы, импульса и энергии.

В простейшем варианте считают, что произошло автоматическое перекрытие аварийного участка и газ истекает из разрыва только на одном конце участка. Общая масса газа, выброшенная при разрыве, может быть определена по формуле:

$$M_r = \frac{L_{эф} \times A \times d_0}{R \times Z_H \times T_H}, \quad (4.10)$$

где  $L_{эф} = 1,3 \times L$ , где  $L$  – длина отсечного участка трубопровода, м;

$A$  – площадь поперечного сечения трубопровода;

$d_0$  – внутренний диаметр трубы;

$R$  – газовая постоянная;

$Z_n$  – коэффициент сжимаемости газа до разрыва при параметрах  $P_n, T_n$  ( $P_n, T_n$  – температура и давление газа в трубопроводе до разрыва).

### Истечение газа через «отверстие» из сосуда высокого давления

Рассмотрим критическое истечение идеального газа из толстостенного сосуда высокого давления либо при аварийном обрыве патрубка, либо из отверстия, образованного за счет коррозии.

Изменение параметров состояния газа в емкости описывается системой уравнений термодинамики тела с переменной массой:

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{k-1}{V} \left( \frac{dq}{d\tau} - i \times G \right) \quad (4.11)$$

$$\frac{dP}{d\rho} = \frac{k-1}{G} \left( \frac{dq}{d\tau} - i \times G \right), \quad (4.12)$$

где  $k = \frac{c_p}{c_v}$  – показатель адиабаты;

$V$  – объем сосуда;

$\frac{dq}{d\tau}$  – тепловой поток от стенки сосуда к газу;

$i$  – энтальпия газа;

$$i = \frac{k}{k-1} \times R \times T_G, \quad (4.13)$$

где  $T_G$  – температура газа;

$G$  – массовый расход.

$$G = \mu \times f_0 \times B \times \frac{P}{\sqrt{T_G}}, \quad (4.14)$$

где  $P$  – давление;

$\mu$  – коэффициент расхода;

$f_0$  – площадь сечения отверстия;

$$B = \sqrt{k \times \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \times \frac{1}{R}}. \quad (4.15)$$

Пример динамики опорожнения технологического сосуда под давлением. Метан, объем сосуда 600 м<sup>3</sup>, начальное давление 80 кгс/см<sup>2</sup>, начальная температура 258 К. Диаметр выходного отверстия 0,15 м, коэффициент расхода 0,8. Для таких условий начальный массовый расход будет 200 кг/сек, а время выброса – 500 сек.

### Рассеивание в атмосфере аварийных выбросов газов из скважин, трубопроводов и аппаратов

На начальном этапе выбрасываемая примесь рассеивается по законам струйного смешения, а область загрязнения представляет собой изогнутый расходящийся в направлении ветра конус, касающийся земли на некотором

расстоянии от источника выброса. На определенном расстоянии от источника осевая скорость струи становится соизмерима со скоростью сносящего воздушного потока и начинает доминировать диффузионный механизм рассеивания.



Рис. 4.5. Схема рассеивание в атмосфере аварийных выбросов

Таким образом, при выбросе газа образуются два участка рассеивания: струйный участок и диффузионный след. Поэтому для определения поля концентраций используют комплексные струйно-диффузионные модели. Дальность распространения опасных концентраций может достигать 20 км.

### Горение высокоскоростной струи

При горении газовых струй принимают модель горения поверхностного источника (рис. 4.6). В основе этой модели лежит предположение, что пламя является трехмерным объемным телом, а излучение в окружающее пространство происходит с наружной оболочки пламени как твердого тела и выражается через коэффициент излучения и величину общего тепловыделения. При выбросе из скважины струя горения имеет форму конуса длиной до 150 м.

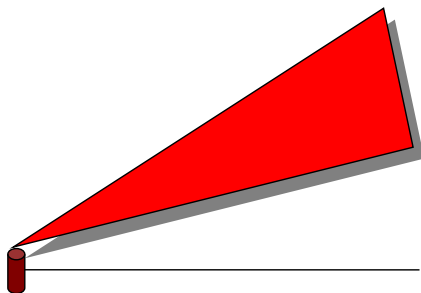


Рис. 4.6. Схема горения поверхностного источника

При разрушении магистрального газопровода возникают:

- ударная волна за счет расширения в атмосфере газа, заключенного под давлением в объеме «мгновенно» разрушившейся части трубопровода;
- ударная волна, образующаяся при воспламенении газового шлейфа и расширении продуктов сгорания;
- образование и разлет осколков из разрушенной части трубопровода;
- возможности воспламенения газа и термическим воздействием пожара.

Ударная волна формируется слабая – до 0,25 бар в эпицентре.

Осколки могут разлететься максимум на расстояние до 250 метров.

Радиус термического воздействия может составить 300 метров.

При воспламенении происходит быстрое (вспышкообразное) сгорание лишь малой части шлейфа, остальной газ горит медленно ( $V=10$  м/с) отдельными зонами [11].

### **Взрыв газозвушной смеси в открытой атмосфере**

Целый ряд тяжелых катастроф имел место при взрывах газозвушных смесей (ГВС) в атмосфере. При аварии, сопровождающейся разгерметизацией емкости, содержащей сжатый или сжиженный горючий газ, или разрыве газопровода обычно образуется облако газозвушной смеси. Характер взрыва облака ГВС зависит от ряда факторов: его размеров, распределения и концентрации горючей примеси по облаку, величины энергии инициирования. Возможны режимы горения, взрывного горения, детонации, а также их комбинации. Воспламенение облака происходит при наличии источника зажигания. При этом возможен переход дефлаграционного дозвукового режима к детонационному сверхзвуковому. Детонационный режим может возникнуть и непосредственно, например, от взрыва детонатора или электрической искры, если размеры облака превышают некоторое критическое значение.

Значительная часть взрывов ГВС, наблюдавшихся в различных промышленных и транспортных авариях, происходила в режиме, когда часть горючего вещества взрывается, а часть сгорает. Для оценки поражающего действия такого взрыва используется энергетический подход.

Тритиловый эквивалент взрыва находится по соотношению:

$$G = \frac{\alpha M Q_v}{Q_{vTP}}, \quad (4.16)$$

где  $G$  – тритиловый эквивалент взрыва, кг;

$M$  – масса горючего газа в облаке ГВС, кг;

$Q_v$  – теплота взрыва этого газа, Дж/кг;

$Q_{vTP}$  – теплота взрыва тритила, Дж/кг;

$\alpha$  – доля прореагировавшего при взрыве горючего вещества.

В приближенных расчетах обычно полагают  $\alpha=0,1$ . При определении величины  $M$  принимают  $M=\omega M_0$ , где  $M_0$  – исходная масса сжатого или сжиженного газа в емкости, а также выброшенного в атмосферу при аварии на газопроводе. Коэффициент  $\omega$  определяют в зависимости от способа хранения или транспортировки горючего вещества:  $\omega=1$  для сжатых газов и газов при

атмосферном давлении;  $\omega=0,5$  для газов, сжиженных под давлением;  $\omega=0,1$  для газов, сжиженных охлаждением;  $\omega=0,02\div 0,07$  – при растекании легковоспламеняющихся жидкостей. Последующие вычисления давления во фронте ударной волны  $\Delta P_{\phi}$  на расстояниях, превышающих примерно полтора-два радиуса облака, проводятся по формуле Садовского [12]:

$$\Delta P_{\phi} = 95 \frac{\sqrt[3]{G}}{R} + 390 \frac{\sqrt[3]{G^2}}{R^2} + 1300 \frac{G}{R^3} . \quad (4.17)$$

#### 4.6.2. Взрыв емкости, содержащей газ под давлением

Взрыв емкости, находящейся под внутренним давлением газа, относится к группе физических взрывов, обусловленных различными физическими процессами. Разрушение емкости сопровождается быстрым расширением газа. При этом в окружающем воздушном пространстве формируется ударная волна и поле осколков. В приближенных расчетах для оценки параметров ударной волны и дальности разлета осколков используется энергетический подход.

Энергия взрыва определяется по формуле:

$$E = \frac{P_r V_0}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P_r} \right)^{\frac{\gamma - 1}{r}} \right], \quad (4.18)$$

где  $E$  – энергия взрыва, Дж;

$P_r$  – давление газа в емкости, Па;

$P_0$  – атмосферное давление, Па;

$V_0$  – объем емкости, м<sup>3</sup>;

$\gamma$  – показатель адиабаты (1...2).

Последующий расчет давления во фронте воздушной ударной волны проводится по формулам (4.16), (4.17) при замене величины  $\alpha M Q_v$  на  $E$ .

#### 4.7. Опасности, связанные с взрывами конденсированных взрывчатых веществ и пылевых облаков

**Взрыв** – это процесс чрезвычайно быстрого превращения вещества, сопровождающийся выделением большого количества энергии. В результате взрыва вещество, заполнявшее определенный объем, превращается в сильно нагретый и сжатый газ (продукты взрыва). Область, заполненная продуктами взрыва, стремительно расширяется, сжимая и приводя в движение окружающую среду. Порожденное взрывом движение внешней среды проявляется в виде специфического волнового процесса – ударной волны. Ударная волна распространяется со сверхзвуковой скоростью. По мере удаления от центра взрыва скорость ударной волны снижается и на больших расстояниях приближается к звуковой. Ударная волна является основным поражающим фактором взрыва. Поражающее действие ударной волны связано,



в основном, с действием избыточного давления и скоростного напора воздуха в фазе сжатия.

Важной характеристикой взрыва является скорость распространения взрывчатого превращения. В зависимости от величины этой скорости различают дефлаграционное (дозвуковое) горение и детонацию. Взрывы большинства конденсированных ВВ протекают в режиме детонации.

При детонации процесс взрывчатого превращения идет с максимальной для данного вещества скоростью, превышающей скорость звука. Скорость детонации является определенной константой каждого ВВ. В условиях детонации достигается максимальное разрушительное действие взрыва.

Взрывы можно разделить на химические и физические. Источник энергии химических взрывов заключается в энергии молекулярных связей. При взрыве происходит превращение относительно сложных нестойких молекул исходного вещества в молекулы более простых веществ, взрывы конденсированных ВВ относятся к химическим взрывам.

Конденсированные взрывчатые вещества – это, в основном, твердые вещества, например, тротил  $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$ , гексоген  $(CH_2NNO_2)_3$ , гремучая ртуть  $Hg(ONC)_2$  и др. Имеется некоторое количество жидких ВВ, например, нитроглицерин  $C_3H_5(ONO_2)_3$ .

Избыточное давление во фронте ударной волны при взрыве тротилового заряда определяется по формуле М. А. Садовского [1]:

$$\Delta P_{\phi} = 95 \frac{\sqrt[3]{G}}{R} + 390 \frac{\sqrt[3]{G^2}}{R^2} + 1300 \frac{G}{R^3}, \quad (4.19)$$

где  $\Delta P_{\phi}$  – избыточное давление, кПа;

$G$  – масса тротилового заряда, кг;

$R$  – расстояние от центра взрыва, м.

Длительность фазы сжатия  $\tau_+$ , с, рассчитывается по соотношению [1]

$$\tau_+ = 1,5 \times 10^{-3} \times \sqrt[6]{G} \sqrt{R}, \quad (4.20)$$

Максимальное давление скоростного напора воздуха за фронтом ударной волны  $\Delta P_{СК}$ , Па, находится по соотношению

$$\Delta P_{СК} = C_K \times \frac{P_{\phi} \times V_{\phi}^2}{2}, \quad (4.21)$$

где  $C_K$  – коэффициент лобового сопротивления тела.

Формула, применяемая в расчетах давления взрыва пылевоздушных смесей:

$$\Delta P = \frac{\alpha M Q_v P_0}{\gamma \rho_0 V_0 T_0 C_p}, \quad (4.22)$$

где  $\Delta P$  – избыточное давление взрыва, кПа;

$P_0$  – давление, кПа;

$\rho_0$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$T_0$  – температура воздуха в помещении, °К до взрыва соответственно;

$C_p$  – удельная теплоемкость воздуха ( $C_p \approx 1,01$  кДж/кг·град);

$V_0$  – свободный объем помещения, м<sup>3</sup>;

$M$  – масса горючей пыли, кг

$Q_v$  – теплота взрыва горючей пыли, кДж; коэффициенты

$\alpha=0,5$ ,  $\aleph \approx 3$ .

Значения теплоты взрыва пыли  $Q_v$  приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Теплота взрыва горючих пылей

Горючее вещество	Теплота взрыва $Q_v$ , кДж/кг
Антрацитовая пыль	$(32 \div 36) \cdot 10^3$
Пыль древесная сосновая	$15,4 \cdot 10^3$
Пыль древесная еловая	$20,4 \cdot 10^3$
Пыль торфяная	$10,5 \cdot 10^3$
Пыль мучная	$16,8 \cdot 10^3$

Для пыли определяют величину НКП. Значения НКП при диаметре частиц менее 100 мкм находят по соотношению:

$$\text{НКП} = 800/Q_v, \quad (4.23)$$

где НКП – нижний концентрационный предел, кг/м<sup>3</sup>;

$Q_v$  – теплота взрыва пыли, кДж/кг.

При взрыве аэрозолей давления  $\Delta P$ ,  $\Delta P_m$  рассчитываются по формуле (4.22), где под величинами  $M$ ,  $Q_v$  понимают массу в кг и теплоту взрыва в кДж/кг горючего вещества в составе аэрозоля; величины  $P_0$ ,  $\rho_0$ ,  $V_0$ ,  $T_0$ ,  $C_p$  сохраняют прежние значения; коэффициенты  $\alpha=0,5$ ,  $\aleph \approx 3$ . Значения  $Q_v$  в важных частных случаях образования аэрозолей таким топливом, как бензин, керосин, мазут, нефть составляют 42; 44; 39,8; 42 МДж/кг соответственно.

#### 4.8. Оценка последствий взрывов

В качестве количественного показателя действия ударной волны на объект принимается избыточное давление  $\Delta P_\Phi$  во фронте УВ. При воздействии УВ объект может не поражаться или получить повреждения той или иной степени тяжести (слабые, средние, сильные, полное разрушение). Наиболее простая – ступенчатая оценка типа «поражен – не поражен» производится сравнением действующего избыточного давления  $\Delta P_\Phi$  и критерия устойчивости объекта для ударной волны – поражающего избыточного давления  $\Delta P_\Pi$ . В качестве  $\Delta P_\Pi$  обычно принимают нижний предел избыточного давления, при котором здания, сооружения, оборудование, системы электроснабжения получают *средние* повреждения. Более точная оценка позволяет рассчитать материальный ущерб и средства для восстановления. Так, для кирпичного одноэтажного здания сильные повреждения возникают при  $\Delta P_\Phi = 25 \dots 35$  кПа, средние – при  $\Delta P_\Phi = 15 \dots 25$  кПа, слабые – при  $\Delta P_\Phi = 8 \dots 15$  кПа (рис. 4.7).

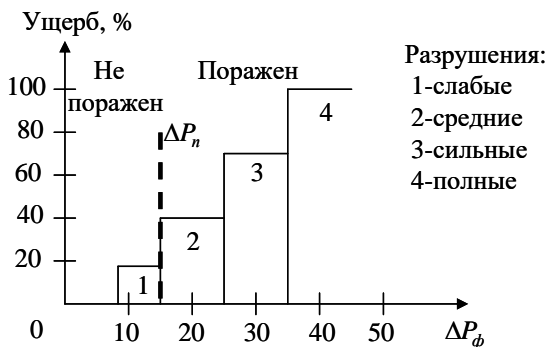


Рис. 4.7. Оценка поражения объекта

В ряде случаев, например, при оценке риска, требуется получить вероятностную оценку разрушения объекта, т.е. вероятность разрушения как функцию избыточного давления  $\Delta P_\phi$  в ударной волне (параметрический закон поражения) или как функцию расстояния  $R$  до объекта (координатный закон поражения).

Параметрический закон поражения устанавливает зависимость вероятности  $P$  поражения объекта от значения параметра поражающего воздействия  $\Delta P_\phi$ . Будем считать, что избыточное давление во фронте УВ, вызывающее разрушение объекта (поражающее избыточное давление)  $\Delta P_\Pi$  – случайная величина для данного типа объектов. Значение  $\Delta P_\Pi$  зависит от того, с какой стороны объекта произведен взрыв, каково состояние атмосферы, каковы индивидуальные особенности данного объекта среди подобных и т.д. – т.е. от многих случайных факторов, интенсивность влияния которых на  $\Delta P_\Pi$  приблизительно одинакова. Тогда можно предположить, что величина  $\Delta P_\Pi$  распределена по нормальному закону (формально считаем  $-\infty < \Delta P_\Pi < +\infty$ ):

$$f(\Delta P_\Pi) = \frac{1}{\sigma_p \times \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\Delta P_\Pi - \overline{\Delta P_\Pi})^2}{2\sigma_p^2} \right], \quad (4.24)$$

где  $\overline{\Delta P_\Pi}$  – математическое ожидание поражающего избыточного давления;

$\sigma_p^2$  – дисперсия случайной величины  $\Delta P_\Pi$ .

Вероятность поражения объекта при заданном значении  $\Delta P_\phi$  – это вероятность того, что величина  $\Delta P_\phi$  превысит случайное значение поражающего давления  $\Delta P_\Pi$ :

$$P = P\{\Delta P_\phi > \Delta P_\Pi\} = \int_0^{\Delta P_\phi} f(\Delta P_\Pi) d(\Delta P_\Pi) \quad (4.25)$$

При незначительной ошибке нижний предел интегрирования «0» можно заменить на « $-\infty$ ». Получаемый параметрический закон поражения приведен на рис. 4.9.

Определение параметров нормального распределения  $\overline{\Delta P_n}, \sigma_p$  является самостоятельной сложной задачей, однако при инженерных расчетах можно воспользоваться выражениями:

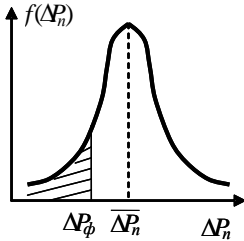


Рис. 4.8. Нормальный закон распределения

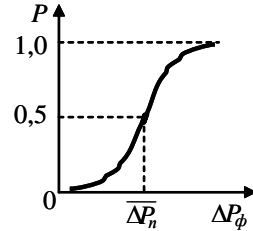


Рис. 4.9. Параметрический закон поражения

$$\overline{\Delta P_n} = \frac{\Delta P_{\min} + \Delta P_{\max}}{2}, \quad \sigma_p = \frac{\Delta P_{\max} - \Delta P_{\min}}{6}, \quad (4.26)$$

где  $\Delta P_{\min}$  – минимальное избыточное давление, определяющее нижнюю границу слабых разрушений (в приведенном выше примере  $\Delta P_{\min} = 8$  кПа);

$\Delta P_{\max}$  – максимальное избыточное давление, определяющее верхнюю границу сильных разрушений (в примере  $\Delta P_{\max} = 35$  кПа).

Такой подход обусловлен тем, что для нормального закона распределения вероятность того, что случайная величина  $\Delta P_n$  принимает значения  $\Delta P_n \leq \overline{\Delta P_n} - 3\sigma_p$ , составляет 0,0014 (практически нереализуемое событие), а вероятность того, что  $\Delta P_n \geq \overline{\Delta P_n} + 3\sigma_p$ , составляет 0,9986 (практически достоверное событие) – правило «трех сигм».

Расчет вероятности поражения по формуле (4.25) удобнее проводить, если привести распределение (4.24) к стандартному нормальному закону  $f(z)$  с параметрами  $\bar{z} = 0, \sigma_z = 1$ :

$$z = \frac{\Delta P_n - \overline{\Delta P_n}}{\sigma_p}. \quad (4.27)$$

Тогда вероятность поражения объекта:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z^*} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 0,5 + \Phi(z^*), \quad (4.28)$$

где  $z^* = \frac{\Delta P_\phi - \overline{\Delta P_n}}{\sigma_p}$ ,  $\Phi(z^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z^*} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$ .

Функция  $\Phi(x)$  – нечетная ( $\Phi(-x) = -\Phi(x)$ ), табулированная – интеграл Лапласа или интеграл ошибок (рис. 4.10).

При инженерных расчетах вероятности  $P$  по формуле (4.28) не всегда удобно искать значения  $\Phi(z^*)$  с помощью таблиц, тогда можно использовать аппроксимацию  $\Phi_a(x)$  функции Лапласа:

$$\Phi_a(x) = 0,5 \left[ 1 - \exp(-0,37x^2 - 0,8x) \right], \quad (4.29)$$

но определенную только для неотрицательных значений аргумента, т.е. для

$$z^* = \frac{\Delta P_\phi - \overline{\Delta P_n}}{\sigma_p} \geq 0.$$

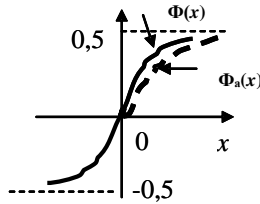


Рис. 4.10. График функций  $\Phi(x)$  и  $\Phi_a(x)$

При отрицательных значениях  $z^*$  можно воспользоваться нечетностью  $\Phi(x)$  и считать  $\Phi_a(-x) = -\Phi_a(|-x|)$ .

Тогда вероятность поражения объекта при  $\Delta P_\phi \geq \overline{\Delta P_n}$  (т.е.  $z^* \geq 0$ ) определится выражением:

$$P = 0,5 + \Phi_a(z^*), \quad (4.30)$$

Если  $\Delta P_\phi \leq \overline{\Delta P_n}$  (т.е.  $z^* \leq 0$ ), то вероятность поражения определяется по формуле:

$$P = 0,5 - \Phi(|z^*|), \quad (4.31)$$

Следует отметить, что параметрический закон (рис. 4.9) можно использовать и для других видов поражающих воздействий, например, термического воздействия при оценке пожарной обстановки, облучения ионизирующими излучениями и т. д.

### Координатный закон поражения

Координатный закон поражения устанавливает зависимость вероятности  $P$  поражения объекта от расстояния  $R$  до взрыва (рис. 4.11).

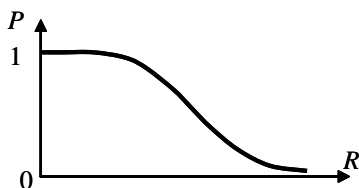


Рис. 4.11. Координатный закон поражения

Случайная величина при этом (критерий поражения) – расстояние  $R_n$ , на котором происходит поражение объекта для данного взрыва. Построение координатного закона производится аналогично параметрическому на основе данных по поражению объекта.

#### 4.9. Методика оценки опасности объектов, содержащих горючие и взрывчатые вещества

##### Назначение методики

##### Методика определяет:

- а) порядок проведения предварительной укрупненной оценки вредного воздействия на здоровье и безопасность людей при возможных авариях, связанных с наличием большого количества пожароопасных, взрывоопасных и токсичных химических веществ;
- б) количественные характеристики опасности и алгоритмы их расчета.

##### Основные понятия:

**Под сценарием или типом аварии** понимается характерный вариант развития аварийного процесса. Источником воздействия или опасности являются:

- а) элементы основной и вспомогательной технологий;
- б) хранилища;
- в) средства транспорта.

Объектом воздействия является персонал предприятия и население, проживающее на прилегающей территории. Каждый такой объект с позиции оценки опасности характеризуется вместимостью (максимальным числом одновременно присутствующих людей).

##### Определяемые характеристики:

Количественными характеристиками вредного воздействия источника являются:

- 1) Возможные безвозвратные потери. Под безвозвратными потерями будем понимать количество смертельных случаев в результате аварии.
- 2) Возможные санитарные потери. Под санитарными потерями будем понимать количество пострадавших, нуждающихся в госпитализации.

### 3) Ожидаемая частота аварий.

Источник воздействия относится к категории потенциально опасных, а возможная авария считается крупной, если ожидаемые безвозвратные людские потери составляют не менее 10 человек (в соответствии с «Методикой оперативной оценки потенциальной опасности объектов народного хозяйства»).

Безвозвратные и санитарные потери определяются количеством людей, находящихся в пределах зон безвозвратного и санитарного поражения.

Под зонами поражения понимаются участки территории, для которых интенсивность возникающих в результате аварии поражающих факторов достаточна для причинения людям поражения соответствующей тяжести.

#### **Критерии для определения тяжести поражения:**

**Тепловое излучение.** Смертельное поражение получают 100% людей, находящихся в непосредственном контакте с огнем, т. е. в пределах пожара или вспышки, а также на пути огневого шара или столба.

Санитарное поражение получают люди в тех местах, где тепловое облучение достаточно для образования ожогов второй степени на открытых частях тела (поток излучения более 7 кВт/м<sup>2</sup> в течение 30 секунд).

**Взрыв.** Критерии поражения в этом случае зависят от типа источника вызвавшего взрыв. Смертельное поражение при взрыве газового облака получают 100% людей, находящихся в пределах облака газа, причиной смерти будут ожоги и асфиксия от недостатка кислорода.

При детонации конденсированного взрывчатого вещества смертельное поражение от ударной волны и разлета обломков получают люди в непосредственной близости от места взрыва (10...100 м).

Санитарное поражение при взрыве получают люди в тех местах, где максимальное избыточное давление ударной волны больше 0,1 атм (10 кПа).

#### **Классификация опасных веществ**

Оценка опасности проводится для следующих трех групп опасных веществ:

П – пожароопасных; ПВ – пожаро- и взрывоопасных; В – взрывоопасных;

Вещества каждой группы подразделяются на классы в зависимости от агрегатного состояния при нормальных давлении и температуре, а также условий хранения, переработки или транспортировки:

А – горючие жидкости; Б – горючие газы, сжиженные сжатием;

В – горючие газы, сжиженные охлаждением; Г – горючие газы под давлением;

Д – взрывоопасные вещества;

Вещества каждого класса подразделяются по степени опасности, которая характеризуется:

а) интенсивность развития аварийных процессов;

б) силу воздействия поражающих факторов.

Степень опасности задается целым числом:

1 – очень низкая; 2 – низкая; 3 – средняя; 4 – высокая; 5 – очень высокая; 6 – чрезвычайно высокая.

В ряде случаев степень опасности вещества может варьироваться в зависимости от класса вещества и обстоятельств аварии.

**Горючие жидкости.** Горючие жидкости подразделяются на две категории в зависимости от возможных физических эффектов при развитии аварии:

а) Горючие жидкости, для которых существует только пожар разлития (около 100 веществ):

- ацетон;
- бензол;
- дизельное топливо;
- керосин;
- изобутанол;
- хлорбензол;
- циклогексан.

б) Горючие жидкости, для которых возможен также взрыв газового облака (примерно 10 веществ):

- бензин;
- газовый конденсат;
- диэтиловый эфир;
- сероуглерод;
- циклопентан.

Категория жидкости определяется давлением паров, при температуре 20 °С жидкости с давлением паров  $P_v > 30$  кПа, могут образовывать взрывоопасное газовое облако.

**Горючие газы.** Горючие газы, сжиженные охлаждением, подразделяются на две степени опасности в зависимости от температуры кипения. Различия в физических эффектах, обусловленных условиями хранения газа, учитываются в параметризациях размеров зон поражения.

Для газов с температурой кипения  $T > 235$  °К степень опасности равна 3, для остальных газов – 4.

**Горючие газы 3 степени опасности:**

- бутан;
- дивинил;
- изобутилен;
- уксусный альдегид;
- этилхлорид.

**Горючие газы 4 степени опасности:**

- водород;
- изобутан;
- метан;
- природный газ;
- пропан;
- этан.



### **Взрывоопасные вещества:**

- аммиачная селитра;
- гремучая ртуть;
- динамит;
- нитроглицерин;
- перекись бензоила;
- тринитротолуол;
- черный порох.

### **Сценарии аварий и формы зон поражения**

Возможны следующие сценарии развития аварий:

#### **Для горючих жидкостей (класс А):**

- A1 – пожар разлития;
- A2 – взрыв газового облака.

#### **Для горючих газов, сжиженных сжатием (класс Б):**

- B1 – взрыв вскипания «BLEVE»;
- B2 – взрыв мгновенного выброса;
- B3 – взрыв вытекающей жидкости.

#### **Для горючих газов, сжиженных охлаждением (класс В):**

- B1 – пожар разлития.

#### **Для горючих газов, сжатых давлением (класс Г):**

- G1 – пожар.

#### **Для взрывчатых веществ (класс Д):**

- D1 – взрыв.

### **Формы зон поражения**

Зоны безвозвратного и санитарного поражения задаются формой, размерами и расположением относительно источника воздействия.

Граница каждой из зон поражения может быть аппроксимирована (рис. 4.12):

- О – окружностью;
- П – прямоугольником.

Для зоны поражения в виде круга размер задается радиусом круга R.

Для прямоугольной зоны поражения размеры задаются длиной L и шириной W. Длина отсчитывается вдоль оси симметрии прямоугольника, проходящей через источник воздействия.

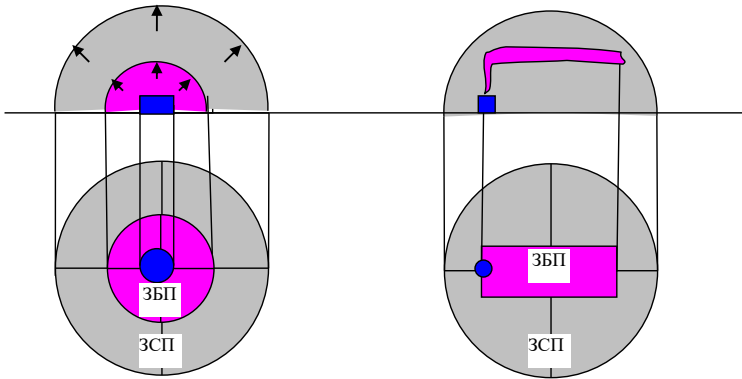
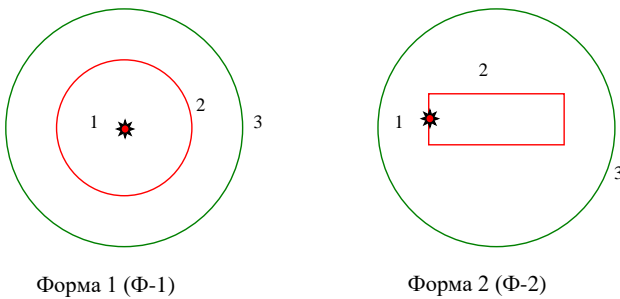


Рис. 4.12. Схема формирования зон поражения

**в1** – зоны поражения имеют форму концентрических кругов, их центр совпадает с источником воздействия (форма 1);

**в2** – зона безвозвратного поражения имеет форму прямоугольника, источник воздействия расположен на границе зоны. Зона санитарного поражения имеет форму круга, центр которого совпадает с центром зоны безвозвратного поражения (форма 2). Приведены на рис. 4.13.



Форма 1 (Ф-1)

Форма 2 (Ф-2)

Рис. 4.13. Формы зон поражения:

- 1 – источник воздействия;
- 2 – граница зоны безвозвратного поражения;
- 3 – граница зоны санитарного поражения

## Методика расчета

### Допущения, принятые в методике

1. В методике использованы приближенные алгоритмы, ориентированные на получение максимальных вероятных количественных оценок опасности.
2. Предполагается, что интенсивность развития аварийных процессов является максимальной, и в них вовлечен весь объем опасного вещества.
3. Оценки параметров рассеяния облаков опасных веществ выполнены для погодных условий с нейтральным состоянием приземного слоя атмосферы и скоростью ветра 5 м/с. Рассматриваемые формы состояния приведены на рис. 4.14.

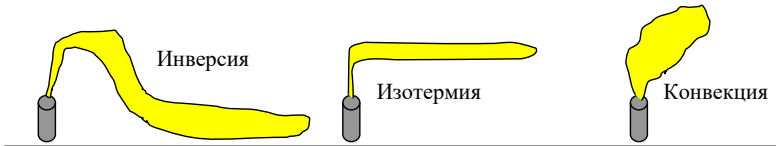


Рис. 4.14. Формы состояния устойчивости атмосферы

4. Подразделение веществ по степеням опасности выполнено таким образом, что для 80...90% веществ с данной степенью опасности размеры зон поражения меньше, чем рассчитанные с помощью алгоритмов, изложенных в методике.

### Расчет зон поражения

Линейные размеры зон поражения в большинстве случаев определяются по формуле вида:

$$y = a \times x^b \quad (4.32)$$

где параметр «х» характеризует количество опасного вещества, вовлеченного в аварию.

Используются также следующие расчетные формулы:

$$y = x^{0,5} \quad (4.33)$$

$$y = a \times x + b \quad (4.34)$$

$$y = a \quad (4.35)$$

Линейные размеры измеряются в метрах, площадь – в квадратных метрах, объемы – в кубических метрах, вес – в тоннах.

Расчет зон поражения производится путем последовательного выполнения ряда процедур.

Для каждого источника воздействия определяется опасное вещество, его класс и при необходимости степень опасности. В соответствии с классом вещества определяется значение параметра, являющегося количественной характеристикой источника воздействия. В зависимости от класса вещества отбираются подходящие сценарии развития аварии, для каждого сценария

производится расчет линейных размеров зон поражения. Нужные значения отбираются в соответствии со сценарием и степенью опасности вещества.

### **Горючие жидкости (класс А) (для ЛВЖ)**

Для горючих жидкостей есть два основных сценария развития аварии:

A1 – пожар разлития – горение вещества разлития, испаряющегося с поверхности жидкости. Разлитие возникает при истечении жидкости из технологических емкостей в случае нарушения их целостности.

Пожар разлития возможен для всех веществ данного класса. Форма и относительное расположение зон поражения соответствует (Ф-1). Размеры зон поражения определяются площадью возможного разлития жидкости (параметр «X»). Длина зон поражения определяется по формуле  $Y=a \times X^b$ .

A2 – взрыв газового облака — характеризуется возникновением ударной волны при сгорании смеси паров опасного вещества, его капель и воздуха. Размеры зон поражения определяются площадью возможного разлития жидкости (параметр «X»).

Газовые облака способны образовывать только вещества группы (ПВ). Форма и относительное расположение зон поражения для взрыва газового облака соответствуют (Ф-2). Длина зоны безвозвратного поражения определяется по формуле  $Y=a \times X^b$ , а ширина задается соотношением  $W=X^{0,5}$ , где параметр X равен площади разлития. Радиус зоны санитарного поражения определяется по формуле  $Y=a \times X^b$ .

### **Горючие газы, сжиженные сжатием (класс Б)**

Для горючих газов, сжиженных сжатием, возможны три сценария развития аварии:

Размеры зон поражения определяются весом сжиженного газа и зависят от степени опасности газа.

B1 – взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости происходит в случае мгновенного высвобождения сжиженного газа и немедленного возгорания. Резкое падение давления вызывает вскипание жидкости и образование воздушной ударной волны, осколочного поля и мгновенное воспламенение парового облака, сопровождающееся возникновением огневого шара. Взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости характерен для наземных – хранилищ. Расположение зон поражения соответствует (Ф-1). Радиусы зон определяются по формуле  $Y=a \times X^b$ . В зависимости от степени опасности газа следует использовать различные значения коэффициентов «a» и «b».

B2 – взрыв мгновенного выброса происходит в случае мгновенного высвобождения сжиженного газа с последующим возгоранием. Взрыв газового облака мгновенного выброса характерен для наземных хранилищ емкостью до 50т. Форма и относительное расположение зон поражения соответствуют (Ф-2), размеры зон определяются по формуле  $Y=a \times X^b$ ,  $W=a \times X^b$ .

B3 – взрыв газового облака вытекающей жидкости происходит в случае постепенного вытекания сжиженного газа с последующим возгоранием.

Взрыв газового облака вытекающей жидкости характерен для перерабатывающих предприятий и подземных хранилищ. Форма и

относительное расположение зон поражения соответствуют (Ф-2), размеры зон определяются по формуле  $Y=a \times X^b$ ,  $W=a \times X^b$ .

Размеры зон поражения определяются весом сжиженного газа и зависят от степени опасности газа.

#### **Горючие газы, сжиженные охлаждением (класс В)**

Источниками воздействия, где встречаются горючие газы, сжиженные охлаждением, являются хранилища. Характерный сценарий аварии:

В1 – пожар разлития площадью 1500 м<sup>2</sup>.

Расположение зон поражения соответствует (Ф-1), их размеры определяются по формуле  $Y=a \times X+b$ .

#### **Горючие газы под давлением (класс Г)**

Аварии с опасными веществами данного класса для магистральных и распределительных газопроводов, основным сценарием аварии является: Г1 – пожар. Зона поражения имеют форму концентрических кругов с центром в месте утечки газа (Ф-1). Радиусы зон зависят от диаметра газопровода (параметр «X») и определяется по формуле  $Y=a \times X+b$ .

#### **Взрывоопасные вещества (класс Д)**

Основным сценарием аварии является:

Д1 – взрыв, т. е. быстрое выделение энергии в ограниченном объеме, связанное с внезапным изменением состояния вещества и сопровождающееся разбрасыванием и разрушением окружающей среды.

Форма и расположение зон поражения соответствует Ф-1. Радиусы зон зависят от ТНТ-эквивалента взрывоопасного вещества и определяются по формуле  $Y=a \times X^b$ .

Для приближенного определения ТНТ-эквивалента достаточно вес опасного вещества умножить на 10 для органических пероксидов, оставить без изменения для чистых взрывчатых веществ и разделить на 10 для пиротехнических изделий.

Варианты сценариев и значений коэффициентов зон поражения приведены в таблице 4.5.

#### **Расчет людских потерь**

Если есть данные о фактическом распределении людей на объекте, то рисуем зоны на генплане объекта или на карте и определяем, сколько людей попало в ту или иную зону. Если этих данных нет, то рассчитываем или максимальные, или средние потери.

**Расчет максимальных людских потерь.** Расчет максимальных людских потерь производится исходя из данных о зонах безвозвратного и санитарного поражения, а также расположения на местности источника и объектов воздействия.

Учитывается плотность населения на данной территории (таблица 4.6).

Таблица 4.5 – Коэффициенты расчета зон поражения

Сценарий	Степень опасности	Тип зоны	Размер зоны	a	b	Формула
A1 (пожар разлития)		Б	R	0,56	0,5	$X$ – площадь разлития
		С	R	3,02	0,46	$Y=a \times X^b$
A2 (взрыв газового облака)		Б	L	0,24	0,62	$L=a \times X^b$ ; $W=X^{0,5}$
		С	R	0,61	0,54	$Y=a \times X^b$
B1 (взрыв BLEVE)	3	Б	R	26,9	0,30	$X$ – вес сжиженного газа
		С	R	102	0,32	$Y=a \times X^b$
	4	Б	R	33,9	0,30	
С		R	138	0,32		
B2 (взрыв выброса)	3	Б	L	68,5	0,46	$L=a \times X^b$ ;
			W	8,7	0,33	$W=a \times X^b$
		С	R	52	0,39	$Y=a \times X^b$
	4	Б	L	152	0,34	
			W	12,9	0,33	
С	R	72,5	0,37			
B3 (взрыв вытекания)	3	Б	L	27,5	0,24	$L=a \times X^b$ ;
			W	1,46	0,22	$W=a \times X^b$
		С	R	25,1	0,17	$Y=a \times X^b$
	4	Б	L	66,3	0,22	
			W	2,97	0,22	
С	R	39,9	0,19			
B1 (пожар разлития)		Б	R	0	23	$X$ –площадь разлития
		С	R	0	120	$Y=a \times X+b$
Г1 (пожар)		Б	R	38,9	-1,7	$X$ –диаметр газопровода
		С	R	105	3	$Y=a \times X+b$
Д1 (взрыв)		Б	R	19,5	0,31	$X$ – вес $BB \times k$ ( $k=0,1;1;10$ )
		С	R	142	0,33	$Y=a \times X^b$

Таблица 4.6 – Стандартные плотности населения

№	Характеристика района	Плотность, чел/км <sup>2</sup>
1	Отдельный жилой район	100
2	Жилой район с единичной застройкой	500
3	Тихий жилой район	2500
4	Оживленный жилой район	7000
5	Городской жилой район	12000
6	Промышленная зона низкой плотности	500
7	Промышленная зона средней плотности	4000
8	Промышленная зона высокой плотности	8000
9	Небольшой торговый центр или район	10000
10	Средний торговый центр или район	50000
11	Большой торговый центр или район	100000
12	Малопосещаемая зона отдыха и занятий спортом	2500
13	Интенсивно используемая зона отдыха и занятий спортом	50000
14	Очень интенсивно используемая зона отдыха и занятий спортом	250000

Безвозвратные потери равны числу людей, попадающих в пределы зоны безвозвратного поражения. Санитарные потери равны числу людей, падающих в пределы части зоны санитарного поражения, находящейся вне зоны безвозвратного поражения. В случае асимметричного расположения зоны безвозвратного поражения относительно источника воздействия выбирается такая ее ориентация, при которой безвозвратные потери имеют максимальное значение.

Если для источника воздействия возможны несколько сценариев аварии, то для получения итоговых оценок выбирается сценарий, приводящий к наибольшему безвозвратным людским потерям.

В случае отсутствия детальных сведений о распределении объектов воздействия вблизи источника для приближенной оценки людских потерь можно использовать соотношение:

$$N = R \times S_a, \quad (4.36)$$

где  $N$  – величина потерь. Индекс «а» задает тип поражения (Б, С);

$R$  – плотность населения в окрестности источника воздействия;

$S_б$  – площадь зоны безвозвратного поражения;

$S_c$  – площадь части зоны санитарного поражения, расположенной вне зоны безвозвратного поражения.

Стандартные плотности населения для различных типов заселения и использования территорий приведены ниже.

#### **Расчет средних людских потерь**

Расчет средних людских потерь производится в случае асимметричного расположения зон поражения и неравномерного распределения объектов воздействия в окрестности источника воздействия.

Средние людские потери определяются в зависимости от размеров зон потенциального поражения. К последним относятся все те участки, где люди могут получить поражение соответствующей тяжести при какой-либо ориентации зоны поражения. Каждая из зон потенциального поражения имеет форму круга, центр которого совпадает с источником воздействия, а радиус равен расстоянию до наиболее удаленной от источника точки зоны поражения.

Средние потери определяются по формуле:

$$N_{a.п.} = N_{a.п.} \times S_a / S_{a.п.}, \quad (4.37)$$

где  $N_{a.п.}$  – количество людей, находящихся в пределах зоны потенциального безвозвратного или санитарного поражения;

$S_{a.п.}$  – ее площадь.

#### **Списки особо важных объектов воздействия**

При наличии особо важных объектов воздействия в пределах зон потенциального безвозвратного или санитарного поражения их списки прилагаются к итоговым оценкам людских потерь.

#### **Определение априорных частот аварий (таблица 4.7)**

Ожидаемая частота аварий зависит от сценария развития аварии, а также вида, уровня безопасности и интенсивности функционирования источника воздействия.

Источники воздействия подразделяются на следующие виды:

- 1) автомобильный транспорт;
- 2) водный транспорт;
- 3) железнодорожный транспорт;
- 4) трубопроводный транспорт;
- 5) хранение;
- 6) переработка.

Таблица 4.7 – Априорные частоты аварий

Сценарий	Вид источника и его интенсивность	Частота в год		
		низкая	средняя	высокая
А1 (пожар разлития горючих жидкостей)	<b>Автомобильный транспорт:</b>			
	- интенсивность движения менее 1000 автоцистерн в год	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$
	- интенсивность движения более 1000 автоцистерн в год	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$
	<b>Водный транспорт:</b>			
	- интенсивность движения менее 1000 судов в год	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$
	- интенсивность движения более 1000 судов в год	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
	<b>Железнодорожный транспорт:</b>			
	- интенсивность движения менее 1000 цистерн в год	$10^{-10}$	$10^{-9}$	$10^{-8}$
	- интенсивность движения более 1000 цистерн в год	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
	<b>Трубопроводный транспорт</b>	$10^{-3}$		
<b>Хранение:</b>				
- площадь обвалования менее 1500 м <sup>2</sup>	$10^{-5}$			
- площадь обвалования более 1500 м <sup>2</sup>	$10^{-4}$			
<b>Переработка</b>	$10^{-4}$			
А2 (взрыв газового облака горючих жидкостей)	<b>Автомобильный транспорт:</b>			
	- интенсивность движения менее 1000 автоцистерн в год	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$
	- интенсивность движения более 1000 автоцистерн в год	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$
	<b>Водный транспорт:</b>			
	- интенсивность движения менее 1000 судов в год	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$
	- интенсивность движения более 1000 судов в год	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
	<b>Железнодорожный транспорт:</b>			
	- интенсивность движения менее 1000 цистерн в год	$10^{-10}$	$10^{-9}$	$10^{-8}$
	- интенсивность движения более 1000 цистерн в год	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
	<b>Трубопроводный транспорт</b>	$10^{-3}$		
<b>Хранение:</b>				
- площадь обвалования менее 1500 м <sup>2</sup>	$10^{-5}$			
- площадь обвалования более 1500 м <sup>2</sup>	$10^{-4}$			
<b>Переработка</b>	$10^{-4}$			



Продолжение таблицы 4.7

Сценарий	Вид источника и его интенсивность	Частота в год		
		низкая	средняя	высокая
<b>Б1</b> (взрыв вскипания «BLEVE» горючих газов сжиженных сжатием)	<b>Автомобильный транспорт:</b> - интенсивность движения менее 1000 автоцистерн в год	$10^{-9}$	$10^{-8}$	$10^{-7}$
	- интенсивность движения более 1000 автоцистерн в год	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$
	<b>Железнодорожный транспорт:</b> - интенсивность движения менее 1000 цистерн в год	$10^{-11}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$
	- интенсивность движения более 1000 цистерн в год	$10^{-9}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$
	<b>Хранение</b>	$10^{-4}$		
<b>Б2</b> (взрыв мгновенного выброса горючих газов сжиженных сжатием)	<b>Автомобильный транспорт:</b> - интенсивность движения менее 1000 автоцистерн в год	$10^{-9}$	$10^{-8}$	$10^{-7}$
	- интенсивность движения более 1000 автоцистерн в год	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$
	<b>Железнодорожный транспорт:</b> - интенсивность движения менее 1000 цистерн в год	$10^{-11}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$
	- интенсивность движения более 1000 цистерн в год	$10^{-9}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$
	<b>Хранение</b>	$10^{-7}$		
<b>Б3</b> (взрыв вытекающей жидкости горючих газов, сжиженных сжатием)	<b>Водный транспорт:</b> - интенсивность движения менее 1000 судов в год	$10^{-10}$	$10^{-9}$	$10^{-8}$
	- интенсивность движения более 1000 судов в год	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$
	<b>Трубопроводный транспорт</b>	$10^{-7}$		
	<b>Хранение:</b> площадь обвалования менее 1500 м <sup>2</sup>	$10^{-4}$		
	- площадь обвалования более 1500 м <sup>2</sup>	$10^{-3}$		
	<b>Переработка</b>	$10^{-4}$		
<b>В1</b> (пожар разлития горючих газов, сжиженных охлажден.)	<b>Хранение</b>	$10^{-6}$		
<b>Г1</b> (пожар горючих газов, сжатых давлением)	<b>Трубопроводный транспорт:</b> - магистральные сети	$10^{-7}$		
	- распределительные сети	$10^{-6}$		

Окончание таблицы 4.7

Д1 (взрыв ВВ)	<b>Автомобильный транспорт:</b> - интенсивность движения менее 1000 автоцистерн в год	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$
	- интенсивность движения более 1000 автоцистерн в год	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$
	<b>Водный транспорт:</b> - интенсивность движения менее 1000 судов в год	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$
	- интенсивность движения более 1000 судов в год	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$
	<b>Железнодорожный транспорт:</b> - интенсивность движения менее 1000 цистерн в год	$10^{-10}$	$10^{-9}$	$10^{-8}$
	- интенсивность движения более 1000 цистерн в год	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
	<b>Хранение</b>	$10^{-7}$		
	<b>Переработка</b>	$10^{-6}$		

Уровень безопасности источника воздействия оценивается как высокий, средний или низкий, в соответствии с этим используется низкое, среднее или высокое значение частоты аварий.

## 5. МАСШТАБЫ ЗАРАЖЕНИЯ ПРИ АВАРИЯХ И РАЗРУШЕНИЯХ ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

### 5.1. Свойства аварийно химически опасных веществ

В соответствии с Федеральным законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 № 116-ФЗ к категории опасных производственных объектов относятся, в том числе, объекты, на которых получают, используются, перерабатываются, образуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются опасные вещества видов: воспламеняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные, высокотоксичные вещества, а также вещества, представляющие опасность для окружающей среды.

К этим веществам относятся аварийно химически опасные вещества (АХОВ).

Определение данного термина приведено в ГОСТ Р 22.9.05-95 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Комплексы средств индивидуальной защиты спасателей. Общие технические требования: «Аварийно химически опасное вещество (АХОВ) – опасное химическое вещество, применяемое в промышленности и сельском хозяйстве, при аварийном выбросе (разливе) которого может произойти заражение окружающей среды в поражающих живой организм концентрациях (токсодозах)».

При отнесении химических веществ к АХОВ учитывались следующие характеристики:

- токсические и физико-химические свойства, такие как высокая токсичность при действии через органы дыхания и кожные покровы;
- крупнотоннажность производства, потребления, хранения и перевозок;
- способность легко переходить в аварийных ситуациях в основное поражающее состояние (пар или тонко дисперсный аэрозоль).

Перечень АХОВ, наиболее часто встречающихся в промышленности, приведен в таблице 5.1.

По воздействию на организм человека АХОВ подразделяются на несколько групп:

- вещества с удушающим действием (хлор, водород хлористый и соляная кислота)
- вещества с прижигающим действием (фосген, хлорпикрин, азотная кислота, метиламин, диметиламин, соляная кислота);
- вещества общедовитого действия (синильная кислота, ацетонциангидрин);
- обладающие удушающим и общедовитым действием: сернистый ангидрид, сероводород, акрилонитрил);
- нейротропные яды (метилмеркаптан, оксид этилена, сероуглерод);
- вещества, обладающие удушающим и нейротропным действием: аммиак, ацетонитрил, метил бромистый, метил хлористый, водород фтористый);
- вещества, нарушающие обмен веществ: формальдегид.

Таблица 5.1 – Перечень основных АХОВ

№	Наименование и формула вещества	Примечание	
1	Аммиак NH <sub>3</sub>	Вещества, выброс которых привел к крупным авариям	
2	Хлор Cl <sub>2</sub>		
3	Фосген СОСl <sub>2</sub>		
4	Диоксин (2,3,7,8-тетрахлордibenzo-диоксин) Cl <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>4</sub> O <sub>2</sub>		
5	Метилизоцианат CH <sub>3</sub> NCO	Азотсодержащие АХОВ	
6	Оксид углерода СО		
7	Оксиды азота N <sub>2</sub> O <sub>x</sub>		
8	Азотная кислота HNO <sub>3</sub>		
9	Синильная кислота HCN		Азотсодержащие АХОВ
10	Акрилонитрил CH <sub>2</sub> =CH-CN		
11	Ацетонитрил CH <sub>3</sub> CN		
12	Ацетонциангидрин (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> C(OH)CN		
13	Гидразин N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ; НДМГ (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> N <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Галогеносодержащие АХОВ	
14	Метиламин CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>		
15	Диметиламин (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> MH		
16	Пиридин C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N		
17	Водород хлористый и соляная кислота HCl		
18	Хлорпикрин CCl <sub>3</sub> NO <sub>2</sub>		
19	Метил хлористый CH <sub>3</sub> Cl		
20	Метил бромистый CH <sub>3</sub> Br		
21	Водород фтористый HF		
22	Дихлорэтан C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>		
23	Двуокись хлора ClO <sub>2</sub>	Серосодержащие АХОВ	
24	Сернистый ангидрид SO <sub>2</sub>		
25	Сероуглерод CS <sub>2</sub>		
26	Сероводород H <sub>2</sub> S		
27	Оксид этилена C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	Прочие	
28	Формальдегид HCHO		

Использование такого рода веществ и тем более планирование мероприятий по ликвидации аварий с выделением АХОВ подразумевает учет их физико-химических свойств, которые показывают способность веществ переходить в состояния, при которых создаются поражающие концентрации.

**Агрегатные состояния вещества** – это состояния (фазы) одного и того же вещества, переходы между которыми сопровождаются скачкообразными изменениями ряда физических свойств (плотности, энтропии). Различают твердое, жидкое и газообразное агрегатные состояния. Существование у одного вещества нескольких агрегатных состояний обусловлено различием в тепловом движении молекул и в их взаимодействии. При обычном условии АХОВ могут быть в твердом, жидком и газообразном состоянии. Однако при производстве, использовании, хранении и перевозках этих веществ их агрегатное состояние может отличаться от такового в обычных условиях.

**Молекулярная масса (M<sub>r</sub>)** – сумма атомных масс всех атомов, входящих в молекулу вещества.

**Плотность (ρ)** – массовое содержание вещества в единице объема (кг/м<sup>3</sup>). Играет важную роль при оценке показателей, характеризующих химическое заражение. Если плотность АХОВ больше плотности воды, то эти

вещества будут проникать в толщу водных объектов, заражая их. Если плотность газовой фазы АХОВ больше плотности воздуха, то на начальном этапе образования зараженного облака оно будет скапливаться в пониженных местах рельефа местности.

**Максимальная концентрация ( $C_{max}$ )** – это количество вещества, содержащееся в единице объема его насыщенного пара при данной температуре в замкнутой системе, когда жидкая и газообразная фазы находятся в равновесии. Она характеризует способность вещества переходить в парообразное состояние, поэтому раньше эту характеристику называли «летучесть», (мг/л; мг/м<sup>3</sup>).

**Давление насыщенного пара ( $p$ )** – давление пара, находящегося в равновесии с жидкостью или твердым телом при данной температуре. Эта характеристика, наряду с  $C_{max}$  определяет его летучесть и соответственно продолжительность химического заражения территории. Чем выше давление насыщенного пара, тем выше его способность к испарению и тем менее стойким будет заражение территории.

**Вязкость ( $\mu$ )** – свойство жидких и газообразных сред оказывать сопротивление их течению, (то есть перемещению одного слоя относительно другого) под действием внешних сил. Вязкость влияет на характер поведения АХОВ в аварийной ситуации (характер дробления, впитывания и др.). Измеряется в (Па·с) или в сантипуазах, (сП).

**Поверхностное натяжение ( $\sigma$ )** – характеризует поверхность раздела двух фаз и определяется как работа, затрачиваемая на создание единицы площади поверхности раздела фаз при постоянной температуре (представляет собой работу обратимого изотермического образования единицы площади этой поверхности), (1 МДж/м<sup>2</sup>).

Поверхностное натяжение выражается в стремлении вещества уменьшить избыток своей потенциальной энергии на границе раздела фаз. Поверхностное натяжение жидкости часто определяют как силу, действующую на единицу длины контура поверхности раздела фаз и стремящуюся сократить эту поверхность до минимума. Благодаря поверхностному натяжению капля жидкости при отсутствии внешних воздействий принимает форму шара.

**Теплота испарения  $L_{исп}$  (теплота парообразования)** (Дж/кг; ккал/кг; Дж/моль) – количество теплоты, которое необходимо сообщить веществу в равновесном изобарно-изотермическом процессе, чтобы перевести его из жидкого состояния в газообразное. Она определяет характер выброса и последующего испарения АХОВ.

**Теплоемкость ( $c_p$ )** (Дж/(моль·К); кДж/(кг·К)) – количество теплоты, поглощаемой телом при нагревании на 1 градус. Теплоемкость, отнесенная к единице массы вещества, называется удельной теплоемкостью. Теплоемкость, как и теплота испарения, определяет характер выброса и последующего испарения АХОВ.

**Температура кипения ( $t_{кип}$ )** – это температура равновесного перехода жидкости в пар при постоянном внешнем давлении. Если это давление равно нормальному атмосферному (760 мм рт. ст.), то такая температура кипения

называется точкой кипения. Она позволяет косвенно судить о летучести АХОВ и характеризует продолжительность поражающего действия. Чем выше температура кипения вещества, тем оно медленнее испаряется.

**Температура плавления ( $t_{\text{плав}}$ )** – температура равновесного фазового перехода твердого вещества в жидкое состояние или обратно при постоянном внешнем давлении. Для веществ, которые плавятся при температуре ниже 20 °С, ее называют также температурой замерзания. Есть еще такое определение: температура замерзания – это температура, при которой жидкость теряет подвижность и загустевает настолько, что при наклоне пробирки с продуктом под углом в 45° его уровень остается неизменным в течение 1 минуты. Температура замерзания имеет большое значение при транспортировке АХОВ и определяет характер поведения вещества при низких температурах.

**Температура вспышки ( $t_{\text{вс}}$ )** – самая низкая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний над его поверхностью образуются пары или газы, способные вспыхивать в воздухе от постороннего источника зажигания. Устойчивого горения вещества при этом не возникает.

**Температура воспламенения ( $t_{\text{вос}}$ )** – наименьшая температура, при которой в условиях специальных испытаний вещество выделяет горючие пары и газы с такой скоростью, что после их зажигания внешним источником возникает самостоятельное пламенное горение этого вещества. Данная характеристика присуща только горючим веществам.

**Температура самовоспламенения ( $t_{\text{сво}}$ )** – самая низкая температура вещества или ее оптимальной смеси с воздухом, при нагреве до которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, приводящее к возникновению пламенного горения.

**Растворимость** – способность вещества равномерно распределяться в среде другого или других веществ, образуя раствор. Хорошая растворимость в воде может привести к сильному и длительному заражению водоемов. В то же время хорошая растворимость в воде и органических растворителях может позволить использовать при необходимости растворы различных веществ для дегазации и нейтрализации АХОВ.

**Коэффициент диффузии ( $D$ )** – является характеристикой процесса диффузии и равен количеству газа, переходящему через сечение 1 м<sup>2</sup> в секунду, когда разность концентраций на расстоянии 1 м равна единице. Скорость испарения АХОВ прямо пропорциональна коэффициенту его диффузии в воздушную среду.

**Гидролиз** – разложение вещества водой. Он определяет условия хранения, состояние в воздухе и на местности, стойкость АХОВ в случае их аварийных выбросов (утечек). Причем чем меньше АХОВ подвержено гидролитическому разложению, тем продолжительнее его поражающее действие.

**Коррозионная активность** – свойство разрушать оболочки, в которых хранится (перевозится) АХОВ. Она является причиной многих аварий (разрушений) на промышленных и транспортных объектах, в том числе в

процессе хранения. Большинство АХОВ обладают повышенной коррозионной активностью.

Важной характеристикой АХОВ является их токсичность, то есть ядовитость. Под токсичностью АХОВ понимается его способность вызывать патологические изменения в организме, которые приводят человека к потере дееспособности или к гибели.

Токсичность зависит от пути попадания в организм. Различают ингаляционную, кожно-резорбтивную, терморальную и микстную токсичность.

Количественно токсичность АХОВ оценивается дозой. Доза вещества, вызывающая определенный токсический эффект, называется токсической дозой (D).

Токсическая доза, вызывающая равные по тяжести поражения, зависит от свойств АХОВ, пути его проникновения в организм, от вида организма и условий выброса.

Для веществ, проникающих в организм в жидком или аэрозольном состоянии через кожу, желудочно-кишечный тракт или через раны, поражающий эффект для конкретного вида организма в стационарных условиях зависит только от количества АХОВ.

Токсические свойства веществ определяют экспериментальным путем на различных лабораторных животных, поэтому чаще пользуются понятием удельной токсодозы – дозы, отнесенной к единице живой массы животного. Токсичность одного и того же вещества, даже при одинаковых условиях, различна для разных видов животных, а для конкретного вида животного заметно отличается в зависимости от способа поступления в организм.

Различают пороговые, выводящие из строя и смертельные токсодозы.

**Пороговая токсодоза (PD)** – количество вещества, вызывающее начальные признаки поражения организма с определенной вероятностью или, что то же самое, у определенного процента людей или животных. Вероятность проставляется внизу справа, например,  $PD_{50}$  – средняя пороговая токсодоза.

**Выводящая из строя токсодоза (ID)** – количество вещества, вызывающее при попадании в организм выход из строя определенного процента пораженных как временно, так и со смертельным исходом, например  $ID_{50}$  – средняя выводящая из строя токсодоза.

**Смертельная токсодоза (LD)** – количество вещества, вызывающее при попадании в организм смертельный исход с определенной вероятностью, например,  $LD_{50}$  – средняя смертельная токсодоза. В дозах, меньших  $LD_{50}$ , АХОВ вызывают поражения различной степени тяжести: тяжелые при  $0,3...0,5 LD_{50}$ , средние при  $0,2 LD_{50}$  и легкие, приблизительно при  $0,1 LD_{50}$ .  $PD_{50}$ ,  $ID_{50}$ ,  $LD_{50}$  – являются кожно-резорбтивными токсодозами, кроме них используются также ингаляционные токсодозы, то есть токсодозы для АХОВ, заражающих атмосферу паром или тонкодисперсным аэрозолем и вызывающих поражения человека и животных через органы дыхания.

Токсические дозы для некоторых АХОВ приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Токсические дозы АХОВ

Показатель	Аммиак	Хлор	Окислы азота	Сернистый ангидрид	Фосген	Серо-водород	Цианистый водород
LC <sub>т50</sub>	150	6,0	8,0	5,0	3,2	30	2,0
IC <sub>т50</sub>	15	0,6	1,5	12	0,6	6,0	0,2
PC <sub>т50</sub>	5,0	0,3	0,5	0,5	0,2	2,0	0,1

### Использование АХОВ в промышленности

Наиболее часто встречающиеся АХОВ используются, хранятся, получают на предприятиях нефтепереработки; на складах; в цехах с холодильным оборудованием, работающем на аммиаке; в инженерных сооружениях, предназначенных для очистки систем водоснабжения и канализации.

Синильная кислота используется для производства пластмассовой продукции, а также в целях борьбы с вредителями на садовых участках. Сероводород используется для производства ряда кислот и сероорганических соединений. Азотная кислота используется в полиграфической сфере, металлургии, а также производстве неорганических соединений. Формальдегид находит применение в качестве вспомогательных реагентов в текстильной и кожевенной промышленности, производстве резины и цемента. Небольшая доля карбаминоформальдегидных смол используется для получения вспененных пластмасс.

## 5.2. Выбросы токсичных веществ

Анализ структуры предприятий, производящих или потребляющих АХОВ, показывает, что в их технологических линиях обращается, как правило, небольшая доля токсических химических продуктов, имеющих на предприятии. Большая часть АХОВ содержится на складах. Поэтому при авариях в цехах предприятия в большинстве случаев происходит локальное загрязнение воздуха, оборудования цехов, территории предприятия. Поражение в таких случаях может получить в основном производственный персонал.

При авариях же на складе предприятий, когда разрушаются крупнотоннажные емкости, АХОВ распространяется за пределы предприятия, приводя к массовому поражению не только персонала предприятия, но и населения. Риск такой аварии и возможные масштабы загрязнения окружающей среды зависят от условий хранения АХОВ. В настоящее время на складах предприятий используются, главным образом, три способа хранения АХОВ:

- в резервуарах под высоким давлением (до 20 кг/см<sup>2</sup>);
- в изотермических искусственно охлаждаемых хранилищах (при давлении, близком к атмосферному, и пониженной температуре (до -50°С);
- в закрытых емкостях при температуре окружающей среды (характерно для высококипящих жидкостей).



При хранении больших объемов АХОВ (от 100 т до 50 тыс. т) на современных предприятиях используется 2 способа: под высоким давлением и изотермический способ хранения. От способа хранения АХОВ зависит их поведение при повреждении оболочек резервуаров. В случае аварийного вскрытия оболочки емкости под давлением или изотермического хранилища образуются первичное и вторичное облака загрязненного АХОВ, находящегося в аэрозольном или парообразном состоянии. Химически опасные компоненты, хранящиеся под давлением, обладают большой энергонасыщенностью и поэтому характеризуются более мощным (залповым) выбросом с образованием первичного облака.

Вещества, хранящиеся под нормальным давлением, испаряются при вскрытии емкости медленнее и образуют менее мощный выброс. Однако такой источник химического заражения действует более длительное время. При вскрытии оболочек с высококипящими жидкостями образования первичного облака не происходит. Заметим, что первичное облако образуется непосредственно за счет выброса АХОВ при вскрытии оболочки, вторичное – за счет последующего его испарения из зоны разлива или вскрытой емкости. Аварии на объектах, опасных в химическом отношении, в зависимости от последствий, подразделяются на локальные, местные и общие.

При локальной аварии ее последствия ограничиваются одним сооружением (агрегатом, установкой) предприятия и приводят к заражению в этом сооружении воздуха и оборудования и создают угрозу поражения работающего в нем личного состава и производственного персонала.

При местной аварии последствия ограничиваются производственной площадкой предприятия или его санитарно-защитной зоной и создают угрозу поражения личного состава и персонала всего предприятия.

При общей аварии опасные вещества распространяются за пределы всего предприятия и его санитарно-защитной зоны с превышением пороговых токсодоз, что приводит к заражению окружающей среды и поражению людей.

Масштаб химического заражения обычно характеризуется четырьмя основными параметрами:

- радиусами и площадью района аварии;
- глубиной и площадью заражения местности;
- глубиной и площадью зоны распространения первичного облака АХОВ;
- глубиной и площадью зоны распространения вторичного облака АХОВ.

При этом границами зон распространения первичного и вторичного облаков считаются изолинии средней пороговой токсодозы.

Радиус района аварии зависит от вида АХОВ, условий его хранения, использования и других факторов. Он может достигать 0,5–1 км.

В результате реализации химической опасности того или иного вида могут возникать поражающие факторы, время воздействия которых на объект поражения может изменяться от сотых долей секунды до длительных промежутков времени – годы, а то и десятки или сотни лет. Кроме того, следует подчеркнуть то обстоятельство, что при реализации одной и той же химической

опасности могут возникать поражающие факторы различного времени действия. Причем они могут возникать как непосредственно после аварии, так и спустя определенное время после нее. Так, например, при возникновении пожара температура и токсические поражения человека могут быть отнесены к поражающим факторам острого действия, в то время как попадание токсических веществ в окружающую среду и последующее вредное действие на организм человека по пищевым или иным цепочкам может быть отнесено к поражающим факторам хронического действия.

Другой не менее важной группой показателей являются показатели степени опасности химического заражения. К их числу относятся:

- потери людей в районе разрушения (аварии);
- потери людей в зонах распространения АХОВ;
- количество зараженных объектов, техники и средств защиты.

Потери людей в районах разрушения определяются его количеством, которое может оказаться неработоспособным в результате поражающего воздействия АХОВ. Величина потерь зависит в принципе от наличия у персонала изолирующих противогазов, так как время защитного действия фильтрующих противогазов в районе аварии крайне ограничено.

Потери людей на открытой местности оцениваются в зависимости от наличия средств защиты и его местонахождения в зоне распространения АХОВ.

При оценке возможных потерь в районах распространения АХОВ можно выделить 4 зоны:

- зона смертельного поражения – гибель пораженных после воздействия АХОВ в различные сроки;
- зона среднего поражения – госпитализация пораженных на длительное время (2-3 суток);
- зона легкого поражения – краткосрочная госпитализация или амбулаторное лечение пораженных;
- пороговая зона – пораженные ощущают лишь первичные признаки поражения.

Наименьшей стойкостью при выбросе обладают «плавучие» (то есть легче воздуха) статические газы. Это, например, монооксид углерода и циановодород. Далее в этом ряду располагаются сжиженные газы, обладающие также относительно высокой плавучестью, например, аммиак. За ним следуют сжиженные газы с большей плотностью, чем у воздуха (хлор), низкотлетучие жидкости (иприт), и, наконец, твердые токсичные вещества (диоксин).

### 5.3. Методика прогнозирования масштабов заражения при авариях и разрушениях химически опасных объектов

1. Использование методики предполагается для заблаговременного и оперативного прогнозирования масштабов заражения в результате выбросов АХОВ в окружающую среду при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте. Возможно прогнозирование масштабов зон заражения:

- при авариях на технологических емкостях и хранилищах;
- при транспортировке по трубопроводам и различными видами транспорта;
- при разрушении химически опасных объектов.

2. Позволяет оценить выбросы АХОВ в атмосферу в газообразном, парообразном или аэрозольном состояниях.

3. Внешние границы зоны заражения – изолинии с пороговой токсодозой для данного АХОВ при ингаляционном воздействии на организм человека.

4. Масштабы заражения рассчитываются:

- для сжиженных газов – отдельно для первичного и вторичного облаков;
- для сжатых газов – только для первичного облака;
- для жидкостей, кипящих выше температуры окружающей среды, – только для вторичного облака.

Продолжительность поражающего действия АХОВ определяется временем его испарения с площади разлива.

Время испарения  $T$  (ч) АХОВ с площади разлива определяется по формуле:

$$T = \frac{hd}{K_2 K_4 K_7}, \quad (5.1)$$

где  $h$  – толщина слоя АХОВ, м;

$d$  – плотность АХОВ, т/м<sup>3</sup>;

$K_2$  – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств АХОВ (табл. 5.3);

$K_4$  – коэффициент, учитывающий скорость ветра (табл. 5.7);

$K_7$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха (табл. 5.3; для сжатых газов  $K_7 = 1$ ).

#### Определение эквивалентного количества вещества в первичном облаке

Эквивалентное количество  $Q_{31}$  (т) вещества в первичном облаке определяется по формуле:

$$Q_{31} = K_1 \cdot K_3 \cdot K_5 \cdot K_7 \cdot Q_0, \quad (5.2)$$

где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий агрегатное состояние вещества (для хлора  $K_1 = 0,18$ );

$K_3$  – коэффициент токсодозы по отношению к хлору (соответственно для хлора  $K_3 = 1$ );

$K_5$  – коэффициент, учитывающий вертикальную устойчивость атмосферы (при инверсии  $K_5 = 1$ , при изотермии  $K_5 = 0,23$ , при конвекции  $K_5 = 0,08$ );

$K_7$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха (табл. 5.3; для сжатых газов  $K_7 = 1$ );

$Q_0$  – количество выброшенного (разлившегося) при аварии вещества, т. (принимается равным суммарному объёму вещества, находящегося в ёмкости)

При авариях на хранилищах сжатого газа  $Q_0$  рассчитывается по формуле:

$$Q_0 = \rho \cdot V_{x,} \quad (5.2)$$

где  $\rho$  – плотность АХОВ, т/м<sup>3</sup> (для хлора жидкого  $\rho = 1,533$  т/м<sup>3</sup>);

$V_x$  – объём хранилища, м<sup>3</sup>.

### Определение эквивалентного количества вещества во вторичном облаке

Эквивалентное количество вещества во вторичном облаке рассчитывается по формуле:

$$Q_{32} = (1 - K_1) \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot Q_0 / (h \cdot \rho), \quad (5.3)$$

где  $K_2$  – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств АХОВ (табл. 5.3);

$K_4$  – коэффициент, учитывающий скорость ветра (табл. 5.7);

$K_6$  – коэффициент, зависящий от времени  $N$ , прошедшего после начала аварии; значение коэффициента  $K_6$  определяется после расчета продолжительности  $T$  (ч) испарения вещества:

$$K_6 = \begin{cases} N^{0,8} & \text{при } N < T; \\ T^{0,8} & \text{при } N \geq T, \end{cases} \quad (5.4)$$

при  $T < 1$  ч  $K_6$  принимается для 1 ч;

$\rho$  – плотность АХОВ, т/м<sup>3</sup> (табл. 5.3);

$h$  – толщина слоя АХОВ, м.

При определении  $Q_{32}$  для веществ, не вошедших в таблицу 1, значение коэффициента  $K_7$  принимается равным 1, а коэффициент  $K_2$  определяется по формуле:

$$K_2 = 8,10 \cdot 10^{-6} P \sqrt{M} \quad (5.5)$$

где  $P$  – давление насыщенного пара вещества при заданной температуре воздуха, мм рт. ст.;

$M$  – молекулярная масса вещества.

### Расчет глубины зоны заражения при аварии на химически опасном объекте

В таблице 5.5 приведены максимальные значения глубины зоны заражения первичным ( $\Gamma_1$ ) или вторичным ( $\Gamma_2$ ) облаком АХОВ, определяемые в зависимости от эквивалентного количества вещества и скорости ветра. Полная глубина зоны заражения  $\Gamma$  (км), обусловленной воздействием первичного и вторичного облака АХОВ, определяется:  $\Gamma = \Gamma' + 0,5 \cdot \Gamma''$ , где  $\Gamma'$  – наибольший,  $\Gamma''$  – наименьший из размеров  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ . Полученное значение сравнивается с предельно возможным значением глубины переноса воздушных масс  $\Gamma_n$ , определяемым по формуле:

$$\Gamma_n = N \cdot v, \quad (5.6)$$

где  $N$  – время от начала аварии, ч;

$v$  – скорость переноса переднего фронта зараженного воздуха при данной скорости ветра и степени вертикальной устойчивости воздуха, км/ч (табл. 5.6).

За окончательную расчетную глубину зоны заражения принимается меньшее из двух сравниваемых между собой значений.

### Расчет глубины зоны заражения при разрушении химически опасного объекта

В случае разрушения химически опасного объекта при прогнозировании глубины зоны заражения рекомендуется брать данные на одновременный выброс суммарного запаса АХОВ на объекте и следующие метеорологические условия: инверсия, скорость ветра 1 м/с.

Эквивалентное количество АХОВ в облаке зараженного воздуха определяется аналогично методу для вторичного облака при свободном разливе.

При этом суммарное эквивалентное количество  $Q_3$  рассчитывается по формуле:

$$Q_3 = 20 * K_4 K_5 \sum_{i=1}^n (K_{2i} K_{3i} K_{6i} K_{7i} \frac{Q_i}{d_i}), \quad (5.7)$$

где  $K_{2i}$  – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств  $i$ -го АХОВ;

$K_{3i}$  – коэффициент, равный отношению пороговой токсодозы хлора к пороговой токсодозе  $i$ -го АХОВ;

$K_{6i}$  – коэффициент, зависящий от времени, прошедшего после разрушения объекта;

$K_{7i}$  – поправка на температуру для  $i$ -го АХОВ;

$Q_i$  – запасы  $i$ -го АХОВ на объекте, т;

$\rho$  – плотность  $i$ -го АХОВ, т/м<sup>3</sup>.

Полученные по таблице 5.5 значения глубины зоны заражения  $\Gamma$  в зависимости от рассчитанного значения  $Q_3$  и скорости ветра сравниваются с предельно возможным значением глубины переноса воздушных масс  $\Gamma_n$

( $\Gamma_n = N \cdot v$ ). За окончательную расчетную глубину зоны заражения принимается меньшее из двух сравниваемых между собой значений.

### Определение площади зоны заражения АХОВ

Площадь зоны возможного заражения для первичного (вторичного) облака АХОВ определяется по формуле:

$$S_b = 8,72 \cdot 10^{-3} \Gamma^2 j, \quad (5.8)$$

где  $S_b$  – площадь зоны возможного заражения АХОВ, км<sup>2</sup>;

$\Gamma$  – глубина зоны заражения, км;

$j$  – угловые размеры зоны возможного заражения (табл. 5.4).

Площадь зоны фактического заражения  $S_\phi$  (км<sup>2</sup>) рассчитывается по формуле:

$$S_\phi = K_8 \Gamma^2 N^{0.2}, \quad (5.9)$$

где  $K_8$  – коэффициент, зависящий от степени вертикальной устойчивости воздуха, принимается равным: 0,081 при инверсии; 0,133 при изотермии; 0,235 при конвекции;

$N$  – время, прошедшее после начала аварии, ч.

### Определение времени подхода зараженного воздуха к объекту

Время подхода облака АХОВ к заданному объекту зависит от скорости переноса облака воздушным потоком и определяется по формуле:

$$t = \frac{x}{v}, \quad (5.10)$$

где  $x$  – расстояние от источника заражения до заданного объекта, км;

$v$  – скорость переноса переднего фронта облака зараженного воздуха, км/ч (табл. 5.6).

Таблица 5.3 – Характеристики АХОВ и вспомогательные коэффициенты для определения глубины зоны заражения

	АХОВ	Плотность АХОВ, т/м <sup>3</sup>		Значение вспомогательных коэффициентов							
		газ	жидкость	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>7</sub> для температуры воздуха				
							-40	-20	0	20	40
1	2	3	4	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Акроленн	-	0,839	0	0,013	3,0	0,1	0,2	0,4	1	2,2
2	Аммиак, хранение под давлением	0,0008	0,681	0,18	0,025	0,04	0	0,3	0,6	1	1,4
	изотермическое хранение	-	0,681	0,01	0,025	0,04	0	0,3	0,6	1	1,4
3	Ацетонитрил	-	0,786	0	0,004	0,028	0,02	0,1	0,3	1	2,6
4	Ацетонциангидрин	-	0,932	0	0,002	0,316	0	0	0,3	1	1,5
5	Водород мышьяковистый	0,0035	1,64	0,17	0,054	3,0	0,3	0,5	0,8	1	1,2
							1	1	1	1	1

1	2	3	4	7	8	9	10	11	12	13	14
6	Водород фтористый	-	0,989	0	0,028	0,15	0,1	0,2	0,5	1	1
7	Водород хлористый	0,0016	1,191	0,28	0,037	0,30	<u>0,4</u> 1	<u>0,6</u> 1	<u>0,8</u> 1	<u>1</u> 1	<u>1,2</u> 1
8	Водород бромистый	0,0036	1,490	0,13	0,055	0,25	<u>0,3</u> 1	<u>0,5</u> 1	<u>0,8</u> 1	<u>1</u> 1	<u>1,2</u> 1
9	Водород цианистый	-	0,687	0	0,026	3,0	0	0	0,4	1	1,3
10	Диметиламин	0,0020	0,680	0,06	0,041	0,5	<u>0</u> 0,1	<u>0</u> 0,3	<u>0</u> 0,8	<u>1</u> 1	<u>2,5</u> 1
11	Метиламин	0,0014	0,699	0,13	0,034	0,5	<u>0</u> 0,3	<u>0</u> 0,7	<u>0,3</u> 1	<u>1</u> 1	<u>1,8</u> 1
12	Метил бромистый	-	1,732	0,04	0,039	0,5	<u>0</u> 0,2	<u>0</u> 0,4	<u>0,3</u> 0,9	<u>1</u> 1	<u>2,3</u> 1
13	Метил хлористый	0,0023	0,983	0,125	0,044	0,056	<u>0</u> 0,5	<u>0,1</u> 1	<u>0,6</u> 1	<u>1</u> 1	<u>1,5</u> 1
14	Метилакрилат	-	0,953	0	0,005	0,1	0,1	0,2	0,4	1	3,1
15	Метилмеркаптан	-	0,867	0,06	0,043	0,353	<u>0</u> 0,1	<u>0</u> 0,3	<u>0</u> 0,8	<u>1</u> 1	<u>2,4</u> 1
16	Нитрил акриловой кислоты	-	0,806	0	0,007	0,80	0,04	0,1	0,4	1	2,4
17	Окислы азота	-	1,491	0	0,040	0,40	0	0	0,4	1	1
18	Окись этилена	-	0,882	0,05	0,041	0,27	<u>0</u> 0,1	<u>0</u> 0,3	<u>0</u> 0,7	<u>1</u> 1	<u>3,2</u> 1
19	Сернистый ангидрид	0,0029	1,462	0,11	0,049	0,333	<u>0</u> 0,2	<u>0</u> 0,5	<u>0,3</u> 1	<u>1</u> 1	<u>1,7</u> 1
20	Сероводород	0,0015	0,964	0,27	0,042	0,036	<u>0,3</u> 1	<u>0,5</u> 1	<u>0,8</u> 1	<u>1</u> 1	<u>1,2</u> 1
21	Сероуглерод	-	1,263	0	0,021	0,013	0,1	0,2	0,4	1	2,1
22	Соляная кислота	-	1,198	0	0,021	0,30	0	0,1	0,3	1	1,6
23	Триметиламин	-	0,671	0,07	0,047	0,1	<u>0</u> 0,1	<u>0</u> 0,4	<u>0</u> 0,9	<u>1</u> 1	<u>2,2</u> 1
24	Формальдегид	-	0,815	0,19	0,034	1,0	<u>0</u> 0,4	<u>0</u> 1	<u>0,5</u> 1	<u>1</u> 1	<u>1,5</u> 1
25	Фосген	0,0035	1,432	0,05	0,061	1,0	<u>0</u> 0,1	<u>0</u> 0,3	<u>0</u> 0,7	<u>1</u> 1	<u>2,7</u> 1
26	Фтор	0,0017	1,512	0,95	0,038	3,0	<u>0,7</u> 1	<u>0,8</u> 1	<u>0,9</u> 1	<u>1</u> 1	<u>1,1</u> 1
27	Фосфор треххлористый	-	1,570	0	0,010	0,2	0,1	0,2	0,4	1	2,3
28	Фосфора хлорокись	-	1,675	0	0,003	10,0	0,05	0,1	0,3	1	2,6
29	Хлор	0,0032	1,553	0,18	0,052	1,0	<u>0</u> 0,9	<u>0,3</u> 1	<u>0,6</u> 1	<u>1</u> 1	<u>1,4</u> 1
30	Хлорпикрин	-	1,658	0	0,002	30,0	0,03	0,1	0,3	1	2,9
31	Хлорциан	0,0021	1,220	0,04	0,048	0,80	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0,6	<u>1</u> 1	<u>3,9</u> 1
32	Этиленмин	-	0,838	0	0,009	0,125	0,05	0,1	0,4	1	2,2
33	Этиленсульфид	-	1,005	0	0,013	6,0	0,05	0,1	0,4	1	2,2
34	Этилмеркаптан	-	0,839	0	0,028	0,27	0,1	0,2	0,5	1	1,7

Таблица 5.4 – Вид зоны заражения

Скорость ветра, м/с	Вид сектора (зоны поражения)	Величина угла φ
<1	Круг, радиусом «Г»	360
=1	Полукруг радиусом «Г»	180
1-2	Угловой сектор	90
>2	Угловой сектор	45

Таблица 5.5 – Глубина (км) зоны заражения

Скорость ветра, м/с	Эквивалентное количество АХОВ, т.								
	0,01	0,05	0,1	0,5	1	3	5	10	20
<1	0,38	0,85	1,25	3,16	4,75	9,18	12,53	19,20	29,56
2	0,26	0,59	0,84	1,92	2,84	5,35	7,20	10,83	16,44
3	0,22	0,48	0,68	1,53	2,17	3,99	5,34	7,96	11,94
4	0,19	0,42	0,59	1,33	1,88	3,28	4,36	6,46	9,62
5	0,17	0,38	0,53	1,19	1,68	2,91	3,75	5,53	8,19
6	0,15	0,34	0,48	1,09	1,53	2,66	3,43	4,88	7,20
7	0,14	0,32	0,45	1,00	1,42	2,46	3,17	4,49	6,48
8	0,13	0,30	0,42	0,94	1,33	2,30	2,97	4,20	5,92
9	0,12	0,28	0,40	0,88	1,25	2,17	2,80	3,96	5,60
10	0,12	0,26	0,38	0,84	1,19	2,06	2,66	3,76	5,31
11	0,11	0,25	0,36	0,80	1,13	1,96	2,53	3,58	5,06
12	0,11	0,24	0,34	0,76	1,08	1,88	2,42	3,43	4,85
13	0,10	0,23	0,33	0,74	1,04	1,80	2,37	3,29	4,66
14	0,10	0,22	0,32	0,71	1,00	1,74	2,24	3,17	4,49
>15	0,10	0,22	0,31	0,69	0,97	1,63	2,17	3,07	4,34
<1	38,13	52,67	65,23	81,91	166	231	288	363	572
2	21,02	28,73	35,35	44,09	87,79	121	150	189	295
3	15,18	20,59	25,21	31,30	61,47	84,50	104	130	202
4	12,18	16,43	20,05	24,80	48,18	65,92	81,17	101	157
5	10,33	13,88	16,89	20,82	40,11	54,67	67,15	83,60	129
6	9,06	12,14	14,79	18,13	34,67	47,09	56,72	71,70	110
7	8,14	10,87	13,17	16,17	30,73	41,63	50,93	63,16	96,30
8	7,42	9,90	11,98	14,68	27,75	37,49	45,79	56,70	86,20
9	6,86	9,12	11,03	13,50	25,39	34,24	41,76	51,60	78,30
10	6,50	8,50	10,23	12,54	23,49	31,61	38,50	47,53	71,90
11	6,20	8,01	9,61	11,74	21,91	29,44	35,81	44,15	66,62
12	5,94	7,67	9,07	11,06	20,58	27,61	35,55	41,30	62,20
13	5,70	7,37	8,72	10,48	19,45	26,04	31,62	38,90	58,44
14	5,50	7,10	8,40	10,04	1846	24,69	29,95	36,81	55,20
>15	5,31	6,86	8,11	9,70	17,60	23,50	28,48	34,98	52,37

Таблица 5.6 – Скорость переноса облака АХОВ, км/час

Состояние приземного слоя	Скорость ветра, м/с													
	1	2	3	4	5	6	7	9	11	12	13	15		
Инверсия	5	10	16	21	-	встречается редко						-	-	
Изотермия	6	12	13	24	29	35	41	53	65	71	76	88		
Конвекция	7	14	21	28	-	встречается редко						-	-	

Таблица 5.7 – Зависимость  $K_4$  от скорости ветра

Обозн.	Скорость ветра, м/с										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
$K_4$	1	1,3	1,7	2	2,34	2,7	3	3,34	3,67	4,0	5,7



## 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАТЕГОРИИ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БЛОКА

### 6.1. Категории взрывоопасности технологического блока

Технологический блок – это аппарат или группа (с минимальным числом) аппаратов, которые в заданное время могут быть отключены (изолированы) от технологической системы без опасных изменений режима, которые могли бы привести к развитию аварии в смежной аппаратуре или системе. Выбор технических средств, обслуживающих взрывоопасные технологические блоки, определяется их категорией взрывоопасности. Категория взрывоопасности определяется в зависимости от величины относительного энергетического потенциала взрывоопасности технологического блока, который рассчитывается исходя из общей энергии сгорания парогазовой фазы, поступившей в окружающую среду при аварийной разгерметизации блока. Для определения категории взрывоопасности можно также использовать расчетную величину массы  $m$  горючих паров (газов) взрывоопасного парогазового облака, приведенной к единой удельной энергии сгорания.

При проектировании технологических блоков, в которых обращаются воспламеняющиеся и горючие вещества производится оценка энергетического уровня посредством расчета категории его взрывоопасности.

Относительный энергетический потенциал:

$$Q_e = \frac{\sqrt[3]{E}}{16,534}, \quad (6.1)$$

где  $E$  – общий энергетический потенциал, кДж.

Расчет массы горючих взрывоопасных паров:

$$m = \frac{E}{4,6 * 10^4}. \quad (6.2)$$

По расчетным значениям относительных энергетических потенциалов и приведенной массе парогазовой среды устанавливаются категории взрывоопасности технологических блоков (табл. 6.1).

Таблица 6.1 – Категории взрывоопасности технологических блоков

Категория взрывоопасности	Относительный потенциал взрывоопасности, $Q_v$	Условная масса ( $m$ ), кг	$E_{пр}$ , кДж
I	Более 37	Более 5000	Более $2,3 * 10^8$
II	27-37	2000-5000	Не более $2,3 * 10^8$
III	Менее 27	Менее 2000	Не более $9,0 * 10^7$
IV	Менее 10	Менее 200	Не более $4,5 * 10^6$

В зависимости от категории взрывоопасности формулируются требования к техническим средствам контроля, управления, противоаварийной

защиты и сигнализации по надежности, быстродействию, допустимой погрешности измерительных систем и другим техническим характеристикам.

Для каждой технологической системы должны предусматриваться меры по максимальному снижению взрывоопасности технологических блоков, входящих в нее, направленные на:

- предотвращение взрывов внутри технологического оборудования;
- защиту технологического оборудования от разрушения и максимальное ограничение выбросов из него горючих веществ в атмосферу при аварийной разгерметизации;
- предупреждение возможности взрывов и пожаров в объеме производственных зданий, сооружений и наружных установок;
- снижение тяжести последствий взрывов и пожаров в объеме производственных зданий, сооружений и наружных установок.

Технологические процессы должны быть организованы таким образом, чтобы исключить возможность взрыва в технологической системе.

Регламентированные значения параметров по ведению технологического процесса указываются в технологических регламентах на производство продукции как оптимальные нормы безопасного ведения технологического режима и подлежат контролю и регулированию в заданном диапазоне.

При функционировании каждого отдельного технологического процесса на производственном объекте нормы взрывобезопасности обеспечиваются:

- рациональным подбором взаимодействующих компонентов, исходя из условия максимального снижения или исключения возможности образования взрывопожароопасных смесей или продуктов;
- рациональным режимом дозирования компонентов, предотвращением возможности отклонения их соотношений от регламентированных значений и образования взрывоопасных концентраций в системе;
- введением в технологическую среду инертных разбавителей-флегматизаторов, веществ, приводящих к образованию инертных разбавителей или препятствующих образованию взрывопожароопасных смесей;
- рациональным выбором гидродинамических характеристик процесса и теплообменных характеристик, а также геометрических параметров аппаратов;
- применением компонентов в фазовом состоянии, затрудняющем или исключающем образование взрывоопасной смеси;
- надежным энергообеспечением.

Оптимальные условия взрывобезопасности технологической системы обеспечиваются:

- рациональным выбором технологической системы с учетом относительных энергетических потенциалов, входящих в нее

технологических блоков, которые определяются на стадии проектирования;

- разделением отдельных технологических операций на ряд процессов или стадий, или совмещением нескольких процессов в одну технологическую операцию, позволяющую снизить уровень взрывоопасности;
- введением в технологическую систему дополнительного процесса или стадии очистки от примесей, способных образовывать взрывопожароопасные смеси или повышать степень опасности среды на последующих стадиях.

Технологические системы должны оснащаться средствами контроля за параметрами, определяющими взрывоопасность процесса, с регистрацией показаний и предаварийной сигнализацией их значений, а также средствами автоматического регулирования и противоаварийной защиты, в том числе ПАЗ.

Энергетическая устойчивость технологической системы с учетом категории взрывоопасности входящих в нее блоков, особенностей технологического процесса обеспечивается выбором рациональной схемы энергоснабжения, количеством источников электропитания (основных и резервных), их надежностью, и должна исключать возможность:

- нарушения герметичности системы (разгерметизации уплотнений подвижных соединений, разрушения оборудования от превышения давления);
- образования в системе взрывоопасной среды (за счет увеличения времени пребывания продуктов в реакционной зоне, нарушения соотношения поступающих в нее продуктов, развития неуправляемых процессов).

Технологические процессы не должны проводиться в области взрываемости или саморазложения (химически нестабильные вещества) обращающихся в технологическом процессе веществ и вновь образующихся продуктов с учетом возможного образования побочных продуктов, за исключением реакционных технологических процессов, для осуществления которых необходимо использовать нестабильные вещества в условиях их разложения, при условии разработки для них соответствующих мер по обеспечению взрывобезопасности. При невозможности исключить опасные источники зажигания должны оснащаться средствами взрывопредупреждения и защиты оборудования и трубопроводов от разрушений (мембранными предохранительными устройствами, взрывными клапанами, системами флегматизации инертным газом, средствами локализации пламени).

Технологические системы, в которых обращаются горючие продукты (газообразные, жидкие, твердые), способные образовывать взрывоопасные смеси с воздухом, должны быть герметичными и исключать создание опасных концентраций этих веществ в окружающей среде на всех режимах работы.

Мероприятия по предотвращению взрывов в оборудовании разрабатываются с учетом показателей взрывопожароопасности обращающихся веществ при регламентированных параметрах процесса.

Для технологических систем на стадиях, связанных с применением твердых пылящих и дисперсных веществ, предусматриваются меры и средства, максимально снижающие попадание горючей пыли в атмосферу

производственного помещения (рабочей зоны), наружных установок и накопление ее на оборудовании и строительных конструкциях, а также средства пылеборки, ее периодичность и контроль запыленности воздуха.

Твердые дисперсные горючие вещества должны загружаться в аппаратуру и перерабатываться в виде гранул, растворов, паст или в увлажненном состоянии.

Для производств, имеющих в своем составе технологические блоки I и II категории взрывоопасности, разрабатываются специальные меры:

- размещение технологического оборудования в специальных взрывозащитных конструкциях;
- оснащение производства автоматизированными системами управления и ПАЗ, обеспечивающей автоматическое регулирование процесса и безаварийную остановку производства по специальным программам, определяющим последовательность и время выполнения операций отключения при аварийных ситуациях в технологической системе (технологическом блоке, техническом устройстве), а также снижение или исключение возможности ошибочных действий производственного персонала при ведении процесса, пуске и остановке производства;
- предусматривается автоматическое управление подачей инертных сред.

Производства, имеющие в своем составе технологические блоки III категории взрывоопасности, оснащаются системами автоматического (с применением вычислительной техники или без нее) регулирования, средствами контроля параметров, значения которых определяют взрывоопасность процесса, эффективными быстродействующими системами, обеспечивающими приведение технологических параметров к регламентированным значениям или остановке процесса. Подача инертных сред осуществляется в дистанционном, неавтоматическом или ручном режимах.

При проектировании технологических схем для новых производств для аварийного освобождения технологических блоков от обращающихся продуктов должно учитываться оборудование технологических установок или специальные системы аварийного освобождения. Специальные системы аварийного освобождения должны находиться в постоянной готовности:

- исключать образование взрывоопасных смесей как в самих системах, так и в окружающей их атмосфере, а также развитие аварий;
- обеспечивать минимально возможное время освобождения;
- оснащаться средствами контроля и управления.

## 6.2. Определение категории взрывоопасности технологического блока, включающего ректификационную колонну непрерывного действия. Очистка этилового спирта-сырца

Ректификационная колонна (ректификационный колонный аппарат) – цилиндрический вертикальный сосуд постоянного или переменного сечения, оснащенный внутренними тепло- и массообменными устройствами и вспомогательными узлами, предназначенный для разделения жидких смесей на фракции, каждая из которых содержит вещества с близкой температурой кипения. Классическая колонна представляет собой вертикальный цилиндр, внутри которого располагаются контактные устройства — тарелки или насадки. Соответственно различают ректификационные колонны тарельчатые и насадочные.

### Описание технологического процесса

Колонна предназначена для укрепления этилового спирта путем освобождения его от легколетучих и высококипящих примесей.

Эпюрат (жидкость, из которой удалены головные фракции), содержащий спирта по массе (а) 8 – 14%, предварительно поступает на питающую тарелку ректификационной колонны.

Спирт-сырец выходит из колонны.

Рассматриваем условный расчетный вариант аварии. По сварному шву разгерметизация, вследствие этого происходит залповый выброс взрывоопасной фазы из колонны. Кроме того, в помещение выливается некоторое количество нагретого до температуры кипения эпюрата.

### Последовательность расчета

Общий энергетический потенциал рассчитывается:

$$E = A + \Delta H_T * (G_1 + G_3 + G_4), \text{кДж}, \quad (6.3)$$

где А – работа адиабатического расширения паровой фазы, кДж;

$\Delta H_T$  – теплота сгорания паров этилового спирта, кДж/кг;

$G_1$  – масса этилового спирта в колонне (паровая фаза), кг;

$G_3$  – масса этилового спирта в паровой фазе, выделившаяся за счет разгерметизации, кг;

$G_4$  – масса этилового спирта в паровой фазе, образующаяся из эпюрата при его разливе на пол помещения, кг.

Определение геометрического объема паровой фазы в ректификационной колонне по формуле:

$$V^{n\phi} = \frac{\pi * d^2}{4} * (H_k - n * h - H_{кч}), \text{м}^3; \quad (6.4)$$

где  $H_k$  – высота колонны, м;

$d$  – диаметр колонны, м;  
 $H_{\text{кч}}$  – высота кубовой части, м;  
 $n$  – число тарелок, шт;  
 $h$  – высота барботажного слоя на тарелке, м;

Работа адиабатического расширения паровой фазы:

$$A = \beta_1 * P_{\text{абс}} * V^{n\phi}; \quad (6.5)$$

где  $\beta_1$  – показатель адиабаты, определяется в зависимости от давления (справочные данные);

$P_{\text{абс}}$  – давление, под которым работает колона, МПа;

Расчет массы этилового спирта в колонне (паровая фаза) ( $G_1$ ):

$$G_1 = \rho^{n\phi} * V_0^{n\phi}; \quad (6.6)$$

где  $\rho^{n\phi}$  – плотность паровой фазы, кг/м<sup>3</sup>;

$V_0^{n\phi}$  – объем паровой фазы, пересчитанный на нормальные условия, м<sup>3</sup>.

$$V_0^{n\phi} = \frac{V^{n\phi} * P_{\text{абс}} * T_0}{P_0 * t_n}. \quad (6.7)$$

где  $t_n$  – температура паровой фазы, К;

$P_0$  – давление при нормальных условиях, 0,1 МПа

$T_0$  – температура при нормальных условиях, 273 К.

Расчет плотности жидкой фазы:

$$\frac{1}{\rho^{\text{жф}}} = \frac{a}{\rho_1} + \frac{1-a}{\rho_2}; \quad (6.8)$$

где  $a$  – характеризует долю спирта (доля спирта в элюате);

$\rho_1$  – плотность спирта, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_2$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

Расчет производительности колонны по спирту-сырцу определяется по формуле:

$$D_\partial = D_c^I * \frac{a-b}{c-b}; \quad (6.9)$$

где  $D_c^I$  – массовый расход элюата, м<sup>3</sup>/ч;

$c$  – концентрация этилового спирта, %

$b$  – концентрация этилового спирта в остатке, %;

$$D_c^I = D_c * \rho^{\text{жф}} \quad (6.10)$$

где  $D_c$  – производительность колонны по элюату, м<sup>3</sup>/ч.

Расчет массы этилового спирта в паровой фазе, выделившаяся за счет разгерметизации,  $G_2$ :

$$G_3 = \frac{D_d * \tau}{3600}; \quad (6.11)$$

где  $\tau$  – время закрытия задвижек на линиях подачи, с.

Расчет массы этилового спирта в паровой фазе, образующейся из эпората при его разливе на пол помещения  $G_4$

$$G_4 = G_{кип} + G_{ком}; \quad (6.12)$$

где  $G_{кип}$  – масса паров образовавшихся при  $t_{кип}$  пролитой жидкости, которая рассчитывается по формуле:

$$G_{кип} = W_{кип} * F_{исп} * \tau_{кип}, \quad (6.13)$$

где  $W_{кип}$  – интенсивность испарения спирта при  $t_{кип}$  в единицу времени, кг/м<sup>2</sup>·с;

$F_{исп}$  – площадь испарения, м<sup>2</sup>;

$\tau_{кип}$  – время испарения при температуре  $t_{кип}$  (можно принять за 20 с).

$G_{ком}$  – количество испарившегося спирта при комнатной температуре (в пересчете на час):

$$G_{ком} = W_{ком} * \frac{2}{3} * F_{исп} * \tau_x, \quad (6.14)$$

где  $W_{ком}$  – интенсивность испарения при комнатной температуре;

$\tau_x$  – время испарения 3600 с.

### 6.3. Определение категории взрывоопасности технологического блока по горючей пыли

В технологических процессах в ряде случаев используются, перерабатываются и образуются горючие и взрывоопасные вещества и материалы, наличие которых создает потенциальную опасность пожаров и взрывов. Для предотвращения пожаров и взрывов необходимо знать технологию и владеть вопросами взрывобезопасности.

В данном разделе рассмотрен пример расчета категории взрывоопасности технологического блока в производстве кормовых дрожжей.

На рисунке 6.1 приведена схема производства кормовых дрожжей.

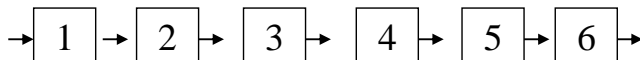


Рис. 6.1. Схема производства кормовых дрожжей:

1 – реактор для выращивания дрожжей; 2 – сепаратор; 3 – вакуум-фильтр;

4 – плазмоллизатор (устройство, в котором происходит стерилизация концентрированной дрожжевой суспензии); 5 – сушилка;

6 – фасовка и упаковка готовой продукции

При реализации технологического процесса в производственное помещение на стадиях сушки и упаковки готовой продукции попадает пыль кормовых дрожжей. Эта пыль частично находится во взвешенном состоянии, частично оседает на оборудовании, на полу и других поверхностях. При этом создается опасность взрыва, т.к. все пыли органического происхождения в разной степени являются взрывоопасными. В зависимости от степени взрывоопасности пылей, определяется категория взрывоопасности помещения, в соответствии с категорией разрабатываются мероприятия, позволяющие снизить или исключить вероятность возникновения взрыва. Здесь используется подход, при котором оценка опасности производится по запасу энергии в системе, называемому энергетическим потенциалом технологического блока, содержащего горючую пыль.

Энергетический потенциал определяется по формуле:

$$E = \Sigma G_i \cdot \Delta H_T, \text{ кДж}, \quad (6.15)$$

где  $\Sigma G_i$  – общая масса горючей пыли, образующая взрывоопасную смесь, кг;  
 $\Delta H_T$  – удельная теплота сгорания пыли, кДж/кг.

Общая масса горючей пыли, образующая взрывоопасную смесь, определяется по формуле:

$$\Sigma G_i = G_1 + G_2 + G_3 + G_4, \quad (6.16)$$

где  $G_1$  – масса пыли, взвешенной на линии подачи кормовых дрожжей на упаковку и фасовку;

$G_2$  – масса пыли, которая может образовывать взрывоопасную смесь с воздухом в объеме помещения;

$G_3$  – масса взвешенной пыли, которая может попасть в помещение при подаче её из сушилки;

$G_4$  – масса взвешенной пыли, которая может образоваться из отложений на полах и на оборудовании.

Масса пыли, взвешенной на линии подачи кормовых дрожжей на упаковку и фасовку, рассчитывается так:

$$G_1 = C_{ст} \cdot V, \quad (6.17)$$

где  $C_{ст}$  – стехиометрическая концентрация, при которой возможен взрыв, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – внутренний объем технологического блока (объем сушилки), м<sup>3</sup>.

Стехиометрическая концентрация, при которой возможен взрыв, определяется по формуле:

$$C_{ст} = 10 \cdot \text{НКПР}, \quad (6.18)$$

где НКПР – нижний концентрационный предел распространения пламени, кг/м<sup>3</sup>;

НКПР – минимальная (максимальная) концентрация горючего вещества (газа, паров горючей жидкости) в однородной смеси с окислителем (воздух, кислород и др.), при котором возможно распространение пламени по смеси на



любое расстояние от источника зажигания (открытое внешнее пламя, искровой разряд).

Масса пыли, которая может образовывать взрывоопасную смесь с воздухом в объеме помещения:

$$G_2 = C_{ст} \cdot V_{св}, \quad (6.19)$$

где  $V_{св}$  – свободный объем помещения,  $m^3$  (в котором установлено оборудование).

Разрешается допускать  $V_{св}$  как 80% от геометрического объема помещения.

Количество пыли  $G_2$  не должно быть больше количества пыли, которое поступает при разгерметизации оборудования (сушилки), т. е.

$$G_2 \leq G_{ав}, \quad (6.20)$$

где

$$G_{ав} = K_y \cdot (G_{аб} - G_1), \quad (6.21)$$

где  $G_{аб}$  – масса дрожжевой пыли в аппарате, кг;

$K_y$  – коэффициент равный 0,5, т. е. он характеризует долю осевшей пыли, перешедшей в аэрозольное состояние.

Масса взвешенной пыли, которая может попасть в помещение при подаче её из сушилки ( $G_3$ ), учитывается для периодических процессов (в данном случае принимается = 0).

Масса взвешенной пыли, которая может образоваться из отложений на полах и на оборудовании, определяется по формуле:

$$G_4 = K_{вз} \cdot m_{п}, \quad (6.22)$$

где  $K_{вз}$  – доля отложившейся в помещении пыли, способной перейти во взвешенное состояние при аварийной разгерметизации блока (если нет экспериментальных данных, принимается равной 0,9);

$m_{п}$  – масса пыли, которая реально может быть в помещении в момент предшествующий взрыву. Определяется по формуле:

$$m_{п} = (m_1 + m_2) \cdot K_r / K_y, \quad (6.23)$$

где  $m_1$  – масса пыли, оседающей на различных поверхностях, доступных для уборки между текущими пылеуборочными мероприятиями;

$m_2$  – масса пыли, оседающей на труднодоступных поверхностях в помещении за период между генеральными уборками;

$K_r$  – доля горючей пыли в общей массе отложившейся пыли (устанавливается экспериментом. В данном случае 1);

$K_y$  – коэффициент эффективности пылеуборки (ручная уборка (сухая) – 0,6, влажная – 0,7, механизированная уборка (пол ровный) – 0,9, пол с выбоинами до 5% площади – 0,7).

Масса пыли, оседающей на различных поверхностях, доступных для уборки между текущими пылеуборочными мероприятиями, рассчитывается по формуле:

$$m_1 = M_1 \cdot \beta_1, \quad (6.24)$$

где  $M_1$  – масса пыли, выделившаяся в объем помещения между текущими пылеуборками (легко доступна для уборки);

$\beta_1$  – доля выделившейся в объем помещения пыли, оседающей на доступных местах.

Масса пыли, оседающей на труднодоступных поверхностях в помещении за период между генеральными уборками:

$$m_2 = M_2 \cdot \beta_2, \quad (6.25)$$

где  $M_2$  – масса пыли, выделившаяся в объем помещения между генеральными пылеуборками (трудно доступна для уборки);

$\beta_2$  – доля выделившейся в объем помещения пыли, оседающей на труднодоступных местах:

$$\beta_1 + \beta_2 = 1. \quad (6.26)$$

При отсутствии экспериментальных данных можно рассчитать  $\beta_2$  по зависимости:

$$\beta_2 = (\gamma_1 \cdot \gamma_2) / (1 + \gamma_1 \cdot \gamma_2), \quad (6.27)$$

где  $\gamma_1$  – отношение средних интенсивностей пыленакопления на труднодоступных и доступных для уборки поверхностях ( $\gamma_1 = 0,2$  – при пылевыведении в нижней зоне помещения;  $\gamma_1 = 2,0$  – при пылевыведении в нижней зоне помещения, если операции ведутся в открытых аппаратах с устройствами, взвихряющими пыль – шнековыми питателями, виброситами, дражировочными котлами и др.);

$\gamma_2$  – отношение площадей труднодоступных и доступных для уборки участков помещения (можно принять за 0,31).

Пылевыведение в помещении в доступные и труднодоступные места определяется выражениями:

$$M_1 = M' \cdot q \cdot \tau_1, \quad (6.28)$$

$$M_2 = M' \cdot q \cdot \tau_2, \quad (6.29)$$

где  $M'$  – средняя интенсивность пылевыведения на отдельной технологической операции, кг/кг;

$q$  – сменная производительность, кг-смена<sup>-1</sup>;

$\tau_1$  – число смен между текущими пылеуборками;

$\tau_2$  – число смен между генеральными пылеуборками.

## 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «РВС – ЛВЖ»

### 7.1. Общие положения по взрывопожароопасности технологических систем

Оценка соответствия взрывопожароопасных технологий требованиям пожарной безопасности сталкивается с большим числом локальных и системных проблем: технических и информационных. Анализ этих проблем (высокий уровень взрывопожароопасности используемых технологий, большая концентрация пожаровзрывоопасных веществ на единицу площади, неспособность существующего детерминированного нормирования дать оценку состояния защищенности людей от пожарной опасности технологической системы) поставил вопрос о применении расчетных методов при оценке соответствия объекта защиты требованиям пожарной безопасности.

Основным направлением оценки безопасности людей и состояния защищенности имущества третьих лиц от пожара является методология оценки риска. Центральным звеном в оценке риска является анализ пожарной опасности технологической системы. Под термином «пожарная опасность» понимают возможность возникновения и развития пожароопасной ситуации с переходом её в пожар, заключенную в технологической системе.

В данном разделе используются методы оценки пожарной опасности технологической системы, предусмотренные нормативными документами по пожарной безопасности:

- ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования.
- ГОСТ Р 12.3.047-2012. Национальный стандарт Российской Федерации. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов Общие требования. Методы контроля.
- НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
- Рекомендации по обеспечению пожарной безопасности объектов нефтепродуктообеспечения, расположенных на селитебной территории.

В качестве объекта анализа пожарной опасности в данном разделе рассмотрен вертикальный стальной резервуар (РВС), в котором хранится легковоспламеняющаяся жидкость (ЛВЖ).

Существует множество типов и видов резервуаров для хранения нефтепродуктов. Наиболее распространены РВС. Эти резервуары представляют собой большие цилиндрические емкости, сваренные из стальных листов. Основанием для днища резервуара является песчаная подушка, и оно имеет уклон от центра к периферии. Высота стальных резервуаров составляет 9, 12 или 18 м, а диаметр – от 20 до 60 м. По объему вмещаемых нефтепродуктов РВС могут быть на 1, 3, 5, 10, 20 и 50 тыс. м<sup>3</sup>, при этом избыточное внутреннее давление не превышает 0,02 атм.

Нефтяные резервуары, составляющие резервуарный парк, устанавливаются в специальных углублениях, разделяемых насыпными сооружениями (обвалованиями). Обвалования образуют преграду лавине нефти, которая может вырваться из резервуара при его разрушении.

Вертикальные стальные резервуары могут иметь стационарную крышу (коническую или сферическую), но могут иметь также плавающую крышу, перемещающуюся вместе с зеркалом нефти в вертикальном направлении.

При рассмотрении технологической системы «РВС – ЛВЖ» следует вести работы по оценке пожарной опасности по двум направлениям, в зависимости от закономерностей возникновения и развития пожара:

I блок – моделирование пожарной опасности при нормальном функционировании технологической системы «РВС – ЛВЖ». В этот блок входят следующие работы:

- экспериментальное исследование взрывоопасности паровоздушной смеси при испарении остатка ЛВЖ;
- расчет уровня взрывоопасности технологической системы «РВС – ЛВЖ»;
- расчет ожидаемой частоты возникновения пожара для технологической системы «РВС – ЛВЖ»;
- расчет параметров, характеризующих пожарную опасность распространения пожара на резервуар, расположенный рядом с горящим резервуаром.

II блок – моделирование пожарной опасности возникновения и развития аварийной ситуации с переходом в пожар. В этот блок входят следующие работы:

- экспериментальное исследование пожарной опасности повышения давления в аппарате, полностью заполненной жидкостью;
- экспериментальное исследование геометрических параметров пожарной опасности аварийного разлива ЛВЖ;
- расчет геометрических параметров пожарной опасности разлива ЛВЖ в случае полного разрушения РВС;
- экспериментальное исследование теплофизических параметров пожарной опасности при испарении ЛВЖ с поверхности разлива;
- расчет теплофизических параметров пожарной опасности при испарении ЛВЖ с поверхности разлива;
- расчет зоны взрывоопасных концентраций при аварийном разливе ЛВЖ на открытой технологической площадке;
- расчет опасных факторов пожара при сторании паровоздушных смесей на открытой технологической площадке;
- расчет тепловых нагрузок при пожарах проливов ЛВЖ и ГЖ.

Ниже будут рассмотрены некоторые из этих оценок пожарной опасности для системы «РВС–ЛВЖ».

## 7.2. Уровень взрывоопасности технологической системы

Одним из основных параметров при анализе риска пожара является уровень взрывоопасности технологической системы. Уровень взрывоопасности изменяется в пределах от нуля до единицы.

Под уровнем взрывоопасности технологической системы (рис. 7.1) понимают отношение суммы периодов  $\tau_{\text{вок}}$ , когда рабочая концентрация пара ЛВЖ ( $\varphi_n$ ) внутри системы находится в области взрывоопасных значений, к определенному периоду функционирования  $\tau_{\text{функ}}$ , например, к году. Это можно выразить через зависимость:

$$Z = \frac{\sum \tau_{\text{вок}} (\varphi_{\text{ни}} \leq \varphi_n \leq \varphi_{\text{ви}})}{\tau_{\text{функ}}} \quad (7.1)$$

Источником существенных тепловых изменений, происходящих в резервуаре, является солнечная радиация. Тепловой поток от солнца приводит к нагреву металлической оболочки, ограничивающей газовое пространство резервуара. От нагретых стенок и крыши резервуара тепло теряется в окружающий воздух посредством конвективно-лучистого теплообмена, а также передаётся паровоздушной смеси внутри резервуара и поверхностному слою. Последний отдаёт часть тепла посредством теплопроводности нижележащим слоям, другая часть тепла тратится на испарение, а основная масса полученного поверхностным слоем тепла идёт на изменение его внутренней энергии, т. е. на увеличение температуры.

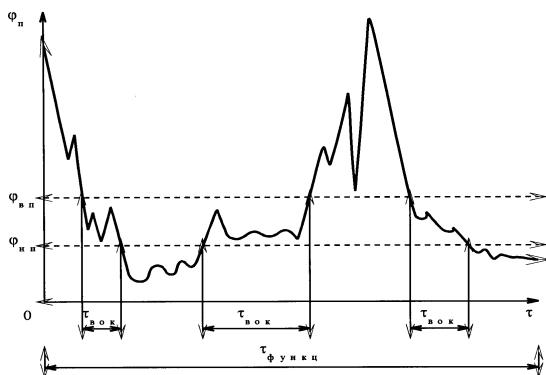


Рис. 7.1. Расчетная схема к определению уровня взрывоопасности

При этом температура основной массы ЛВЖ в РВС близка к среднемесячной температуре окружающего воздуха, а температура поверхностного слоя ЛВЖ является функцией теплового режима резервуара, которая может на несколько градусов превышать значение основной массы ЛВЖ в резервуаре.

Закономерности изменения суточных температур поверхностного слоя обуславливают характер изменения концентрации паров ЛВЖ в пограничном слое. Можно выделить (рис. 7.2) следующие характерные периоды существования взрывоопасных концентраций паров ЛВЖ в РВС.

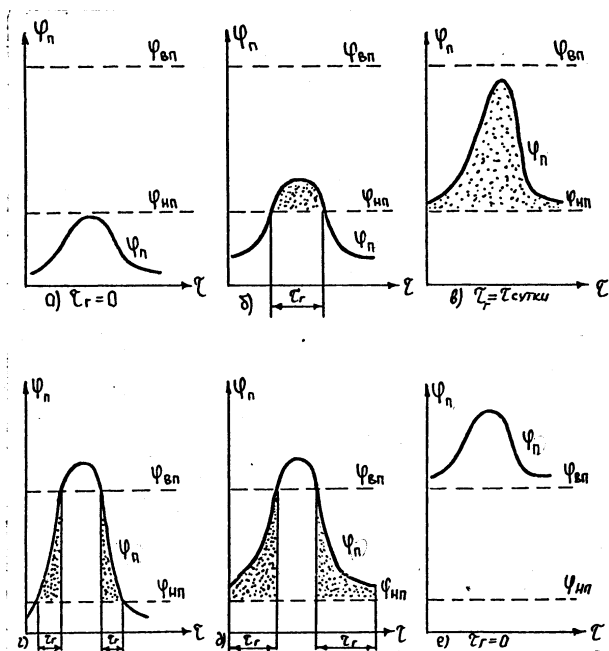


Рис. 7.2. Характерные периоды существования взрывоопасных концентраций паров ( $\varphi_{\text{впк}}$ )

- а) в течение суток  $\varphi_{\text{п}}$  не достигает  $\varphi_{\text{нп}}$ ; б) в ночное, утреннее и вечернее время находится  $\varphi_{\text{п}} < \varphi_{\text{нп}}$ , днем –  $\varphi_{\text{п}}$  в пределах  $\varphi_{\text{впк}}$ ; в) в течение суток находится  $\varphi_{\text{п}}$  в пределах  $\varphi_{\text{впк}}$ ; г) в ночное время находится  $\varphi_{\text{п}} < \varphi_{\text{нп}}$ , днем –  $\varphi_{\text{п}} > \varphi_{\text{вп}}$ , утром и вечером –  $\varphi_{\text{п}}$  в пределах  $\varphi_{\text{впк}}$ ; д) ночью, утром и вечером находится  $\varphi_{\text{п}}$  в пределах  $\varphi_{\text{впк}}$ , днем –  $\varphi_{\text{п}} > \varphi_{\text{вп}}$ ; е) в течение суток  $\varphi_{\text{п}} > \varphi_{\text{вп}}$ .

В течение суток при воздействии солнечной радиации изменение температуры окружающего воздуха, металлической оболочки, ограничивающей газовое пространство резервуара, и температуры поверхностного слоя ЛВЖ в РВС подчиняется синусоидальному закону (рис. 7.3).

Для описания температуры поверхностного слоя ЛВЖ в РВС при воздействии на него солнечной радиации может быть использовано уравнение:

$$t_{\text{н.сл}} = (t_{\text{н.сл-макс}} - t_{\text{жс}}) \sin \frac{\pi \tau_c}{\tau_{\text{дн}}} + t_{\text{жс}}, \quad (7.2)$$

где  $t_{п.сл}$  – текущая температура поверхностного слоя ЛВЖ;  
 $t_{п.сл-макс}$  – максимальная температура поверхностного слоя ЛВЖ;  
 $t_{ж}$  – температура основной массы ЛВЖ (среднемесячная температура);  
 $\tau_c$  – продолжительность теплового воздействия солнечной радиации от момента восхода солнца;  
 $\tau_{дн}$  – общая продолжительность теплового воздействия солнечной радиации (продолжительность светового дня).

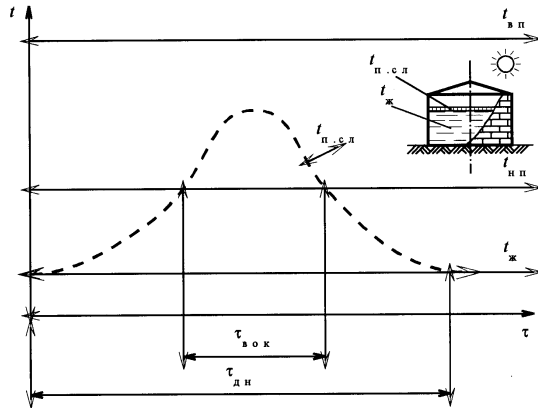


Рис. 7.3. Закономерности образования взрывоопасных концентраций паров в пограничном слое над поверхностью ЛВЖ в РВС при воздействии солнечной радиации

После захода солнца, а также в несолнечные дни температура поверхностного слоя стремится к температуре основной массы ЛВЖ, так как она имеет большой тепловой эквивалент. Температуру основной массы ЛВЖ в резервуаре принимают равной среднемесячной температуре окружающего воздуха.

Максимальная температура поверхностного слоя может быть определена методом, основанным на решении уравнения Фурье при синусоидальном изменении температуры на поверхности полубесконечного тела, при этом расчетная формула представляет собой:

$$t_{п.сл-макс} = \frac{q_{л} + \alpha_{w-f}(t_{f-макс} - t_f)}{\alpha_{w-f} + \alpha_{п.в-ж} + \alpha_{w-ж} f_{ж} / f_{об}} + t_{ж}, \quad (7.3)$$

$$1 + \frac{m_{ж} \lambda_{ж}}{\alpha_{п-ж}} \left( 1 + \frac{f_{ж}}{f_{об}} \frac{\alpha_{п-ж}}{\alpha_{w-п}} \right)$$

где  $q_{л}$  – тепловая нагрузка на резервуар от солнечной радиации, Вт·м<sup>-2</sup>;  
 $\alpha_{w-f}$  – коэффициент теплоотдачи в сложном лучисто-конвективном теплообмене от оболочки, ограничивающей газовое пространство резервуара, в окружающий воздух, Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>;

$\alpha_{п.в-ж}$  – приведенный коэффициент теплоотдачи от оболочки, ограничивающей газовое пространство резервуара, к поверхностному слою ЛВЖ, Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>;

$\alpha_{в-ж}$  – коэффициент теплоотдачи излучением от оболочки, ограничивающей газовое пространство резервуара, к ЛВЖ, Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>;

$\alpha_{п-ж}$  – коэффициент теплоотдачи от паровоздушной смеси к поверхностному слою ЛВЖ, Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>;

$t_{f-max}$  – максимальная среднемесячная температура воздуха, °С;

$t_f$  – среднемесячная температура окружающего воздуха, °С;

$m_{ж}$  – показатель температурного поля в поверхностном слое ЛВЖ, м<sup>-1</sup>;

$\lambda_{ж}$  – коэффициент теплопроводности ЛВЖ, Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;

$\alpha_{в-п}$  – коэффициент теплоотдачи в сложном лучисто-конвективном теплообмене от оболочки, ограничивающей газовое пространство резервуара, к паровоздушной смеси, Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>;

$f_{ж}$  – площадь зеркала ЛВЖ в резервуаре, м<sup>2</sup>;

$f_{об}$  – площадь оболочки, ограничивающей газовое пространство РВС, м<sup>2</sup>;

$t_{ж}$  – температура основной массы ЛВЖ, °С (среднемесячная температура воздуха).

При недостатке данных в расчетах можно принять следующие значения коэффициентов:  $\lambda_{ж} = 0,11$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  $\alpha_{в-f} = 10,7$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>;  $\alpha_{п.в-ж} = 0,73$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>;  $\alpha_{п-ж} = 5,3$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>;  $\alpha_{в-ж} = 5,3$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>;  $\alpha_{в-п} = 2,5$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>.

Для определения величины максимальной среднемесячной температуры окружающего воздуха можно воспользоваться формулой:

$$t_{f-max} = t_f + \Delta t_{f-max}/2 \quad (7.4)$$

где  $\Delta t_{f-max}$  – максимальная суточная амплитуда колебаний температуры окружающего воздуха для июля.

Температура основной массы ЛВЖ  $t_{ж}$  в резервуаре стремится к среднемесячной температуре окружающего воздуха ( $t_f$ ), и в расчетах можно принять это значение.

Площадь зеркала испарения ЛВЖ в резервуаре определяется как площадь круга с диаметром РВС:

$$f_{жс} = \pi d_p^2/4, \quad (7.5)$$

где  $d_p$  – диаметр резервуара, м.

Площадь оболочки, ограничивающей газовое пространство резервуара:

$$f_{об} = f_{жс} + \pi d_p (h_p - h_{жс}), \quad (7.6)$$

где  $h_p$  – высота резервуара, м;

$h_{жс}$  – высота (уровень) разлива ЛВЖ в резервуаре, м.

Площадь оболочки, ограничивающей газовое пространство резервуара, на которую воздействует солнечная радиация, определяют как аппроксимацию на плоскость, перпендикулярную направлению солнечных лучей:



$$f_l = d_p (h_p - h_{жс}) \sin (\psi - \xi) + f_{жс} \cos (\psi - \xi), \quad (7.7)$$

где  $\psi$  – географическая широта местности, град;

$\xi$  – усредненное значение расчетного склонения солнца, град.

Усредненное значение расчетного склонения солнца для текущего месяца можно найти по справочникам, в зависимости от расположения рассматриваемой системы или определить по формуле:

$$\xi = 22,7 \sin (295 - 30 N_{\text{жс}}), \quad (7.8)$$

где  $N_{\text{жс}}$  – порядковый номер месяца года.

Плотность падающего теплового потока от Солнца на поверхность, нормальную к направлению солнечных лучей (формула Бугера-Бертрана):

$$q_c = 1325 \rho_{\text{ат}}^{[\cos(\psi - \xi)]^{-1}}, \quad (7.9)$$

где 1325 – солнечная постоянная, Вт·м<sup>-2</sup>;

$\rho_{\text{ат}}$  – коэффициент прозрачности атмосферы (можно принимать 0,7).

Тепловая нагрузка на резервуар от солнечной радиации:

$$q_l = \varepsilon_w \cdot q_c \cdot f_l / f_{\text{об}}, \quad (7.10)$$

Степень черноты оболочки резервуара  $\varepsilon_w$ , окрашенной алюминиевой краской годичной давности, допускается принимать равной 0,7;

Показатель температурного поля в поверхностном слое ЛВЖ, м<sup>-1</sup>

$$m_{\text{жс}} = \sqrt{\frac{\pi \rho_{\text{жс}} c_{\text{жс}}}{7200 \lambda_{\text{жс}} \tau_{\text{дн}}}}, \quad (7.11)$$

где  $\rho_{\text{жс}}$  – плотность жидкости, кг·м<sup>-3</sup>;

$c_{\text{жс}}$  – теплоемкость жидкости в РВС, Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> (при отсутствии справочных данных допускается принимать равной 2000 Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>);

$\tau_{\text{дн}}$  – продолжительность светового дня, ч (принимается по справочным данным для места расположения объекта).

Можно использовать формулу для ориентировочного расчета:

$$\tau_{\text{дн}} = 11,9 + 5,7 \sin (267 - 27 N_{\text{жс}}), \quad (7.12)$$

где  $N_{\text{жс}}$  – порядковый номер месяца года.

Коэффициент, который отражает соотношение температур основной массы ЛВЖ, поверхностного слоя и нижнего температурного предела распространения пламени ( $\theta$ ) и определяется по формуле:

$$\theta = \frac{t_{\text{ин}} - t_{\text{жс}}}{t_{\text{н.сл-макс}} - t_{\text{жс}}}, \quad (7.13)$$

где  $t_{\text{ин}}$  – нижний температурный предел распространения пламени, °С;

$t_{\text{жс}}$  – температура основной массы ЛВЖ, °С;

$t_{п.сл-маx}$  – максимальная температура поверхностного слоя ЛВЖ, °С.

Далее, в зависимости от того, по какой кривой изменяется в течение дня концентрация от температуры окружающего воздуха, определяется возможность существования концентраций  $\varphi_{вок}$ .

Возможны следующие варианты:

- $\theta > 1$  –  $\varphi_{вок}$  внутри системы не образуются, так как  $t_{п.сл-маx} < t_{нп}$  (рис. 7.2 а);
- $\theta < 0$  –  $\varphi_{вок}$  будут существовать в течение суток, так как  $t_{ж} > t_{нп}$  (рис. 7.2 в);
- $0 < \theta < 1$  – (рис. 7.2 б) значение  $\tau_{вок}$  определяют по формуле (7.14).

Уровень взрывоопасности технологической системы «РВС – ЛВЖ» в  $i$ -м месяце определяют из соотношения

$$Z_i = \frac{N_{с.дн} \cdot \tau_{вок}}{N_{дн} \cdot 24}, \quad (7.14)$$

где  $N_{с.дн}$  – число безоблачных дней в рассматриваемом месяце;

и  $N_{дн}$  – общее количество дней в рассматриваемом месяце.

### 7.3. Геометрические и теплофизические параметры пожарной опасности разлива ЛВЖ при полном разрушении РВС

#### Определение геометрических параметров пожарной опасности разлива при полном разрушении РВС

Площадь разлива ЛВЖ при полном разрушении резервуара прямо пропорциональна объему жидкости, которая разлилась на поверхность:

$$F_{жс} = f_z \cdot \varepsilon_p \cdot V_p, \quad (7.15)$$

где  $F_{жс}$  – площадь зоны разлива, м<sup>2</sup>;

$f$  – коэффициент разлива, м<sup>-1</sup>;

$\varepsilon_p$  – степень заполнения резервуара;

$V_p$  – номинальная вместимость резервуара, м<sup>3</sup>.

Коэффициент разлива ЛВЖ зависит от местности, где произошел разлив жидкости: если угол склона менее 1%, то коэффициент равен 5, если поверхность имеет уклон более 1% –  $f = 12$ .

Толщина слоя разлившейся ЛВЖ ориентировочно определяется исходя из коэффициента разлива:

$$\delta_{ж} = 1 / f. \quad (7.16)$$

Форма, которая образуется в результате разлива ЛВЖ, определяется в зависимости от расположения резервуара на местности:

1. В низине или на ровной поверхности (с уклоном до 1 %) – в виде круга. Радиус равен:

$$R_{ж} = \sqrt{\frac{F_{ж}}{\pi}}; \quad (7.17)$$

2. На возвышенности – в виде эллипса.

Значения осей эллипса определяют по следующим формулам:

а) большой полуоси

$$b = \sqrt{\frac{K_{ук} F_{ж}}{\pi}}; \quad (7.18)$$

б) малой полуоси

$$\alpha = 4 F_{ж} / (\pi b), \quad (7.19)$$

где  $K_{ук}$  – коэффициент, характеризующий уклон, благоприятствующий разливу жидкости (при уклоне не более 3 % – 8; при уклоне более 3 % – 16).

### **Определение теплофизических параметров пожарной опасности разлива при полном разрушении РВС**

При оценке пожарной опасности технологической системы «РВС –ЛВЖ» можно определить интенсивность испарения и массу испарившейся жидкости с поверхности разлива ЛВЖ расчетным путем.

Массу паров ЛВЖ, испарившейся с поверхности разлива, определяют из выражения, кг:

$$m_n = W_{исп} \cdot F_{зп} \cdot \tau, \quad (7.20)$$

где  $W_{исп}$  – интенсивность испарения, кг·с<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>;

$F_{зп}$  – площадь испарения, м<sup>2</sup>;

$\tau$  – продолжительность испарения, с.

Для ненагретых ЛВЖ при отсутствии экспериментальных данных допускается рассчитывать значение  $W_{исп}$  (кг с<sup>-1</sup> м<sup>-2</sup>) по формуле:

$$W_{исп} = 10^{-6} \cdot \sqrt{M} \cdot P_s, \quad (7.21)$$

где  $\eta$  – коэффициент, учитывающий влияние скорости и температуры воздушного потока на интенсивность испарения;

$M$  – молярная масса, кг·кмоль<sup>-1</sup>;

$P_s$  – давление насыщенного пара жидкости, кПа.

Давление насыщенных паров, кПа, можно определять по уравнению Антуана:

$$\lg P_s = A_A - \frac{B_A}{C_A + t_p}, \quad (7.22)$$

где  $A_A$ ,  $B_A$  и  $C_A$  – константы уравнения Антуана;

$t_p$  – расчетная температура, °С (принимается как среднемесячная температура окружающего воздуха).

При расчете массы паров ЛВЖ, испарившейся с поверхности разлива, анализируют два варианта:

I вариант – за период менее чем 3600 с вся разлившаяся ЛВЖ способна испариться;

II вариант – за период 3600 с только часть разлившейся ЛВЖ испаряется.

Продолжительность поступления паров при испарении определяют из условия разлива ЛВЖ на 1 м<sup>2</sup> по формуле:

$$T = \frac{\delta_{ж} \rho_{ж}}{W_{исп}}, \quad (7.23)$$

где  $\delta_{ж}$  – толщина слоя разлившейся жидкости, м;

$\rho_{ж}$  – плотность ЛВЖ, кг·м<sup>-3</sup>;

$W_{исп}$  – интенсивность испарения ЛВЖ, кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

## 8. УСТРОЙСТВА И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ВЗРЫВОВ

### 8.1. Клапаны предохранительные на емкостях и трубопроводах

Аварии на производстве могут возникать, в частности, как результат существенного превышения технологических параметров, а также при нарушении правил эксплуатации, кроме того, аварии могут быть связаны с применением в технологическом процессе взрывчатых и воспламеняющих веществ.

Устройства, обеспечивающие предотвращение взрывов:

- предохранительные клапаны;
- предохранительные мембраны.

Факторы, характеризующие опасность взрыва – это такие максимальные давления, максимальные температуры, а также скорость нарастания давления при взрыве.

Для предупреждения взрывов необходимо исключить образование взрывоопасной среды, а также исключить источник возникновения взрыва

Взрывоопасную среду могут образовывать смеси веществ, газов, паров, пылей с воздухом или с другими окислителями.

Предотвращение воздействия на работающих опасных и вредных производственных факторов, возникающих в результате взрыва, и сохранение материальных ценностей обеспечиваются:

- установлением минимальных количеств взрывоопасных веществ, применяемых в данных производственных процессах;
- применением огнепреградителей, гидрозатворов, водяных и пылевых заслонов, инертных (не поддерживающих горение) газовых и паровых занавесов;
- применением оборудования, рассчитанного на давление взрыва;
- обваловкой или бункеровкой взрывоопасных участков производства или размещением их в защитных кабинах;
- защитой оборудования от разрушения при взрыве при помощи устройств аварийного сброса давления (предохранительные мембраны и клапаны);
- применением быстродействующих отсечных и обратных клапанов;
- применением систем активного подавления взрыва;
- применением средств предупредительной сигнализации.

Межгосударственный стандарт для России и стран СНГ – ГОСТ 31294-2005 «Клапаны предохранительные прямого действия».

В общем случае, клапаны различаются по типу затвора – с механическим и гидравлическим затвором. Первые используются в качестве дыхательных и предохранительных, вторые – только в качестве предохранительных.

При проектировании данных устройств следует иметь в виду следующую терминологию:

**Предохранительный клапан прямого действия** – предохранительный клапан, в котором действию давления рабочей среды на запорное устройство (затвор) противодействует механическая нагрузка (груз, рычаг с грузом, пружина).

**Предохранительный клапан, приводимый в действие клапаном управления** – предохранительный клапан, открытие и закрытие которого обеспечивается клапаном управления, изолированным от воздействия рабочей среды и имеющим независимый от основного клапана источник энергии.

**Рабочее давление** – наибольшее избыточное давление, возникающее при нормальном протекании рабочего процесса, без учета гидростатического давления среды и допустимого кратковременного повышения давления во время действия предохранительного клапана.

**Расчетное давление** – избыточное давление, на которое производится расчет прочности сосуда в соответствии с ГОСТ 14249.

**Давление настройки** – наибольшее избыточное давление на входе в клапан, при котором затвор закрыт и обеспечивается заданная герметичность затвора.

**Противодавление** – избыточное давление на выходе из клапана при сбросе среды.

**Пропускная способность** – весовой расход рабочей среды через клапан.

**Расчетное проходное сечение** – площадь узкого сечения проточной части седла клапана.

**Коэффициент расхода для газообразных сред** – отношение измеренной пропускной способности к пропускной способности, рассчитанной при тех же параметрах, через идеальное сопло с площадью узкого сечения, равной расчетному проходному сечению клапана.

**Коэффициент расхода для жидкости** – отношение измеренной пропускной способности к пропускной способности, рассчитанной без учета сопротивлений, создаваемых клапаном, через сечение площадью, равной площади выходного патрубка клапана.

Защите предохранительными клапанами подлежат сосуды, в которых возможно превышение рабочего давления от питающего источника, химической реакции, нагрева подогревателями, солнечной радиации, в случае возникновения пожара рядом с сосудом и т. д.

Количество клапанов, их размеры и пропускная способность должны быть выбраны так, чтобы в сосуде не могло создаваться давление, превышающее расчетное давление более чем на 0,05 МПа (0,5 кг/см<sup>2</sup>) для сосудов с давлением до 0,3 МПа (3 кгс/см<sup>2</sup>), на 15 % — для сосудов с давлением свыше 0,3 до 6,0 МПа (от 3 до 60 кгс/см<sup>2</sup>) и на 10 % — для сосудов с давлением свыше 6,0 МПа (60 кгс/см<sup>2</sup>).

При работающих клапанах допускается превышение давления в сосуде не более чем на 25 % расчетного при условии, что это превышение подтверждено расчетом на прочность по ГОСТ 14249, ГОСТ 25215, ГОСТ 26303, СТ СЭВ 5206, действующим нормативным документам, предусмотрено технической документацией и отражено в паспорте сосуда.

Рабочий и резервный клапан должны иметь равную пропускную способность, обеспечивающую полную защиту сосуда от превышения давления свыше допустимого. Для обеспечения ревизии и ремонта клапанов до и после них должна быть установлена отключающая арматура с блокирующим устройством, исключающим возможность одновременного закрытия запорной арматуры на рабочем и резервном клапанах, причем проходное сечение в узле переключения в любой ситуации должно быть не менее проходного сечения устанавливаемого клапана.

### Расчет пропускной способности клапана

Пропускная способность предохранительного клапана:

1. Для водяного пара (для давления в МПа):

$$G = 10 B_1 B_2 \alpha_1 F (P_1 + 0,1), \quad (8.1)$$

где  $G$  – пропускная способность клапана, кг/ч;

$B_1$  – коэффициент, учитывающий физико-химические свойства водяного пара при рабочих параметрах перед клапаном;

$B_2$  – коэффициент, учитывающий соотношения давлений перед клапаном и за клапаном;

$F$  – площадь сечения клапана, равная наименьшей площади сечения в проточной части седла, мм<sup>2</sup>;

$\alpha_1$  – коэффициент расхода, соответствующий площади  $F$ , для газообразных сред;

$P_1$  – наибольшее избыточное давление перед клапаном (избыточное давление до клапана, равное давлению полного открытия), МПа.

2. Для других паров и газов (для давления в МПа):

$$G = 10 B_3 B_2 \alpha_1 F (P_1 + 0,1), \quad (8.2)$$

где  $B_3$  – коэффициент, учитывающий физико-химические свойства газов и паров при рабочих параметрах;

$\rho$  – плотность пара, газа или жидкости перед клапаном при параметрах  $P_1$  и  $T_1$ , кг/м<sup>3</sup>.

3. Для жидкостей (для давления в МПа):

$$G = 5.03 \alpha_2 F \sqrt{(P_1 - P_2) \rho} \quad (8.3)$$

где  $\alpha_2$  – коэффициент расхода, соответствующий площади  $F$ , для жидких сред;

$P_2$  – наибольшее избыточное давление за клапаном (избыточное давление за клапаном в положении его полного открытия), МПа.

Плотность пара, газа или жидкости перед клапаном при параметрах  $P_1$  и  $T_1$ , кг/м<sup>3</sup> определяется по таблицам или диаграммам состояния; плотность реального газа также подсчитывают по формуле (для давления в МПа), ( $R$  в Дж/кг·К):

$$\rho = \frac{(P_1 + 0,1)10^6}{B_4 R T_1}, \quad (8.4)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/кг·К;

$B_4$  – коэффициент, который определяется по справочным данным (для идеального газа  $B_4 = 1$ );

$B_1$  – коэффициент, который определяется по справочным данным,

Эффективная площадь клапана  $F_1$ , мм<sup>2</sup> определяется по формулам:

1. Для водяного пара

$$F_1 = a_1 * F = \frac{G_A}{3,16 * B_1 * B_2 * (P_1 + 0,1)} \quad (8.5)$$

2. Для газа

$$F_1 = a_1 * F = \frac{G_A}{3,16 * B_3 * \sqrt{(P_1 + 0,1)} * \rho} \quad (8.6)$$

## 8.2. Предохранительные мембраны на трубопроводах и газоходах

Мембраны и МПУ (мембранные предохранительные устройства) применяются для защиты объектов от опасных перегрузок давлением.

Мембраны устанавливаются на потенциально опасных объектах в качестве:

- самостоятельных предохранительных устройств (например, для защиты сосудов от опасных перегрузок вакуумметрическим давлением; для одновременной защиты сосудов от опасных перегрузок как вакуумметрическим, так и избыточным давлением);
- в различных сочетаниях с предохранительными клапанами.

При опасном повышении давления в объектах мембраны срабатывают (разрушаются) и освобождают необходимое (по пропускной способности) проходное сечение для сброса давления.

Материалами для изготовления мембран служат тонколистовые материалы (фольга, лента, лист), имеющие ровную блестящую поверхность.

Мембраны являются одноканальными (однофункциональными) изделиями разового использования.

Сравнение мембран разрывных и хлопающих приведено в табл. 8.1.



Таблица 8.1 – Сравнение мембран разрывных и хлопающих

Мембраны разрывные (МР)	Мембраны хлопающие (МХ)
1. Применяются на жидких и газообразных средах	1. Применимы для газообразных сред. Для жидких рабочих сред МПУ с хлопающими мембранами применимы при наличии под ними газовой подушки объемом не менее 2,4Ду <sup>3</sup> .
2. Механизм действия	
2. Работают на растяжение, при требуемом давлении разрываются с возможностью образования осколков и освобождают необходимое (по пропускной способности) проходное сечение для сброса давления	2. Обращенные к объекту применения выпуклой поверхностью, они при требуемом давлении хлопают (выворачиваются в обратную сторону), разрезаются ножевыми лезвиями МПУ и раскрываются без образования осколков, освобождая необходимое (по пропускной способности) проходное сечение для сброса давления
3. Форма	
3. Выполнены в виде плоских дисков, куполообразных оболочек, а также панелей прямоугольного и других сечений (по форме сбросных каналов-трубопроводов рукавных фильтров, вентиляционных систем и других объектов применения мембран)	3. Куполообразная МП

С повышением (понижением) температуры давление срабатывания мембран понижается (повышается) для разрывных мембран в большей степени, чем для мембран хлопающих.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вы познакомились с учебным пособием, посвященным техногенным опасностям. Далее вам предстоит работать в направлении, связанном с безопасностью технологических процессов и производств, то есть предстоит самостоятельно пополнять знания, связанные в том числе и с опасностями. Поэтому в заключение нам хотелось бы остановиться на общем алгоритме самостоятельного анализа опасностей.

1. При изучении новых опасностей обязательно добавляйте в понятийный ряд в области промышленной безопасности все новые термины. Чем полнее понятийный ряд, тем меньше путаницы в голове.

2. Законодательная база в нашей стране еще не устоялась, в дополнениях к законам, связанным с промышленной безопасностью, в систему стандартов безопасности, в санитарные нормы и правила могут быть внесены кардинальные изменения. Следите за нормотворчеством в области промышленной безопасности, учитывайте в своей профессиональной деятельности все изменения.

3. Оценка любой опасности включает следующие элементы:

- классификацию опасности и набор статистики по рискам;
- определение основных поражающих факторов и параметров поражения и выбор методов их расчета;
- установление критериев поражения и расчет параметров риска;
- формулирование выводов о степени опасности.

Мы дали вам алгоритм действий, ваша задача – реализовать его на опасном производственном объекте или в проектном бюро.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ефремов, С. В. Опасные технологии и производства [Текст]: учеб. пособие / С. В. Ефремов. – СПб.: Изд-во Политехнического Университета, 2007. – 236 с.
2. Цабулин, В. А. Безопасность в чрезвычайных ситуациях [Текст] / В. А. Цабулин. – СПб.: СПбГТУ, 1999.
3. Федеральный закон от 21.07.97 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».
4. Маршалл, В. Основные опасности химических производств [Текст] / В. Маршалл. – М.: Мир, 1989.
5. Сафонов, В. С. и др. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности [Текст] / В. С. Сафонов и др. – М.: НУМЦ Минприроды России, 1996. – 228 с.
6. Яковлев, В. В. и др. Последствия аварийных взрывов газоздушных смесей [Текст] / В. В. Яковлев и др. – СПб.: СПбГТУ, 2000. – 60 с.
7. Васильев, В. И. и др. Пожары. Поражающее действие и обеспечение безопасности [Текст]: учеб. пособие / В. И. Васильев. – СПб.: СПбГТУ, 2002. – 71 с.
8. Храмов, Г. Н. Техногенные взрывы [Текст]: учеб. пособие / Г. Н. Храмов. – СПб.: СПбГПУ, 2002.
9. Пособие по оценке опасности, связанной с возможными авариями при производстве, хранении, использовании и транспортировке больших количеств пожароопасных, взрывоопасных и токсичных веществ. [М.: Минприрода РФ, 1992. – 37 с.
10. ГОСТ Р 22.2.08-96. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Взрывы. Термины и определения.
11. Предупреждение крупных аварий [Текст]: Практическое руководство. (Международное бюро труда: Женева, Московский НИИ охраны труда). – М.: Рагор, 1992. – 256 с.
12. Сводки Госгортехнадзора России.
13. Сучков, В. П. Пособие по применению методов оценки пожарной опасности технологических систем, используемых при анализе пожарных рисков [Текст] / В. П. Сучков. – М., 2009. – 157 с.
14. Болодьян, И. А. и др. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий [Текст] / И. А. Болодьян и др. – М.: ВНИИПО, 2006. – 93 с.
15. ГОСТ 31294–2005. Клапаны предохранительные прямого действия. Общие технические условия.

Учебное издание

**Антонов Иван Владимирович**  
**Ефремов Сергей Владимирович**

## **ОПАСНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ПРОИЗВОДСТВА**

*Учебное пособие*

Редактор и корректор Е. О. Тарновская  
Техн. редактор Д. А. Романова

Темплан 2020 г., поз. 49

---

Подписано к печати 12.07.2022	Формат 60x84/16.	Бумага тип № 1.
Печать офсетная.	Печ.л. 7,2.	Уч.-изд. л. 7,2.
Тираж 30 экз.	Изд. № 49 .	Цена «С».
		Заказ №

---

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,  
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.