

**Стоецкий В.Ф., Дранишников Л.В., Есипенко А.Д.,  
Жартовский В.М., Найверт А.В.**

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ  
ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ**

Киев - 2005

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	7
Введение .....	11

### **Часть 1. Экстремальные ситуации: методологический аспект**

1.1. Общая характеристика кризисных ситуаций .....	21
1.2. Эскалация кризиса и опасность "перехода" его в экстремальную ситуацию .....	28
1.3. Общественные трансформации и пути предотвращения кризисным и экстремальным ситуациям .....	34
1.4. Информационная революция: глобализационные угрозы .....	40
1.5. Рыночные трансформации и необходимость государственного противодействия современным угрозам развития .....	44
1.6. Проблема риска как "предтеча" экстремальных ситуаций .....	47
1.7. Основные направления анализа риска .....	49
1.8. Социальные риски и их иерархия .....	52
1.9. Риски хозяйственной деятельности и их интерпретация .....	57
1.10. Функциональная зависимость факторов риска .....	64
1.11. Компоненты "управление риском" .....	74
1.12. Экстремальные ситуации: система критериев и признаков .....	80
1.12.1. Факторы и гипотезы эскалации кризиса .....	81
1.12.2. Признак чрезвычайных (экстремальных) ситуаций .....	87
1.12.3. Чрезвычайные ситуации техногенного и естественного характера .....	92
1.12.4. Угрозы экстремальных ситуаций (отраслевой аспект) .....	100

## **Часть 2. Методы анализа и оценки риска аварий**

2.1. Подходы и методы анализа и оценки риска .....	109
2.2. Идентификация опасностей .....	127
2.3. Оценка вероятности аварий и их последствий .....	130
2.3.1. <i>Оценка риска</i> .....	131
2.3.2. <i>Разработка рекомендаций по уменьшению риска</i> .....	132
2.3.3. <i>Методы проведения анализа отказов и рисков</i> .....	137
2.4. Методология исследования риска .....	146
2.4.1. <i>Определение последовательности негативных событий, дерева событий, дерева ошибок</i> .....	154
2.4.2. <i>Анализ возможных последствий</i> .....	162
2.4.3. <i>Коэффициенты готовности и неготовности для простых систем с независимыми базовыми событиями</i> .....	163
2.4.4. <i>Определение коэффициента готовности на основе структурной схемы расчета надежности</i> .....	172
2.5. Методы оценки риска аварий методами теории надежности .....	186

## **Часть 3. Количественные методы оценки последствий аварий**

3.1. Классификация количественных методов оценки последствий чрезвычайных ситуаций .....	205
3.2. Негативные факторы воздействия источников чрезвычайных ситуаций на человека и среду обитания .....	208
3.2.1. <i>Термическое воздействие на человека и строительные конструкции</i> .....	209
3.2.2. <i>Воздействие ударной волны на человека, здания и сооружения</i> .....	213
3.2.3. <i>Токсическое воздействие на человека и окружающую среду</i> .....	215
3.3. Анализ и обобщение моделей для использования в методиках расчета .....	218

3.4. Воздействие аварийных взрывов на городские и другие объекты ...	224
3.4.1. Общие принципы количественной оценки взрывоопасности технологических блоков .....	227
3.4.2. Расчет участвующей во взрыве массы вещества и радиусов зон разрушения .....	233
3.4.3. Расчет избыточного давления и импульса волны давления при взрывах конденсированных ВВ, сгорании смесей горючих газов и паров с воздухом, ЛВЖ и горючих жидкостей, горючих пылей .....	235
3.4.3.1. Взрывы конденсированных ВВ .....	237
3.4.3.2. Взрывы газопаровоздушных смесей в открытом пространстве....	242
3.4.3.3. Газо-паровоздушные смеси и пыли в ограниченном пространстве..	256
3.5. Модели оценки физико-химических параметров последствий аварий на промышленных объектах .....	271
3.5.1. Истечение жидкости из отверстия резервуара .....	271
3.5.2. Количественная оценка массы горючих веществ, поступающих в окружающее пространство в результате возникновения аварийных ситуаций .....	274
3.5.2.1. Определение массы легковоспламеняющейся или горючей жидкости, поступившей при разгерметизации наземного резервуара (цистерны)...	275
3.5.2.2. Определение массы ЛВЖ (ГЖ), поступившей самотеком при разгерметизации трубопровода, выходящего из резервуара .....	276
3.5.2.3. Определение массы ЛВЖ (ГЖ), поступившей в окружающее пространство при разгерметизации напорного трубопровода.....	277
3.5.2.4. Определение площади пролива ЛВЖ (ГЖ) .....	279
3.5.2.5. Определение массы паров ЛВЖ, выходящих через "дыхательную" арматуру или разгерметизированную арматуру, соединяющую паровое пространство резервуара с атмосферой, при наполнении резервуара и при хранении ЛВЖ .....	279
3.5.3. Масса газа, поступающая в окружающее пространство при аварии .....	281

3.5.3.1. Испарение жидкости из пролива .....	282
3.5.3.2. Образование паровоздушного облака .....	289
3.5.4. Модели оценки интенсивности теплового излучения .....	291
3.5.4.1. Пожар пролива .....	292
3.5.4.2. Тепловые характеристики огненного шара .....	296
3.6. Оценка последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей ТВС) .....	311
3.6.1. Определение эффективного энергетического запаса ТВС .....	315
3.6.2. Определение ожидаемого режима взрывного превращения .....	317
3.6.3. Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных ударных волн .....	320
3.6.3.1. Детонация газовых и гетерогенных топливновоздушных смесей...320	
3.6.3.2. Дефлаграция газовых и гетерогенных топливновоздушных смесей .....	321
3.6.4. Определение дополнительных характеристик взрыва ТВС .....	322
3.6.4.1. Параметры падающей волны при детонации облака газовой смеси .....	322
3.6.4.2. Параметры отраженной ударной волны .....	323
3.6.5. Оценка поражающего воздействия .....	325
3.6.5.1. Оценка вероятности повреждений промышленных зданий от взрыва облака ТВС .....	325
3.6.5.2. Оценка вероятности поражений людей при взрыве облака ТВС ..	326
3.6.5.3. Вероятность поражения человека тепловым излучением.....	327
3.7. Методика оценки последствий аварий на пожаро, - взрывоопасных объектах .....	350
3.8. Чрезвычайные ситуации, вызванные выбросом токсических веществ .....	353
3.8.1. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте ...	355

3.8.2. Методика оценки последствий химических аварий .....	363
3.8.2.1. Определение количественных характеристик выброса ОХВ .....	374
3.8.2.2. Определение полей концентраций и токсодозы .....	393
3.9. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий .....	423
3.9.1. Рассеивание вредных веществ в атмосферном воздухе .....	424
3.9.2. Расчет загрязнения атмосферы выбросами одиночного источника..	430
3.9.3. Расчет загрязнения атмосферы выбросами группы источников.....	440
Приложение .....	455
Литература .....	471

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Общество риска - это постиндустриальная формация общества, которое имеет несколько особенностей. Главная из этих особенностей состоит в том, что для общества риска характерно распределение угроз разного происхождения и обусловленных ими рисков, тогда как для индустриального - распределение благ. Эволюция индустриального общества сопровождалась появлением новых факторов, которые улучшали жизнь человека. В обществе риска воцаряется другая ситуация: по мере его развития появляется все больше отрицательных факторов, действие которых неравномерно затрагивает членов общества. В индустриальном обществе вырабатываются и распределяются главным образом положительные достижения, а в обществе риска, которое "врастает" в индустриальное, накапливаются и распределяются между членами отрицательные последствия развития последнего.

Таким образом, проблема риска как "предтечи" экстремальных ситуаций исподволь, но неотвратимо становится одной из неотъемлемых характеристик национальной безопасности.

Рассматриваемые в пособии "Управление технической безопасностью объектов повышенной опасности" вопросы имеют первостепенное значение для всех развитых стран. Тем не менее, ее научная разработка началась всего несколько десятилетий назад, а в Украине этому вопросу начали уделять внимание с середины 90-х годов. С этого времени в промышленности Украины заметно вырос средний износ оборудования, а, следовательно, и риск возникновения аварийных ситуаций и постоянного загрязнения окружающей среды. Стало ясно, что заниматься безопасностью производств надо не только на уровне отделов техники безопасности и охраны труда, но и на более высоких уровнях: производства, отрасли и т.д. Это, возможно, осуществить только на качественно ином подходе к решению данной проблемы. Таким подходом может быть системный анализ производства.

Проблема предотвращения аварий на опасных химических, нефтехимических, металлургических и других потенциально опасных производствах (объектах) является чрезвычайно актуальной и требует незамедлительного решения, как в научном, так и в учебно-методическом плане – подготовки специалистов в области промышленной безопасности, безопасности жизнедеятельности.

Современный специалист в области безопасности технологических процессов и производств должен обладать наряду с традиционными знаниями также знаниями и навыками использования последних достижений в области создания информационных систем для управления безопасностью, методов, моделей и комплексов программных средств для решения задач обеспечения промышленной и экологической безопасности различных производств.

В книге систематизирован накопленный к настоящему времени материал в области безопасности промышленных производств и оценки рисков. Последовательно изложены вопросы идентификации негативных факторов и их источников; прогнозирование и оценки возможных последствий аварий антропогенного характера. В развитии теоретических основ анализа и оценки риска в пособии определены общие и специфические особенности анализа и оценки риска в режимах нормального функционирования и в случае аварий на производствах. Предложены основные этапы анализа и оценки риска возникновения аварий на объектах повышенной опасности. На основе системного подхода к анализу различных классов опасных объектов как источников риска и промышленной опасности в работе предложены логико-графические и логические модели анализа риска и вероятностные модели оценки риска промышленных объектов.

В пособии предложена постановка задачи оперативного управления безопасностью химико-технологических систем как задачи поиска оптимальных управляющих воздействий, направленных на минимизацию всех видов ущербов, которые могут возникнуть в результате аварии на



данной установке при обеспечении приемлемых или допустимых значений всех видов рисков.

Для совершенствования нормативно-методической базы декларирования необходима система мер, связанных с внедрением в нормативную документацию методологии анализа риска, разработкой соответствующих методик, руководств и справочных материалов, а также с разработкой информационного комплекса, включающего автоматизированные системы, базы данных по аварийности, надежности оборудования, инспекционной деятельности и т.п.

В пособии представлены результаты практического использования моделей, методов и программных средств для анализа и оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (ТВС), количественной оценки последствий химической аварии на промышленном объекте с выбросом опасных химических веществ в атмосферу и по расчету концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Приведены многочисленные примеры с программами в среде Mathcad и оценками поражающего воздействия на людей: вероятности повреждений промышленных зданий от взрыва облака ТВС, вероятности разрушения промышленных зданий, при которых здания принадлежат сносу, вероятности длительной потери управляемости у людей, попавших в зону действия ударной волны, вероятности разрыва барабанных перепонок у людей от уровня перепада давления в воздушной волне, вероятности отброса людей волной давления, вероятности поражения человека тепловым излучением, токсического воздействия на человека, а также по расчету индивидуального, территориального и социального рисков. Разработанное по различным методикам программное обеспечение в среде Mathcad будет полезно для разработчиков деклараций безопасности промышленного объекта; при проведении анализа опасностей и рисков промышленных производств, на которых производятся, используются, транспортируются, хранятся топливо или ОХВ; при разработке планов

локализации и ликвидации последствий химических аварий; при разработке иных мероприятий по предупреждению техногенных чрезвычайных ситуаций и защите персонала и населения.

Пособие дает ясное представление о проблеме и будет, несомненно, полезно для разработчиков деклараций, при проведении анализа опасностей и рисков промышленных производств, при разработке планов локализации и ликвидации последствий аварий, а также для студентов специальностей "Безопасность жизнедеятельности", "инженеров-химиков экологов" и "Безопасность технологических процессов и производств".

Авторы с благодарностью примут все замечания и пожелания читателей по содержанию книги.

## Введение

В последние годы отмечен значительный рост чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного характера, связанных с авариями на промышленных производствах. На основании обобщения материалов /2-4/ предложена классификация чрезвычайных ситуаций, представленная на рис.1.

Техногенные ЧС по характеру и виду источников возникновения делятся на:

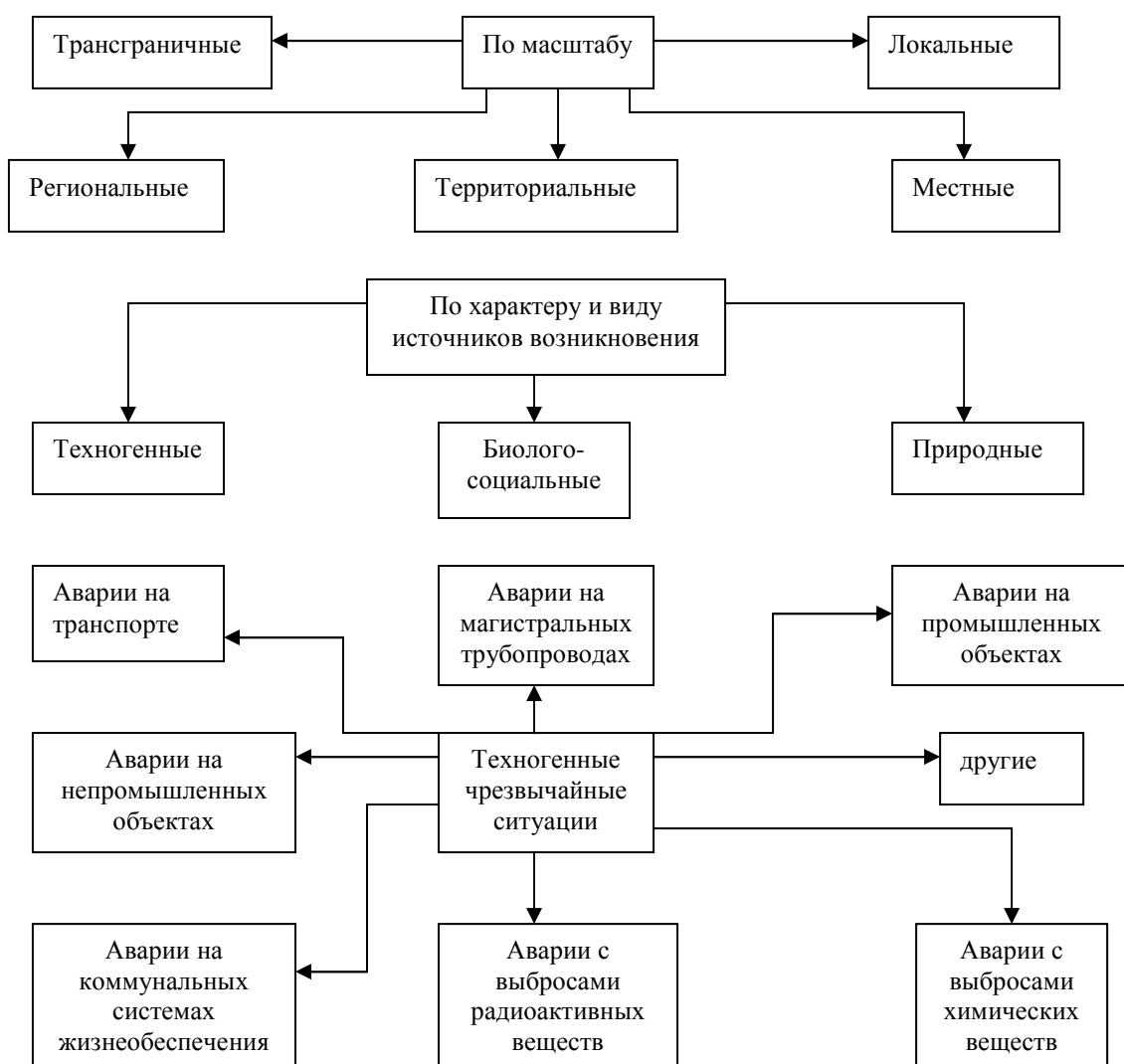


Рис. 1. Классификация чрезвычайных ситуаций

- аварии на транспорте, включая все виды пассажирского и грузового транспорта;
- аварии на магистральных трубопроводах;
- аварии на промышленных объектах;
- аварии на непромышленных объектах жилого, социально-бытового и культурного назначения;
- аварии на коммунальных системах жизнеобеспечения;
- аварии с выбросами (угрозой выбросов) опасных химических веществ;
- аварии с выбросами (угрозой выбросов) радиоактивных веществ;
- другие виды аварий, в том числе с обнаружением (утратой) взрывчатых веществ и т.п.

Авария /1/ - разрушительное высвобождение собственного энергозапаса промышленного предприятия, при котором сырье, промежуточные продукты, продукция предприятия и отходы производства, установленное на промышленной площадке технологическое оборудование, вовлекаясь в аварийный процесс, создают поражающие факторы для населения, персонала окружающей среды и самого промышленного предприятия. Наибольшую опасность для окружающей среды представляют аварии с выбросами опасных химических или радиоактивных веществ.

Химическая авария – авария на химически опасном объекте, сопровождающаяся проливом или выбросом опасных химических веществ, способная привести к гибели или к химическому заражению людей, продовольствия, пищевого сырья и кормов, сельскохозяйственных животных и растений, или к химическому заражению окружающей природной среды.

Основными причинами роста аварий являются: неудовлетворительное техническое состояние оборудования, неудовлетворительная организация и проведение опасных видов работ, нарушение технической дисциплины, нарушения при пуске установок после ремонта и длительного простоя,

неработоспособность средств автоматики и приборного обеспечения, нарушения производственной дисциплины.

Наибольшее количество аварий с негативными экологическими последствиями происходят на непромышленных объектах, транспорте, промышленных объектах. Произошедшие аварии усугубляют непростую экологическую обстановку в промышленных регионах. На промышленные источники выбросов приходится до 80% всех валовых выбросов. Анализ структуры выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух промышленными предприятиями России за 1988 год /5/ показал, что наибольший вклад в загрязнение воздуха вносят такие газообразные загрязнители, как диоксид серы – 35,9%, окись углерода – 24,1% и оксиды азота – 10,0%.

С другой стороны, по данным анализа причин аварий ряда промышленных производств и характеристик развития аварийных ситуаций /6/ выявлено, что в результате аварий со взрывами и возгораниями паровых облаков являются неизвестными ряд параметров: масса паровых облаков – в 51% случаев возникновения аварий; реакционная способность – в 18% случаев; источник возгорания – в 66%; перемещение воздушного облака – в 48%; место утечки – в 51%; время – в 67%; эффект домино – в 50% случаев.

Автором / 6/ отмечается, что наибольшее количество аварий связано с технологическими трубопроводами – 31,2%. Высока также аварийность технологического оборудования, расположенного на открытых технологических площадках. Основными причинами возникновения аварий, связанными с технологическим оборудованием, расположенным на открытых производственных площадках, являются: разгерметизации и утечки или выбросы опасных химических веществ и продуктов через сальники, прокладки – 30,2%, нарушение режима эксплуатации технологической линии – 16,9%. Разветвленная сеть технологических коммуникаций, высокая плотность насыщения технологическими аппаратами, высокое энергосодержание установок позволяет сделать вывод

о том, что последствия возможных аварий на открытых промплощадках химических и нефтехимических производств будут более тяжелыми, чем в закрытых производственных зданиях.

Потенциально опасный объект может функционировать в следующих режимах (рис.2):

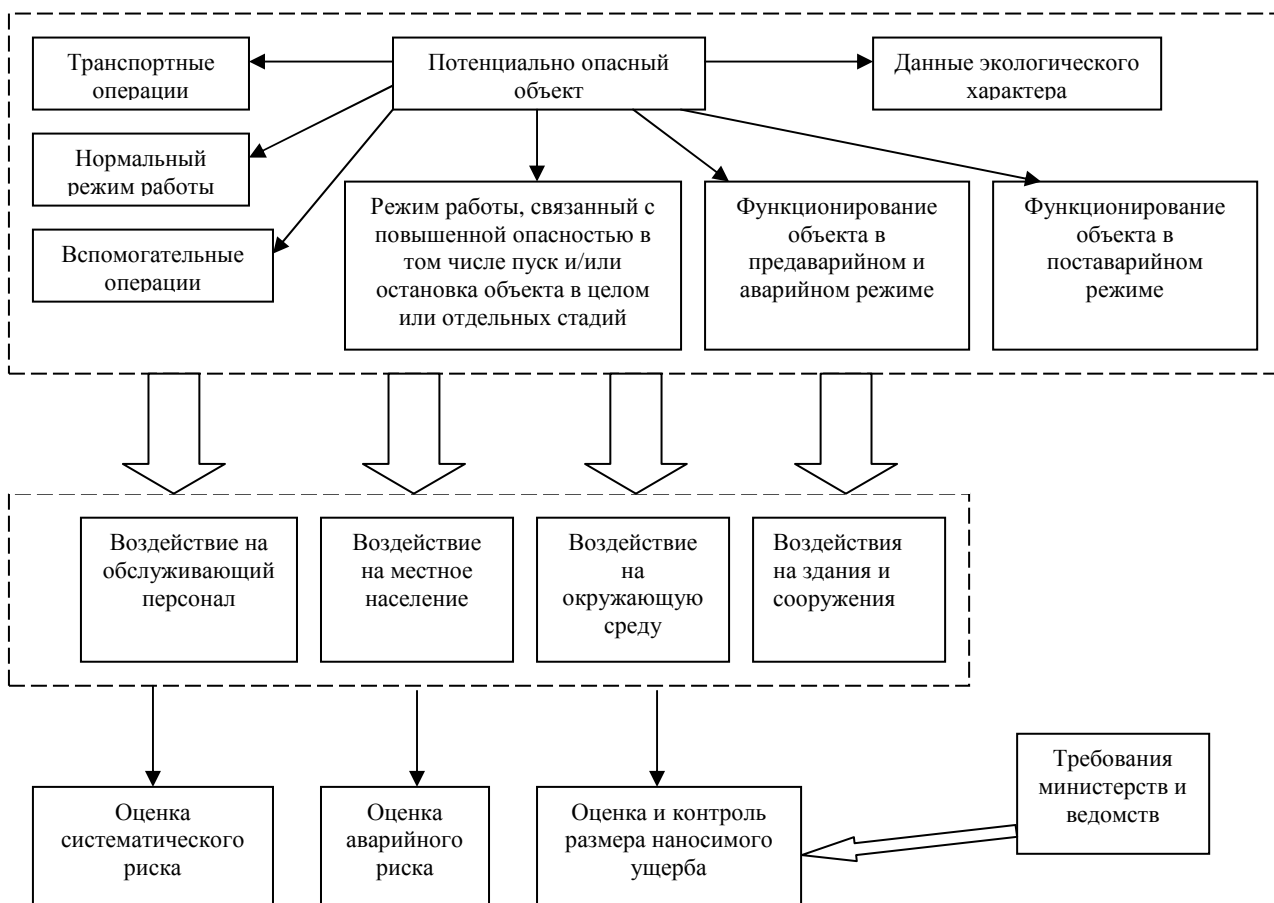


Рис.2. Система организации техногенной безопасности

нормальный режим работы (все контролируемые параметры находятся в заданном диапазоне значений); режим работы с повышенной опасностью (некоторые из контролируемых параметров вышли за заданный диапазон значений); функционирование в предаварийном и аварийном режиме (некоторые из параметров вышли за диапазон допустимых значений, но объект не может мгновенно остановить работу, т.е. он какое-то время функционирует в предаварийном режиме, если же авария произошла, то в этом случае, объект в течение некоторого промежутка времени продолжает

свое функционирование; функционирование объекта в поставарийном режиме (иногда объект может продолжить свое функционирование после аварии).

Во всех режимах функционирования объект может оказывать воздействие на персонал, местное население, проживающее вблизи расположения объекта, окружающую среду, здания и сооружения.

Риск подобного негативного воздействия необходимо оценивать с двух позиций: периодическая оценка систематического риска, возникающего в результате длительного или периодического воздействия токсичных химических веществ и других потенциально опасных веществ, обращающихся на объекте; анализ аварийного риска. Необходимо также оценивать и контролировать реальный ущерб, наносимый объектом здоровью человека и окружающей среде, зданиям и сооружениям. Исходя из вышесказанного, может быть сформирован алгоритм управления технологической безопасностью объекта повышенной опасности, состоящий из трех частей: анализа надежности оборудования; оценка и прогнозирование опасности (риска); анализа и управления документацией, имеющей отношение к обеспечению технической безопасности на объекте (рис.3).

Особое место при проведении оценки и прогнозирования риска занимает процедура анализа аварийных и нештатных ситуаций на объекте, которые рассматриваются отдельно.

Эффективное управление технологической безопасностью невозможно без анализа технической документации по безопасности. Подобный анализ позволит: своевременно учитывать постоянно происходящие изменения в законодательстве; иметь полное представление о тех документах, которые должны быть на объекте повышенной опасности; иметь представление о качестве информации, содержащейся в том или ином документе; быстро собрать всю необходимую информацию при проведении экспертизы или составления отчета по безопасности; оперативно проинформировать заинтересованных лиц и организаций.



Рис. 3. Блок-схема управления технической безопасностью.

Все хранящиеся в базе данных документы предполагается разбить на следующие группы (рис. 4), причем один и тот же документ может числиться



одновременно в нескольких группах: законодательная документация (законы, акты, постановления, официальные методики и руководящие документы и т.п.).

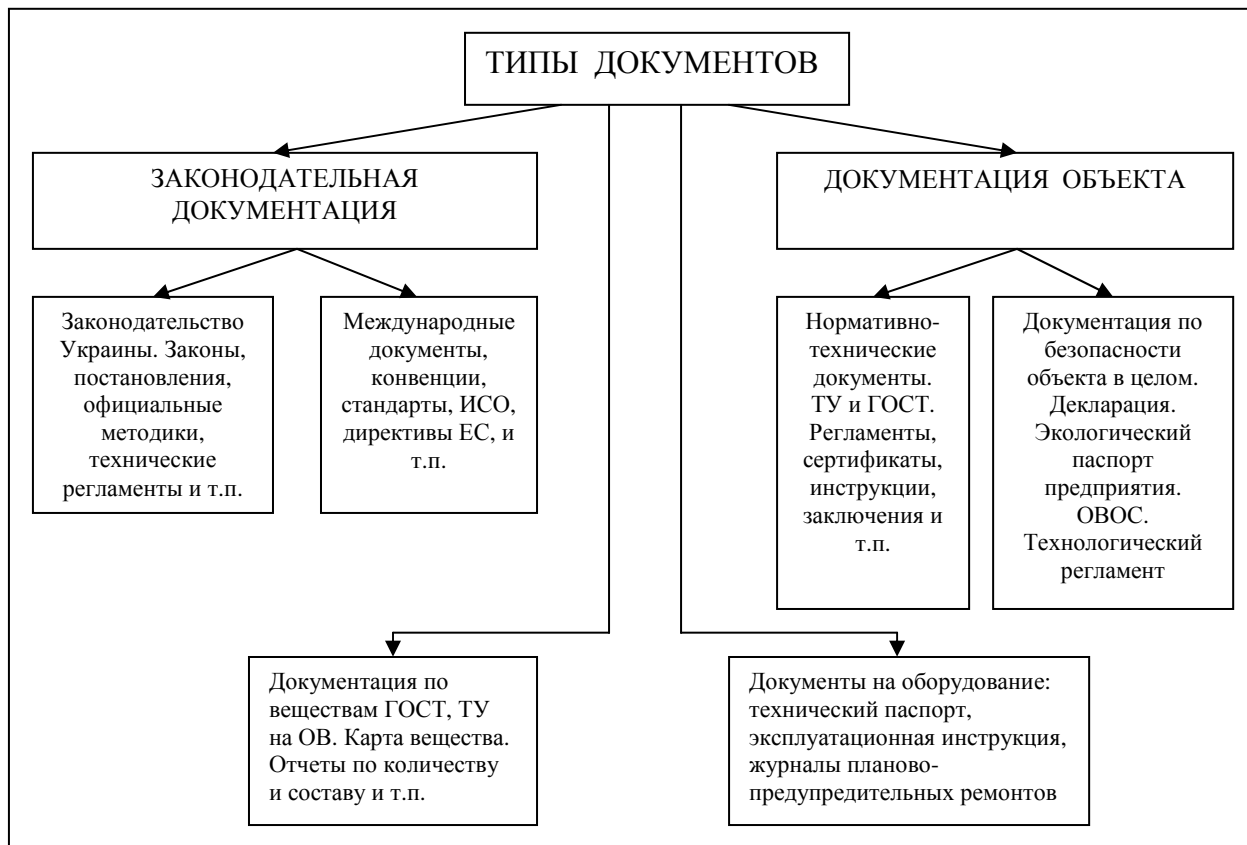


Рис. 4. Основные типы документов по анализу технической безопасности объекта

Помимо Украинских документов в данную группу целесообразно также включить и международные документы, имеющие непосредственное отношение к сфере деятельности предприятия; документация на объекте – план локализации и ликвидации аварийных ситуаций и аварий, уведомление о результатах идентификации объектов повышенной опасности, декларация безопасности объекта повышенной опасности, экологический паспорт предприятия, ОВОС, технологический регламент и т.п. и нормативно-техническая документация: ТУ, ГОСТы, регламенты, сертификаты, инструкции, заключения и т.п.; документы на оборудование (протоколы

испытаний, наладки оборудования, технический паспорт, эксплуатационные инструкции, оперативные схемы для электрооборудования, журналы планово-предупредительных ремонтов и т.п.); документация по веществам (ГОСТы, ТУ на вещества, реакционные массы, продукты и полупродукты, карты веществ, отчеты по количеству и составу веществ и т.п.).

Перечисленные выше обстоятельства требуют разработки эффективных методов анализа и оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных промышленных объектах, прогнозирования и оценки тяжести их последствий с целью повышения безопасности промышленных производств.

Для обеспечения промышленной и экологической безопасности производств можно предложить иерархическую структуру объекта анализа и управления безопасностью: производство – окружающая среда, которая представлена на рис.5.

Задачами обеспечения промышленной безопасности на нижнем уровне иерархии технологических процессов являются: мониторинг состояния технологических процессов, диагностика неисправностей, анализ производственных опасностей и причин их возникновения и управление технологическими процессами с целью предотвращения возникновения отказов и их развития в аварийные ситуации. На среднем уровне иерархии – технологической системы решаются задачи определения факторов риска, анализа и оценки риска. Прогнозирования последствий аварий и управления безопасностью с целью локализации аварийной ситуации. На верхнем уровне иерархии – производство рассматривается как объект техногенной опасности для человека и окружающей природной среды.

Задачами промышленной безопасности являются: оперативное управление безопасностью по локализации и ликвидации последствий аварий и оценки ущербов для населения и окружающей среды, принятие долгосрочных управляющих решений по повышению безопасности на стадиях реконструкции и проектирования.

Для решения экологической безопасности производств на нижнем уровне иерархии рассматриваются две группы источников опасности:

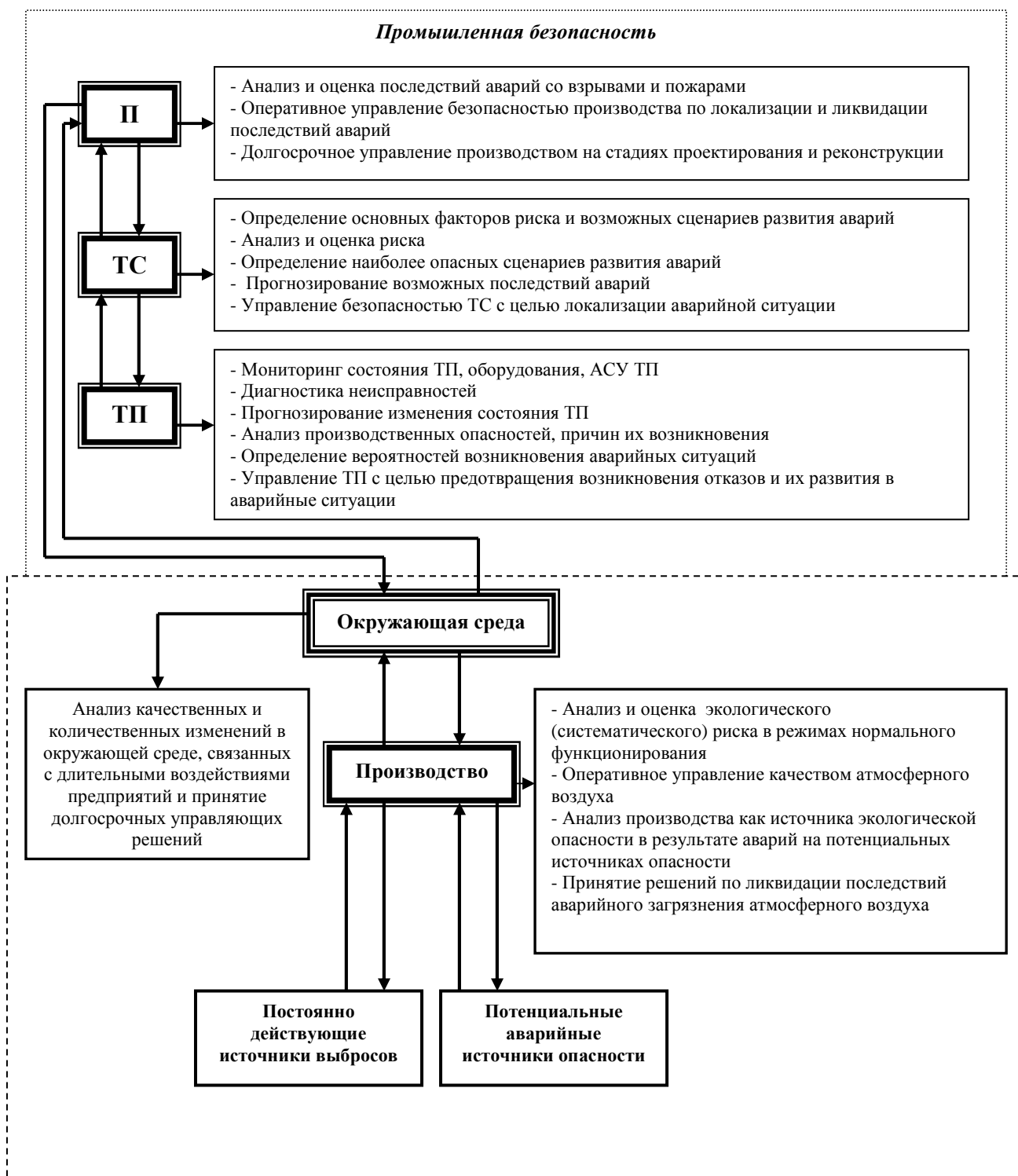


Рис. 5. Иерархическая структура объекта управления безопасностью: производство – окружающая среда (П – производство, ТС – технологическая система, ТП – технологический процесс)

постоянно действующие как источники систематических негативных воздействий и потенциальные аварийные источники экологической опасности. На среднем уровне рассматривается производство как объект техногенной и экологической опасности в режимах нормального функционирования, в результате аварий и длительных негативных воздействий. На верхнем уровне иерархии рассматриваются качественные и количественные изменения в окружающей среде, связанные с негативными воздействиями предприятий.

Целью данного издания являются систематизация и обобщение материала по моделям оценки физико-химических параметров последствий аварий на промышленных объектах, а также по проблеме анализа и оценке риска и управления безопасностью промышленных объектов.

## **Часть 1. ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СИТУАЦИИ: МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ**

### **1.1. Общая характеристика кризисных ситуаций**

Опираясь на уже сформулированные концепции кризисов, укажем, что под кризисом понимают резкий, крутой перелом в чем-нибудь, тяжелое переломное состояние, безвыходное положение.

Термин "кризис" происходит от греческого "krisis", что означает решение, поворотный пункт. Традиционно термин "кризис" использовали в медицинской терминологии, где он означал ту поворотную точку в течение болезни, после которой больной или умирал, или выздоравливал. В более широком смысле понятие "кризис" ассоциируется с быстрым, нередко непредвиденным изменением ситуации, если контроль за ней со стороны человека ограничен, а нерешение проблемы может привести к экстремальной ситуации /7/ (Таблица 1.1).

Таким образом, кризис - резкое изменение обычного состояния вещей; слом, обострение положения; переломный момент, после которого состояние или улучшается, или ухудшается.

В общем случае кризисы (социальные) ассоциируют с кризисами экономическими, что периодически наступают как явление спада производства и ведут к разорению мелких производителей и усилению безработицы. В этом контексте выделяют также промышленные, аграрные, структурные, технологические и т.п. кризисы, а также понятие политического кризиса: обострение политического положения, которое тянет за собою, как правило, падение и изменение кабинета министров в парламентских странах (так называемый правительственный кризис).

С понятием кризиса тесно связана категория угрозы - возможность или неизбежность возникновения чего-то опасного, тяжелого.

Таблица 1.1

Основные концепции причин кризисов, пути их преодоления

Название теории	Автор	Пояснение причин кризиса	Пути преодоления кризиса
Теория катастроф	И. Стюарт, В. Арнольд, Т. Постон.	Кризис вызывает природные и социальные катастрофы	Прогнозирование катастроф, разработка мероприятий для преодоления кризиса
Теория циклов	К. Маркс, Дж. Девис, Дж. Тьорнер, А. Тоффлер.	Кризис - как фаза в циклическом развитии	Расчёт продолжительности цикла, разработка способов для преодоления последствий
Теория систем	А. Богданов, Г. Хакен, Л. Берталанифи.	Кризис объясняется необходимостью перестроением системы	Структурно-функциональная перестройка системы
Иновационная теория	П. Друкер, Й. Шумпетер, Дж. Глейберт, И. Пригожин.	Кризис объясняется недостатком нововведений или увеличением их количества, но недостаточным использованием	Поддержание постоянного "тонуса" нововведений, сокращение сроков их освоения, обновление системы
Теория элит	М. Вебер, В. Парето.	Кризис, вызванный ошибками старой элиты и необходимостью её замены	Подготовка новой элиты, и своевременная её смена
Теория анти-кризисного управления	Р. Акофф, Е. Уткин, В. Клаус, Ю. Лютман.	Кризис, обусловленный неэффективностью управления	Реформирование системы путём её ориентации на антикризисное управление
Психологическая теория	Р. Мертон, Т. Парсонс, Ф. Хайек.	Кризис возникает в сознании людей	Разработка новой системы ценностей, парадигм, норм, психологии и соответственной подготовки персонала
Теория ноосферы	В. Вернадский.	Вторжение человека в ноосферу	Преодоление экологических и техногенных угроз
Теория "длинных волн"	М. Кондратьев	Смена технологической базы	Ускорение научно-технического процесса
Теория этногенеза	Л. Гумилёв.	Специфические фазы: перегрев, надлом, надлом, распад.	Предвидение и уменьшение угрозы этногенезу
Теория циклов солнечной активности	А. Чижевский.	Максимум солнечной активности вызывает угрозу	Мероприятия для уменьшения воздействия космоса

В юридическом плане угроза выступает, как высказанное в любой форме намерение нанесения физического, материального или другого вреда общественным или личным интересам. Опаснейшие виды угроз (убийство, тяжелых телесных повреждений или уничтожения имущества) относят к специальным составам преступлений и наказываются в криминальном порядке.

С предшествующими рассуждениями тесно связано понятие риска, то есть осознанной возможности опасности, а также термин "чрезвычайное состояние" как непредвиденный, вызванный определенной необходимостью. Исследователи кризисных явлений различают такие признаки кризиса, которых, по их мнению, достаточно, чтобы в полной мере охарактеризовать его, а именно:

кризис - это переломный пункт хода событий, угроза предшествующим целям и ценностям;

- создание ситуации, при которой большое значение имеет неотложность и срочность действий;

- трудный характер последствий для задействованных в нем участников;

- неопределенность оценки ситуации и разработка необходимых мер по преодолению кризиса;

- снижение контроля над событиями и их влиянием, ограничение времени на реакцию к минимуму;

- недостаточность информации, имеющейся у участников;

- коренное изменение отношений между участниками, повышение напряженности, в особенности в политических кризисах - наличие событий, которые создают новые условия для достижения успеха.

Кризисные явления важно рассматривать как в макро-, так и в микро-средах. Кризис - это процесс, а не статическое состояние, ведь нормальное развитие может иметь отклонение, которое способно быстро привести к ошибочному, нежелательному результату и поставить под угрозу направление деятельности. Такие отклонения обусловлены действием

определенных рисков. Например, риск в финансово-хозяйственной деятельности, риски- региональный, природный, политический, законодательный, организационный, личностный, инвестиционный, кредитный, валютный, финансовый, производственный, маркетинговый, расчетный, имущественный, транспортный и т.п. Если ошибочное решение выявлено своевременно, можно адекватно корректировать курс на нормальное развитие, а для этого нужно четкое знание процесса кризиса и этапы его хода.

В общем, понимании кризис составляет ограниченный во времени процесс, которым можно руководить, удерживать его в определенных границах, учитывая, в частности, влияние внутренних и внешних факторов. Кризисные процессы зависят от структуры, субъектов деятельности, инновационного потенциала, имеют разную продолжительность, интенсивность и разноплановые следствия.

Обычно кризисы развиваются по довольно стандартным сценариям. Всегда существует докризисный период - событие или ряд событий, которые вызывают ощущение угрозы и требуют реакции-ответа. От этого ответа зависит дальнейший ход кризиса, вероятность перерастания его в экстремальную ситуацию.

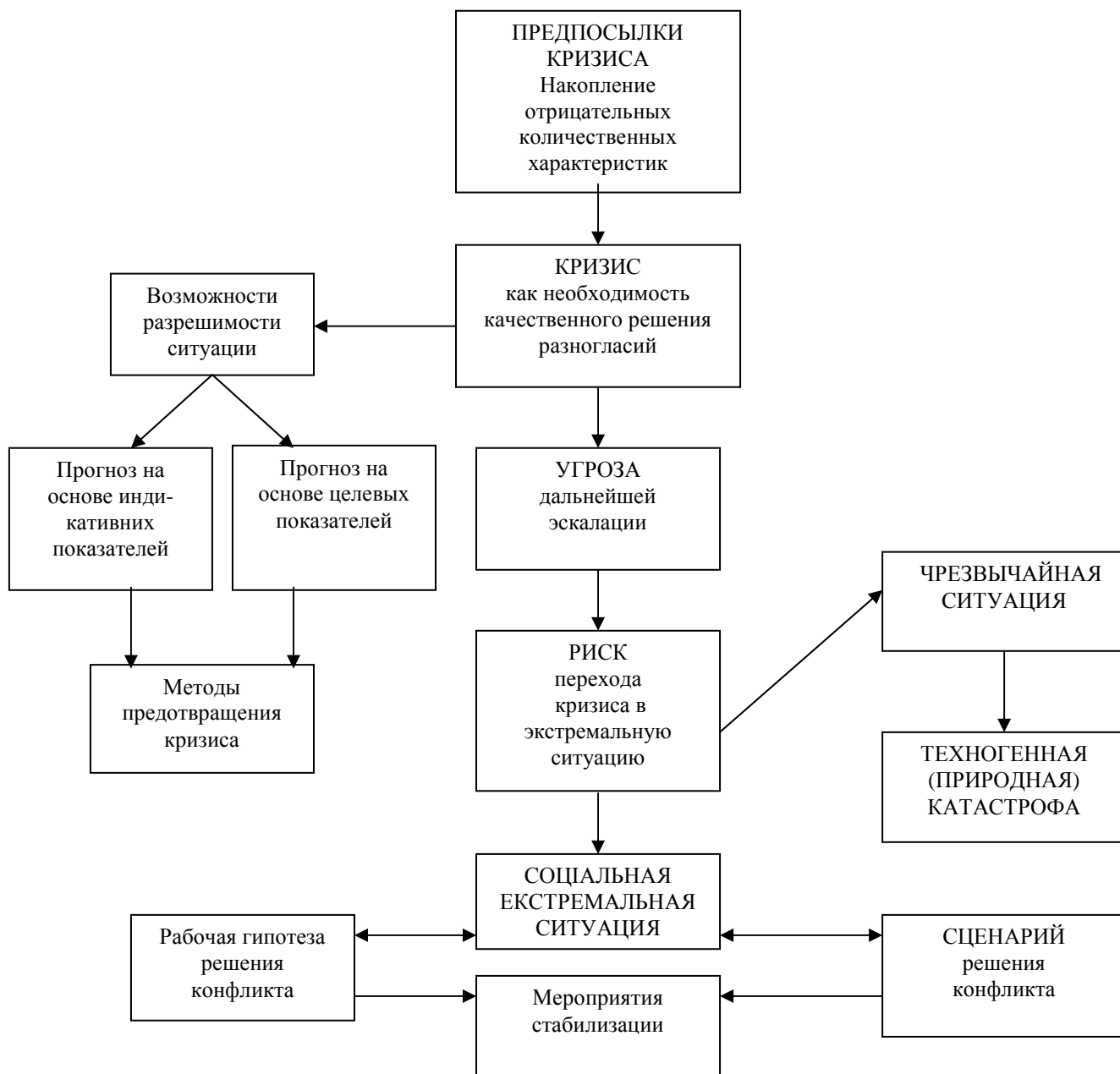
Указанные ситуации, независимо от дальнейшего развития их, имеют определенные общие признаки:

- непредсказуемость событий и явлений;
- экстремальные условия для тех, кто может принимать решение;
- ощущение угрозы, стрессовое состояние, ограниченное время в плане решения проблемы, повышенное ощущение ответственности за будущие последствия принятого решения и т.п.;
- влияние на систему вообще (возрастание напряженности нестабильности).



ЛОГИСТИЧЕСКАЯ СХЕМА

"КРИЗИС > ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СИТУАЦИЯ"



Кризисные ситуации различаются субъективными аспектами: восприятием угрозы для важных общественных ценностей или положения государства в объединении с личными качествами людей, на которые положены принятия решений. Ведь то, что воспринимается как серьезная угроза одними участниками (лидерами), совсем не обязательно воспринимается так же другими.

Таблица 1.2

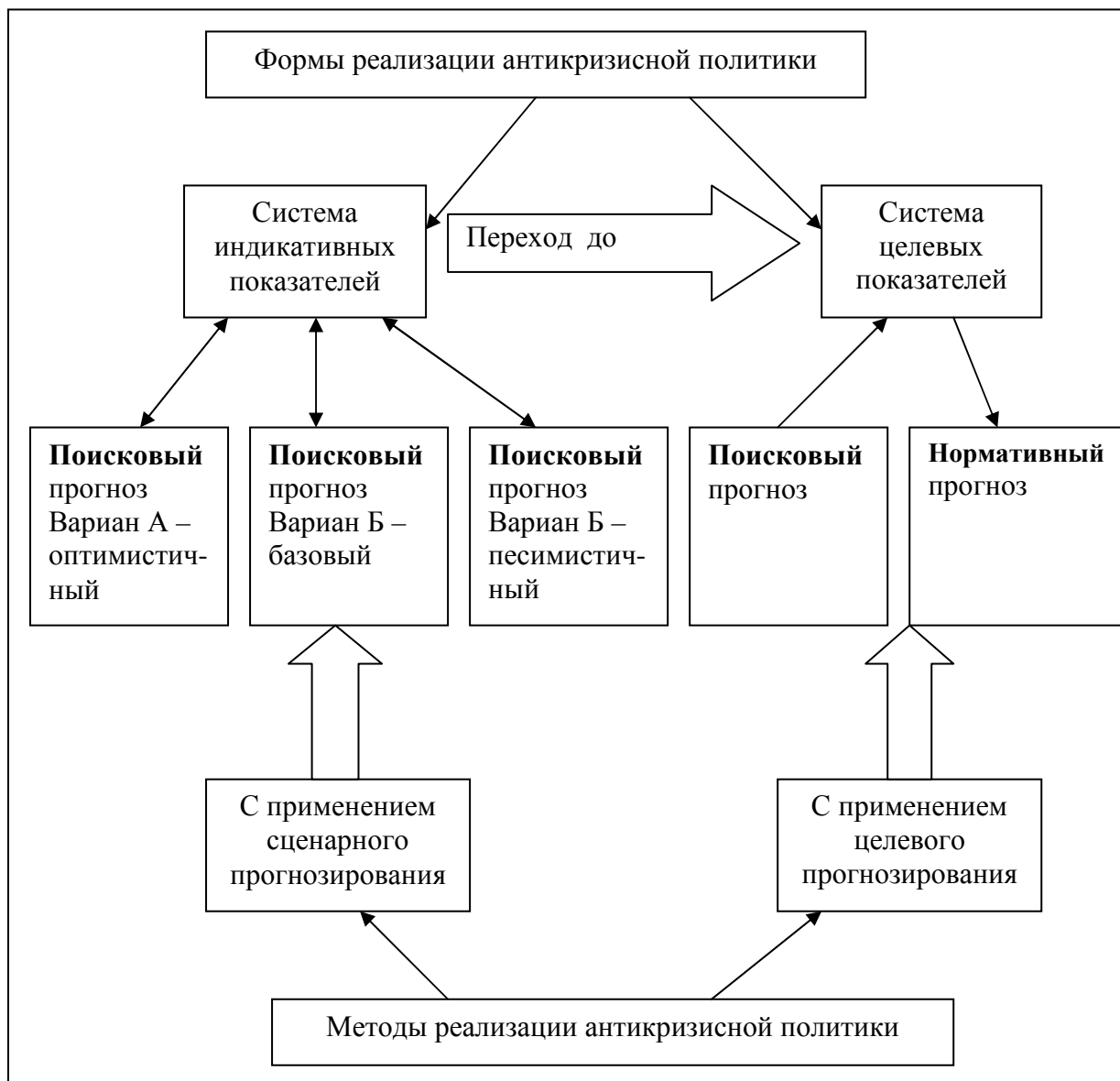
Классификация социальных кризисов и их характеристика

Основные классификации	Характеристика многообразия кризисов
Сфера появления кризиса	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Экономическая: кризис перепроизводства, недопроизводства, финансовая;</li> <li>2. Экологическая: разрушение экологического середовища;</li> <li>3. Социальная: деградация и разрушение социальной структуры и институтов; ухудшение уровня жизни людей;</li> <li>4. Политическая: внешние и внутривнутриполитические кризисы;</li> <li>5. Этническая: кризис политического, экономического, и культурного развития этносов и этнической структуры;</li> <li>6. Кризис культуры: культурная деградация общества, разрушение ценностей и институтов культуры;</li> <li>7. Идеологическая: отсутствие идеи и целей социального развития, замена её суррогатами;</li> <li>8. Духовная, моральная: потеря духовности, деградация морали.</li> </ol>
Масштаб кризиса	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Глобальная: охватывает планетарную цивилизацию;</li> <li>2. Национальная: происходит в масштабах страны, ставит под угрозу национальную безопасность;</li> <li>3. Региональная: происходит в границах региона;</li> <li>4. Локальная: охватывает только отдельные стороны объекта или процесса.</li> </ol>
Охват сторон объекта или процесса	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Моноаспектная: поражает только одну сторону объекта, характеристику, аспект объекта или процесса;</li> <li>2. Полиаспектная: поражает несколько аспектов;</li> <li>3. Комплексная: охватывает все стороны объекта или процесса.</li> </ol>
Продолжительность	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Краткосрочная: происходит за короткие периоды времени;</li> <li>2. Среднесрочная: происходит на протяжении нескольких лет;</li> <li>3. Долгосрочная: происходит на протяжении десятилетий;</li> <li>4. Сверхдолгосрочная: происходит на протяжении столетий и даже тысячелетий.</li> </ol>
Вызывающие факторы	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Внутренний: вызываемая внутренними факторами;</li> <li>2. Внешний: вызываемая взаимодействием с внешней средой;</li> <li>3. Смешанный: вызываемая как внутренними так и внешними характеристиками.</li> </ol>
Характер поражения системы	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Генетическая: появляется в следствии мутации социального наследования;</li> <li>2. Кризис системы: поражение жизненно важных элементов системы;</li> <li>3. Организационная: нарушение организации системы;</li> <li>4. Функциональная: существенные нарушения функционирования системы;</li> <li>5. Структурные: нарушение структуры системы;</li> </ol>
Характер решения	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Взрывная: решается социальным взрывом;</li> <li>2. Угасающая: ведёт к постоянному затуханию колеблющего процесса ;</li> </ol>
Характер действующих причин	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Циклическая: вызвана причинами закономерного циклического характера;</li> <li>2. Случайная: вызванная стихийным бедствием, ошибками, авариями.</li> </ol>
Последствия	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Инновационная: обеспечивает обновление системы;</li> <li>2. Разрушительная: ломает систему и приводит её в забвение;</li> <li>3. Консервативная: консервирует отсталую, устаревшую социальную форму;</li> </ol>

Исследование генетики и динамики явления "кризис - экстремальная ситуация", по нашему мнению, целесообразно осуществлять по такой схеме /7/ (см. схему 1.1).

Схема 1.2

Логистическая схема форм и методов реализации антикризисной политики



По этой формализованной схеме мы будем рассматривать компоненты и динамику исследуемого процесса. Не касаясь классификации социальных кризисов и их характеристик, которые разработанные в научной литературе (Таблица 1.2), необходимо также определить формы и методы реализации антикризисной политики (логистическую систему направлений)

относительно генетики и предотвращения чрезвычайных ситуаций (см. Схему 1.2).

## **1.2. Эскалация кризиса и опасность "перехода" его в экстремальную ситуацию**

В современной науке относительно кризисов разработано несколько концептуальных позиций. Попробуем обобщить их в контексте проблемы, которая исследуется.

Во-первых, кризис рассматривают как закономерное, сформированное на предшествующих этапах состояние развития системы.

Во-вторых, кризис предопределяет ослабление жизненных сил системы, ее неспособность сохранить состояние равновесия, достигать поставленных прежде целей: миссия системы становится декларативной, теряет социальную опору.

В-третьих, кризис является диалектическим единством двух процессов: разрушение и создание. Условно можно выделить три варианта: первый предусматривает доминирование образовательных процессов, второй характеризуется некоторым равновесием разрушения и создания, а третий - доминированием разрушения.

В-четвертых, кризис не является сугубо отрицательным явлением: вообще кризисы имеют прогрессивный характер, несмотря на их болезненность

В-пятых, кризис может создавать весьма благоприятные условия для социальных трансформаций, с одной стороны, и обеспечения преемственности и развития – с другой.

В-шестых, кризис является не только неминуемой, а и необходимой фазой развития системы, которая объединяет не только угасание предшествующего качества системы, а и возникновение новой.

В-седьмых, кризис - это этап перестройки системы, постоянное направление ее за вектором движения к новому качеству, неминуемая фаза обновления.

В-восьмых, кризис - это явление конкретно-историческое, он развивается вместе с цивилизацией.

Если кризисные угрозы своевременно не одолеваются, кризис неминуемо вступает в фазу эскалации, которая, в, частности, требует:

- резкого ослабления и устранения (или качественного преобразования) устаревших элементов господствующей, но которая уже исчерпала свой потенциал, системы;
- проторение пути для утверждения от начала слабых элементов новой системы, будущего цикла;
- испытание на прочность и передачу в наследство тех элементов системы, которые обычно аккумулируются, накапливаются, переходят в будущее (а частично и модифицируются). Рассматривая современные кризисные и антикризисные теории, исходим из таких важных положений. Прежде всего, причины кризисов разнообразны и взаимосвязанные. Существует известная корреляция между причинами кризиса и способами его преодоления. Неважно, какие причины обусловили кризис, он составляет объективное явление, которое развивается в пространстве и во времени и не может быть преодолено сразу.

Структура кризиса состоит из совокупности ситуаций, которые возникают вследствие действия разных факторов: разрушение, падение, торможение, активизации, обновление, возрастание.

Если кризис системы достигает "дна", перед людьми возникает проблема жесткого выбора. По мнению Ю. Плотинского /8/, существует три варианта решения такого кризиса:

- распад или гибель системы (ее элементы захватывают другие системы);
- реформа: постепенная перестройка ядра, "генотипа" системы, которая ведет к возникновению качественно новой системы;

- революция: резкое, скачкообразное изменение ядра системы, катастрофический переход от одного состояния системы к другому.

Современный кризис украинского социума подтверждает эти положения кризологии. На наш взгляд, в этом контексте целесообразно отметить несколько особенностей этого кризиса.

Во-первых, это комплексный кризис, как по охвату сфер общественной жизни, так и по способам его проявления. В ряде регионов страны он протекает сложно и мучительно. По времени хода это нормальный средневековой кризис. А по характеру поражения системы – общий кризис, так как затронул все ее элементы - от "генотипа" к структурно-функциональным параметрам. По характеру решения он является завершающим, а по последствиям - инновационным.

Во-вторых, этот кризис обусловлен резким истощением ресурсов для необходимого структурного преобразования общества, обеспечение мощного потока инноваций. Кроме того, дальнейшая жизнь на "дне" интенсивно высасывает все "соки" социума - экономические, социокультурные и т.п.

В-третьих, кризис в Украине представляет собой, в сущности, наложение нескольких видов кризиса, которые соединились во времени. Это, в частности такие наиболее значимые разновидности кризисов:

- кризис формально-цивилизационный, что составляет кризис индустриально-аграрного общества, причем выход из него может обеспечить переход Украины к постиндустриальному, а со временем и информационному этапу;
- кризис авторитарно-патерналистского общества, его нерыночной экономики и распределительной системы, неразвитости стимулов и демократических форм жизни;
- кризис традиционализма во всех сферах жизнедеятельности, неспособность общества к обновлению;
- демографический кризис с высокой смертностью и низкой рождаемостью;

- этнический кризис, который дает себя знать в ослаблении социокультурных, языковых и других характеристик титулованных и других этносов Украины;
- экологический кризис, который разрушает уникальные природные системы Украины и среду существования человека;
- кризис системы моральных ценностей (общественных и личностных).

Кризис украинского общества в значительной мере является транзитивным. Его глубина, масштаб и продолжительность определяются не только реальным состоянием социума, а и теми целями, которые формулируются для преодоления кризиса.

Поведение людей в кризисных ситуациях разных эпох характеризовалось разными парадигмами. Человек первоначального общества, который имел очень слабую социальную организацию, выживал по принципу: "Спасайся, кто может!". С развитием средств работы и социальной организации утвердился более прогрессивный принцип: "Спасайтесь вместе". Современное общество предлагает более сложную парадигму: "Не допустим кризиса, а если он случится, то спасемся с помощью современных технологий".

Антикризисные технологии начали развиваться в сфере антикризисного менеджмента. Их можно распределить на две группы: профилактика кризисных процессов (см. Схему 1.3), а если кризис состоялся - технологии выхода из кризиса (см. Схему 1.4). Назначение их состоит в том, чтобы обнаружить кризисные процессы и ликвидировать их.

Реализация антикризисных технологий при условиях конкретного социума предусматривает наличие нескольких важных условий:

- а) гражданский мир и согласие, стремление консолидации, развитие партнерства между разными социальными и политическими силами (причем только что начинает возрастать социальная напряженность, сразу усиливаются деструктивные процессы);

Схема 1.3  
Профилактика кризисных явлений

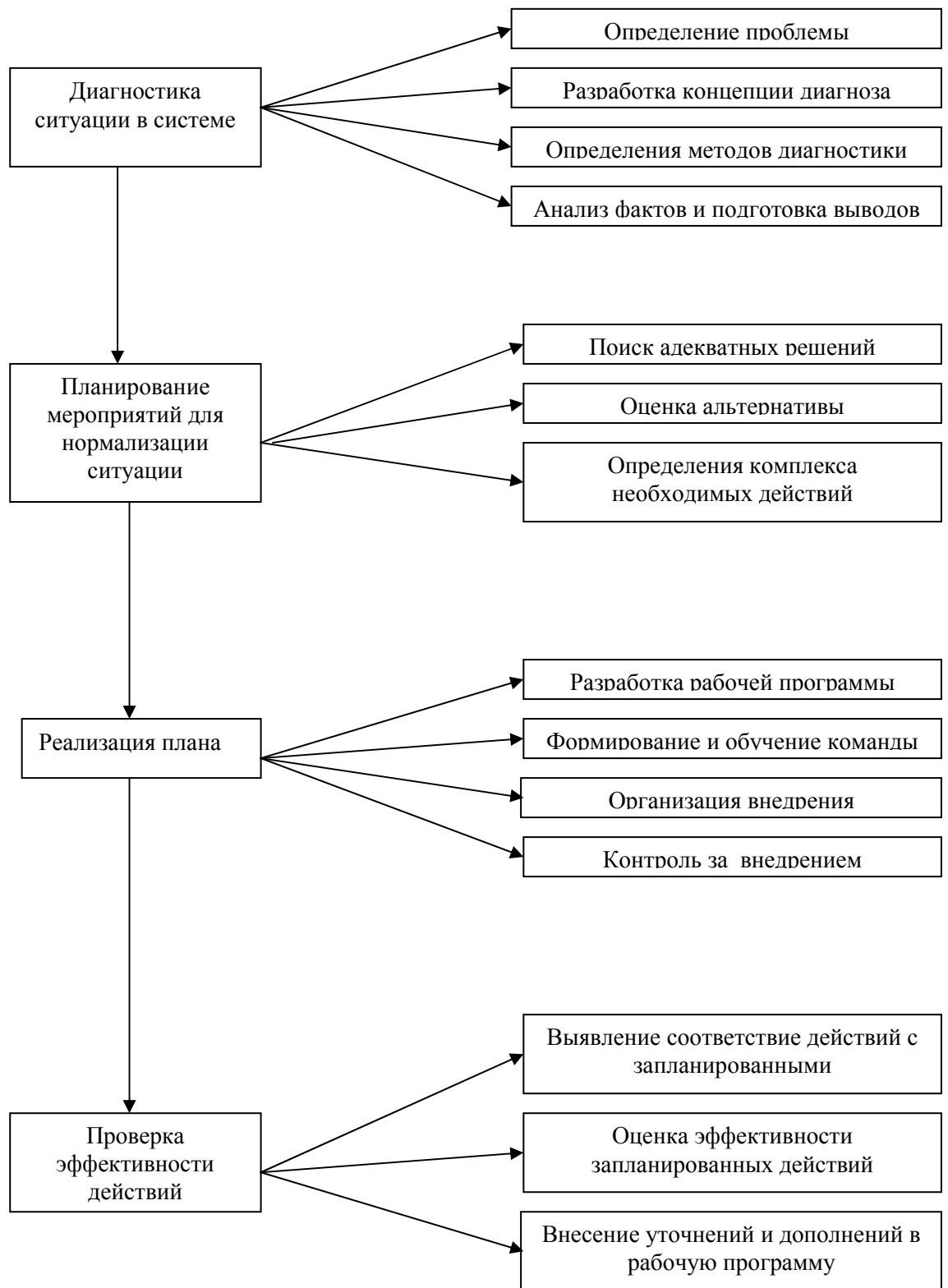
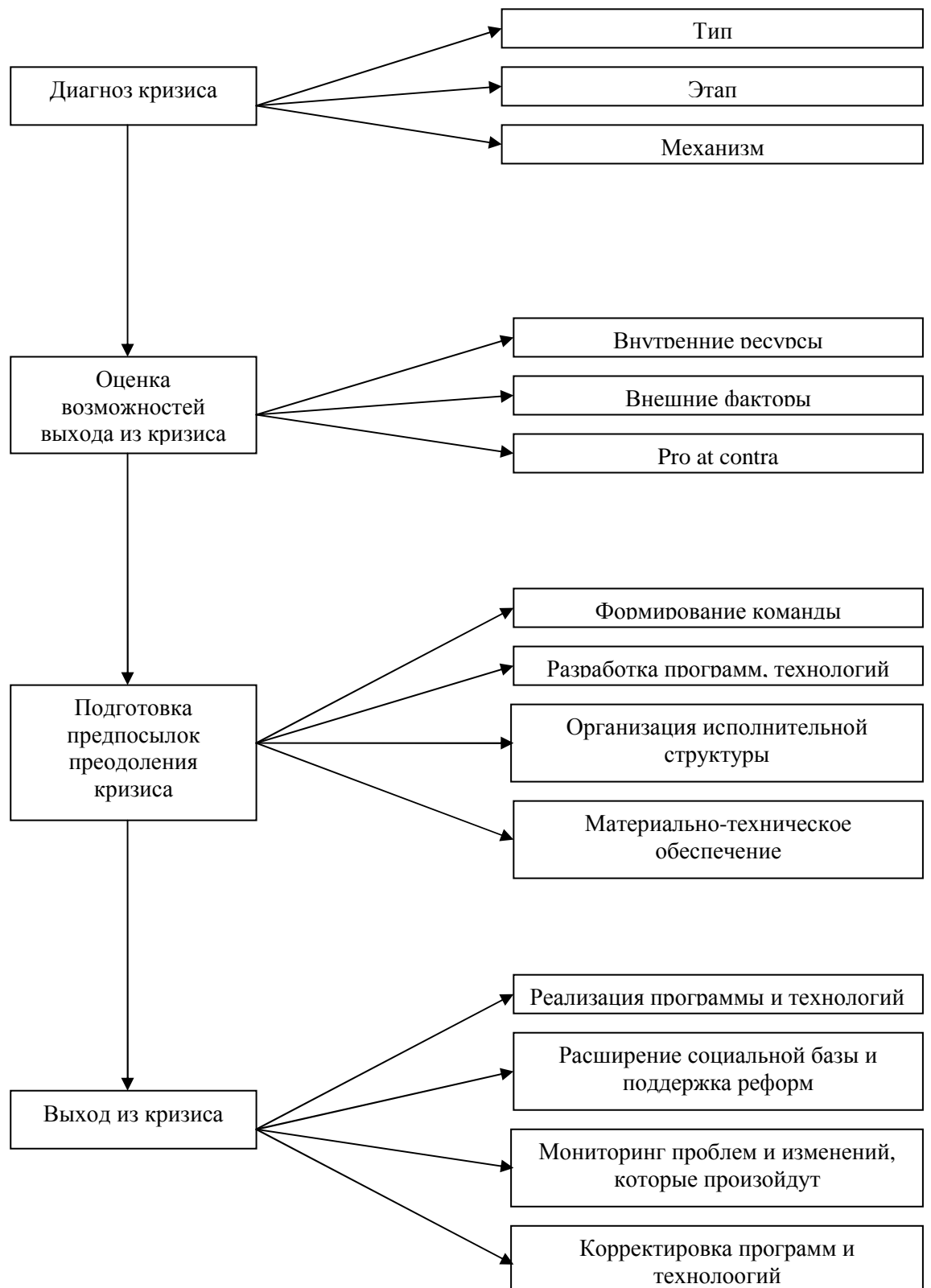




Схема 1.4  
Преодоление кризиса



- b) высокий интеллектуально-моральный потенциал элиты, который предусматривает способность ее выдержать тяжелое испытание, понять сущность кризиса и выработать средства на его преодоление;
- c) необходимая политическая культура и воля, самоорганизованность в процессе разработки целей и программ деятельности;
- d) способность элиты помочь людям осознать свои интересы и возможности, создать ячейки обновления, привлечь к положительным синергетичным процессам.

Кризис, как и каждая социальная угроза, - это "учитель", что дает установки и мобилизует людей, заставляет их действовать конструктивно, вдохновляет на реализацию эффективных антикризисных технологий.

### **1.3. Общественные трансформации и пути предотвращения кризисных и экстремальных ситуаций**

Аксиомой исследований современного развития украинского социума является анализ процессов его трансформации. Большинство авторов рассматривают ее как состояние общества, которое находится в процессе модификации, с динамической структурой, которая коренным образом изменяется. Причем трансформационные изменения испытывает не только социум в целом, а и каждая личность. И если для одних этот трансформационный сдвиг адекватен личной трагедии, потере личностных ценностей и обычного способа и стиля жизни, то другие воспринимают их как естественное состояние развития, которое отвечает их интересам и потребностям. В этом контексте следует сделать хотя бы такие предостережения в плане предотвращения угрозы социальной напряженности, которые касаются нравственно-психологического фактора.

В идеологии современного украинского общества, если освободить ее от политических наслоений, воцарился лозунг "Обогащайтесь!" (по крайней

мере, на бытовом уровне). Не обращаясь к историческим аналогиям (бухаринского призыва эпохи НЭПА), не тяжело заметить, что такой подход могут реализовать 5-10% граждан, которые имеют соответствующие способности и склонности. Для подавляющего большинства граждан это невыполнимая химера, которая приводит к тяжелейшему личному кризису с такими симптомами, как апатия, отчаяние, зависть, распад личности, алкоголизм, наркомания и т.п.. Об этом свидетельствует, в частности, история "трастов", которые превратились в трагедию для миллионов "добровольно надутых". Реалии дикого капитализма и первичного накопления на постсоветском пространстве пока ожидают обобщений шекспировского масштаба.

Не удивительно, что такое разочарование служит "горючим" для социальных конфликтов, возрастание недовольства масс нельзя "гасить" силовыми методами в обществе, которое проповедует демократические ценности. Поэтому некоторые социологи (в частности, С.Л. Катаев) выдвинули тезис (который, впрочем, звучит весьма цинично) о формировании "культуры бедности".

Не разделяя такой постановки проблемы в целом, следовало бы взвесить на отдельные составляющие такого подхода и выдвижения соответствующих целей:

- 1) формировать самоограничение в потребностях и выживании, выработать привычки по принципу: хочу только то, что могу, что снимает стресс недовольных желаний;
- 2) блокировать такие отрицательные ощущения, как зависть; имущественная дифференциация усиливается, поэтому есть больше оснований для сопоставления возможностей богатых и бедных. Без преодоления социальной зависти невозможно существование стабильного общества;
- 3) переориентировать потребности в духовную сферу: углубление и распространение духовных запросов обогащает жизнь, компенсирует ощущение его неполноты через материальные ограничения.

Следует согласиться с утверждением СЛ. Катаева, который считает, что решение проблем бедности можно осуществлять тремя способами. Во-первых, надо предъявлять требования к власти и работодателям об увеличении зарплаты и улучшении условий существования. Но на этом пути есть ограничение, вызванные возможностями государства или предприятия. Существуют также ограничения социально-политического характера, которые дают возможность равного распределения (опасность уравниловки). Второй путь предусматривает настойчивую работу, собственные усилия для достижения богатства и повышение квалификации. Учитывая общие условия и экономические возможности страны, совсем незначительное количество граждан может обеспечить себе условия терпимого существования. Люди могут меняться, но обобщенная сумма материальных средств остается неизменной. В конце концов, третий путь - трансформация собственных потребностей, формирование "культуры бедности". Конечно, каждый может избирать свой способ выхода из бедности". Можно впасть в отчаяние, переживать невыносимые страдания от неудачной жизни, проклинать судьбу, родителей, которые не создали необходимых стартовых возможностей. А можно выходить из имеющихся условий и находить компенсаторные механизмы сохранения положительного восприятия действительности.

Трансформация в развитых странах преимущественно рассматривается не в макросоциальных измерениях, а связывается с микро-социальными процессами, с изменениями в религии, личных ценностях и взглядах на жизнь. Человек старается выйти за пределы реального, измениться, достичь личностной трансформации и тем самым изменять мир. Изменить мир, изменяя себя - модель трансформации, распространенная на Западе. В нашей стране преобладает другая модель: изменить мир, изменяя, прежде всего, внешние условия существования. Этот путь лишь усиливает страдание. В этом случае мир возникает таким, что принуждает человека изменяться против его воли, поэтому это воспринимается как насилие.

Считаем, что на этом пути следует не противопоставлять разные подходы, а органически (в границах возможного и целесообразного) объединять их. При этом непременно будет возрастать роль "культурного императива".

В этом контексте мы целиком разделяем мнение М. Жулинского, который "без системных инвестиций в человека, его творческий, научный, интеллектуальный и инновационный потенциал довольно надеяться на серьезные сдвиги в социально-политической трансформации украинского общества.

Реализовать "человек в центре" модель развития украинского общества можно и необходимо, а для этого следует сделать гуманитарную политику приоритетной в государстве. Итак, главным источником, основой и критерием развития современного общества и государства должны быть культура, наука, образование. Необходимо сформировать новые подходы к политике в этих сферах. Почему именно такой акцент делается на культуру и духовность? Прежде всего, потому, что культура в условиях глобализации является основным фактором консолидации украинского общества, гражданского единения и согласия.

В предложении формирования "культурного императива" демократические программы преобразования неминуемо повиснут без формирования среднего класса - и с точки зрения экономического возрастания - развития внутреннего рынка, и со стороны развития представительной демократии. До этого вывода доходят ведущие исследователи украинского социума. Так, А. Гальчинский в статье принципиально стратегического характера "Десять лет - что дальше?", рассматривая проблемы формирования структуры украинского социума, утверждает: "... как выясняется, развитие направляется, в сущности, в обратном от цивилизационного прогресса направлении. Избранная модель реформ оказалась губительной для становления среднего класса. Мы во всякое время говорим о демократизации, формировании основ гражданского

общества, забывая, что определяющим условием для них есть формирование достаточно стойкой среды среднего класса. По большому счету, развитие гражданского общества и формирования среднего класса - это идентичные процессы. Эффективный внутренний рынок и достаточные для экономического возрастания накопления - этот тоже средний класс. Даже проблема бедности, декларации, по поводу преодоления которой все больше превращаются в политическую моду, не имеет решений вне осмысления политики формирования среднего класса..., дифференциация доходов населения уже давно переступила допустимые (с точки зрения международных стандартов) границы. В конечном итоге речь идет об естественном результате: мы построили капитализм "для своих", и вполне естественно, что его результаты в возрастающей пропорции присваиваются и будут присваиваться в будущем этими "своими" /11/.

Не касаясь других аспектов этой актуальной проблемы, укажем, что углубляется глубокий разрыв между сугубо политическими аспектами демократии и ее экономическим содержанием, что неминуемо приводит к утверждению особой разновидности ее - представительной демократии элитарного типа, ее признака: с одной стороны - неравномерное распределение политического ресурса и опасное политическое неравенство, с другой - фактическая приватизация отдельными группами политиков учреждений политической власти, в том числе учреждений парламентаризма и местного самоуправления. На этой основе прогрессирует девальвация идей представительной демократии, падение доверия граждан к его ценностям.

Теперь инвестиции в культуру, науку и образование должны стать неременной составной стратегии бизнеса. Так, шведский профессор Л. Олауссон утверждает, что университетская реформа "внедрила в сферу высшего образования и научных исследований жесткую экономическую идеологию ... в основе которой лежит модель идеального рынка. "Студент, - по его словам, - является потребителем, а преподаватель - продавцом. Исследователи в новой системе должны стать своего рода

предпринимателями". Научно-технический прогресс, который изменил основы функционирования экономики, активно содействуя ее глобализации, привел к тому, что человеческий ресурс стал главным параметром конкурентоспособности предпринимательских структур. Образование и подготовка кадров становятся постоянной составной стратегией корпораций. Объективные условия в процессе возрастающей глобализации заставляют деловые круги все более активно вмешиваться в сферу образования и ставить свои требования. Так, в докладе "Образование и компетентность в Европе", опубликованной "Круглым столом" европейских промышленников, подчеркивалось, что промышленные корпорации рассматривают образование и подготовку кадров как стратегические инвестиции, жизненно важные для их будущего процветания.

Представители бизнеса исходят из того, что происходит формирование мирового рынка информации, которая предоставляет научные и образовательные услуги, поэтому "ответственность за образование следует положить на предпринимательские структуры". В результате компании начали активно создавать собственные учебные заведения, так называемые корпоративные университеты. В первую очередь корпоративные университеты начали основывать ТНК, инвестируя в разных странах свой капитал и местные кадры, требуя подготовки специалистов соответствующих единым нормам и стандартам. Так, ныне только в США существует свыше 100 корпоративных университетов. По данным "Corporate university exchange" (американской консультативной группы), что изучает проблемы корпоративных университетов, за последние 15 лет число их в мире возросло с 400 до 2 тысяч, а в конце следующего десятилетия количество их может достичь 4 тысяч".

Вместе с тем у антиглобалистов возрастает сопротивление такому либеральному подходу в образовании. Они считают, что транснациональные корпорации угрожают национальным системам образования, которое ограничивает права граждан на свободный доступ к образованию. Они

выступают против усиления утилитарного подхода к образованию и выхолащивания духовности, отстаивая идеи просвещения и гуманистические идеалы.

Изложенное выше требует остановиться на характеристике опасностей, которые возникают как следствия информационного взрыва на границе тысячелетий.

#### **1.4. Информационная революция: глобализационные угрозы**

Глобализация как глубинный мировой процесс коренным образом корректирует всю систему международных отношений и имеет в своей основе информационную революцию. Этот феномен современного цивилизационного развития ускоряет его динамику и, переплетаясь с другими процессами, открывает новые возможности и генерирует стимулы структурных сдвигов в экономической, политической, социокультурной, военной, экологической сферах.

При современных условиях "информация в разных видах и формах становится важнейшим производственным ресурсом, который дает возможность экономить все другие виды ресурсов, а стремительный рост технических возможностей информационно-компьютерных технологий, систем и сетей является главным катализатором быстрого развития и широкого внедрения в разные области экономики наукоемких, экологически опасных энергосберегающих и ресурсосберегающих технологий".

Таким образом, объемы и глубина исследований этих глобальных процессов приобретают характер снежного кома, которые становятся стержневым компонентом информационной безопасности, составной таких многокомпонентных категорий, как "международная безопасность", "национальная безопасность", "национальные интересы" и т.п. Поскольку при современных условиях каналы, сети и системы информации и коммуникации становятся в главном смысле "нервной" и "сердечно-



сосудистой" системой общества, то "сбои" в них как на международном, так и на национальном уровне создают новые по характеру угрозы, риски и экстремальные ситуации.

Не случайно такая супердержава, как США рассматривает глобализацию в сфере информации и коммуникации как краеугольный камень внешней политики. "Для США главной целью внешней политики информационной поры может быть победа в битве мировых информационных потоков, доминирование над радиоволнами, как когда-то Большая Британия правила морями". Американский политик Д. Роткопф /12/, который исповедует идею мирового культурного господства США, отмечает, что они доминируют в глобальном движении информации и идей: "Американская музыка, американские фильмы, американское телевидение, американский софтвер являются настолько доминирующими, можно сказать, повсеместно на Земле. Они влияют на вкусы, жизнь и стремление каждой государства-нации". Американский политик доходит до выразительных выводов и аналогий: "Так же Соединенные Штаты являются единой военной и информационной супердержавой".

А поскольку социальная информатизация - дело недешевое и требует колоссальных инноваций, то пропасть между странами "золотого миллиарда" и "информационно бедными" странами углубляется. Президент Южной Африки Нельсон Манделла в речи на церемонии открытия выставки "Телезапятых-95" в Женеве указал: "Преодоление разрыва между "информационно богатыми" и "информационно бедными" странами является решающим для преодоления экономической и других неравенств между Севером и Югом, а также для улучшения качества жизнь всего человечества. Но реальность настоящего - это то, что технологический разрыв между развитыми странами и странами, которые развиваются, быстро увеличивается".

Таким образом, информационная пора, вопреки всем ее достижениям, содержит новые потенциальные и реальные социальные конфликты, новые

дисбалансы и неравенства, предопределяет риски и новые взрывоопасные экстремальные ситуации.

Новые глобализационные (информационные) угрозы требуют своевременной разработки соответствующих мероприятий по усилению противодействия разрушения социальных, моральных и психологических устоев социума, прививание "иммунитета", в особенности молодой генерации, относительно опасности возникновения экстремальных ситуаций. Отсюда вытекает, в условиях настоящего времени, важный вывод: реализация современных задач ускорения экономического развития в Украине невозможна без интенсивного рынка информационного продукта. Прежде всего, это касается сферы телекоммуникаций, учитывая ее динамичность, исключительную "рыночность", всеобъемлемость технологий и объем денежных средств.

Приоритетный рынок телекоммуникаций в Украине - это совокупность субъектов рынка с высокой доходностью, которые ныне стабильно обеспечивают свыше 1,5 млрд. грн. ежегодных поступлений в бюджет государства. Несмотря на низкий уровень инвестиционных ресурсов, за последние годы достигнуты весомые успехи в возрастании телекоммуникаций, которые происходят с учетом подходов, отвечающим мировым тенденциям интегральных процессов. Практически завершены цифровые сети связи на международном и междугородном уровнях. Организованы международные цифровые переходы с Россией, Беларусью, Молдовой, Польшей, Словакией, Венгрией, Италией, Турцией. Ныне работают цифровые каналы связи со всеми областными центрами Украины. Это дало возможность повысить удельный вес цифровых каналов связи почти до 50%, а на международных направлениях - до 98%. Построена цифровая автоматизированная сеть междугородной, международной телефонной связи, которая способная целиком обеспечить спрос на такие услуги с гарантированным качеством. Каждый год инвестиции в развитие телекоммуникаций увеличиваются в среднем на 30%, при этом частица

взносов операторов негосударственной формы собственности превышает половину и имеет тенденцию к возрастанию. В особенности это характерно в сфере мобильной связи. Ныне за темпами и расширением территории покрытия и развития мобильная связь резко опережает другие виды связи и уже охватывает 20% объема рынка телекоммуникаций. Ежегодно количество пользователей во всех стандартах мобильной связи увеличивается почти втрое.

Главная задача сегодняшнего этапа - привлечение современных европейских схем управления и западного телекоммуникационного капитала. Главная опасность - свертывание процесса либерализации области, внедрение административных методов управления, завершение приватизации ВАТТ "Укртелеком" на стадии льготной подписки или продажа основного пакета акций нестратегическому инвестору (финансовому спекулянту). Украина и дальше будет интегрироваться к глобальному информационному пространству, к Европейскому мировому сообществу.

В контексте нашего исследования развитие системы телекоммуникаций имеет важное значение в двух ракурсах.

Во-первых, телекоммуникации - это составная "всемирной паутины", без которой при современных условиях не может динамично и, что важнее, - на новейшей технической основе, развиваться экономика, в частности ее приоритетные направления.

Во-вторых, система телекоммуникаций, которая буквально пронизывает все сферы жизнедеятельности социума, создает технические предпосылки для оперативного предотвращения экстремальным ситуациям на разных направлениях угроз.

Опыт развития мирового рынка информации убеждает, что отдавая надлежащее либеральному подходу к решению актуальных задач (в особенности на микро- и макроуровнях), макроэкономические показатели должны оставаться в сфере государственного управления.

## **1.5. Рыночные трансформации и необходимость государственного противодействия современным угрозам развития**

Главная цель нашей страны на нынешнем этапе - построение рыночной экономики - не означает и не может означать отказ от регулировочных функций государства вообще. Необходимость государственного вмешательства в экономику определяют все экономисты, включительно с приверженцами либеральной рыночной экономики. Отличие во взглядах разных ученых обусловлена тем, какую меру вмешательства в рыночную экономику они оставляют за государством". Угрозу рыночного фундаментализма подчеркивает Дж. Сорос, отмечая, что даже в сугубо экономических и финансовых сферах попытки отрицания роли государства причиняют хаос и однозначно ведут к развалу мировой капиталистической системы".

Сохранение регулятивной функции государства диктуют и современные требования перехода к инновационной модели экономики. Ныне динамика и качество экономического возрастания, место страны в мировом сообществе все больше зависит от технологических сдвигов, осуществляемых на базе инноваций. Это получает отображение, во-первых, в интенсивном возрастании инвестиций в научные исследования и разработки, технологические и организационные инновации и повышение экономической отдачи от них (и вдобавок основной эффект достигается за счет не так непосредственно первичного внедрения инноваций, как вследствие распространения и применения инновационных продуктов и услуг); во-вторых, в опережающем развитии высокотехнологических областей промышленности и сферы услуг, увеличении наукоемкости и инвестиционной активности всех секторов экономики; в-третьих, в возникновении новых видов экономической деятельности. С этих позиций "активизация инвестиционной деятельности на инновационных основах является актуальной для экономики Украины, которую отбросил на

несколько десятилетий назад по объему производства и технологическому уровню продолжительный и глубокий экономический кризис до уровня слаборазвитых стран". Анализ тенденций и факторов экономического роста в странах рыночной экономики убеждает, что инновации являются определяющей, движущей силой продуктивного экономического роста. Функция государства материализуется именно в инновациях и становится решающим вектором прогресса, который получает подтверждение в резком возрастании таких индикаторов, как мультифакторный индекс производительности работы, который отображает уровень использования работы и капитала; усиление влияния технологического прогресса и т.п. Так, в странах Западной Европы и Японии свыше половины прироста валового внутреннего продукта получают благодаря научно-техническому прогрессу".

Делая ударение на важность коммерциализации науки, культуры и образования, укажем вместе с тем, что государственные капиталовложения в эту область имеют и еще долго будут иметь решающее значение. Низкий уровень эффективности инновационно-инвестиционного процесса в Украине является основной причиной мизерного финансирования научно-исследовательских и конструкторских работ. В 2001 г. на развитие науки было выделено лишь 0,24% ВВП, тогда как в России - 1,16%, в Чехии - 1,35%. В Австрии, Бельгии, Норвегии, Нидерландах, Австралии этот показатель равняется 1,5%-2%, в Германии, Швейцарии, Южной Корее, США, Японии - 2,5%-3%. н

Усиление инновационно-инвестиционной деятельности имеет системное влияние и взаимосвязь: увеличение финансирования науки и образования, повышение эффективности инноваций, возрастание ВВП, увеличение финансирования и так далее по спирали. Это требует формирование эффективного инновационно-инвестиционного технологического комплекса. Отличая инновационно-инвестиционную деятельность как определяющую на современном этапе, важно подчеркнуть приоритетность социальных факторов. Все больше исследователей доходят до вывода, что социальное

развитие - это не просто результат экономического роста: учитывая конечную цель, оно является первичным и имеет безусловный приоритет над прагматическими целями экономического развития.

Критерии социальности экономики являются предметом дискуссий, которые не утихают продолжительное время. Справедливо утверждение, что любая экономика социальна. Под социальной рыночной экономикой понимают конкретный тип хозяйственной системы, которой присущ набор социально-экономических учреждений и которая направляет функционирование всех элементов этой системы на реализацию целей социальной справедливости, защищенности, высокого уровня и качества жизни. Основными признаками социальной ориентированной экономики является социальная стабильность граждан общества за счет возрастания благосостояния. Технологически современная экономика - это сложная совокупность современных производственных, технических и информационных систем, которые взаимодополняют одна другую. Сбой в одной из них может послужить причиной необратимых потерь в экономике. Угрозы, обусловленные нарушением баланса интересов, могут не только подорвать экономическое состояние страны, а и привести к непоправимым последствиям.

Социальная ориентация предопределяет расширение функций государства в современном обществе за сохранение рыночных свобод, институтов и механизмов. Фундаментальные проблемы современного общества нельзя решить с помощью одних лишь рыночных механизмов. Это, прежде всего, касается социальной сферы как одного из важнейших источников экономического роста. Уровень жизни, образования, квалификации рабочей силы, состояние научных исследований, здоровье населения, экологическая ситуация, социальное обеспечение и т.п. оказывают непосредственное влияние на темпы и качество экономического роста. В дальнейшем роль этих факторов неустанно будет возрастать, они

непосредственно будут определять долговременные экономические перспективы страны и ее социально-политическую стабильность.

В свое время М.Вебер /13/ отмечал: "в конце концов, творцами капитализма были: рациональное постоянное предприятие, рациональная бухгалтерия, рациональная техника, рациональное право; но не только они; мы можем отнести сюда рациональный образ мышления, рациональный образ жизни, рациональную хозяйственную этику".

Только в случае объединения и совпадения интересов государства и граждан можно и должно обеспечить стабильное развитие, противодействовать вероятным угрозам, откуда бы они ни появились.

## **1.6. Проблема риска как "предтеча" экстремальных ситуаций**

В конце минувшего столетия на научном небосклоне появился ряд концепций, которые осмысливали картину мира в преддверие третьего тысячелетия. Среди них и новая социологическая теория современного общества (ее автором считают немецкого ученого Ульриха Бека), в соответствии с которой в последней трети XX столетия человечество вступило в новую фазу своего развития - фазу риска.

Общество риска - это постиндустриальная формация общества, которое имеет несколько особенностей. Главная из них состоит в том, что для общества риска характерно распределение угроз разного происхождения и обусловленных ими рисков, тогда как для индустриального - распределение благ. Эволюция индустриального общества сопровождалась появлением новых факторов, которые улучшали жизнь человека. В обществе риска воцаряется другая ситуация: по мере его развития появляется все больше отрицательных факторов, действие которых неравномерно затрагивает членов общества. Таким образом, в индустриальном обществе вырабатываются и распределяются главным образом положительные достижения, а в обществе риска, которое "врастает" в индустриальное,

накапливаются и распределяются между членами отрицательные последствия развития последнего.

В монографии научных работников Института социологии НАН Украины под руководством профессора Ю.И. Саенко разработаны методологические основы исследования социальных рисков /14/. Концептуальным основам этого направления социологической теории относительно украинских реалий посвящены работы А.Б. Качинского и других отечественных исследователей /15/.

Катастрофа в Чернобыле, аварии на угольных приисках Украины, вспышка международного терроризма и такое знаковое событие, как теракт 11 сентября 2002 года в США, - все это удостоверяет актуальность проблемы риска для национальной безопасности Украины. Она связана, прежде всего, с поиском оптимальных форм управления социальными, технологическими и экологическими процессами, прогнозированием их, стратегическими направлениями государственной политики в разных сферах.

Таким образом, проблема риска как "предтечи" экстремальных ситуаций исподволь, но неотвратно становится одной из неотъемлемых характеристик национальной безопасности. Приобрела актуальность разработка реальных механизмов осуществления безопасности и, соответственно, моделей оценивания и управления социальными рисками, предусмотрение экстремальных ситуаций, которые, своей очередью, стали предметом научного и практического рассмотрения, в особенности с учетом глобализации проблем социального развития.

В полной мере исследователи начали сознавать это лишь тогда, когда риски начали воссоздаваться в социумах большинства стран и, в сущности, превратились в проблемы выживания человека при условиях непрерывного увеличения экстремальных ситуаций социального и техногенного характера. Как современное многоуровневое явление проблема экстремальных ситуаций требует системного подхода.



## **1.7. Основные направления анализа риска**

Риск является неотъемлемой составной частью человеческой деятельности, когда существует неуверенность в результатах того или иного решения (процесса). Понятие "риск" начали изучать немало конкретных наук, в частности теории игр, системного анализа, катастроф, принятие решений, логика, психология, военные, экономические, демографические, медицинские, биологические, правовые и прочие дисциплины.

Приблизительно с 60-х годов XX столетия риск становится предметом междисциплинарных исследований, получает статус общенаучного понятия, которое выходит за пределы конкретной науки.

Подчеркнем, что объективное существование риска обусловлено вероятным характером многих естественных, социальных и технологических процессов, многовариантностью материальных и идеологических соотношений, между субъектами социальной жизни. В связи с этим возможны разные отклонения от ожидаемого результата, который предопределяет неоднозначность решений в общественной жизни и невозможность руководить обществом как жестко детерминированной системой.

Ныне, для предотвращения экстремальных ситуаций требуется значительные материальные затраты, поэтому важное значение приобретает проблема их оптимизации. Весьма обостряется вопрос относительно приемлемости уровня безопасности, которая обеспечивает достижение максимальной выгоды при минимальной опасности. Ответ на этот вопрос в значительной мере определяет темпы и масштабы экономических и социальных превращений в Украине. Поэтому важно установить "меру", или шкалу, с помощью которой можно было бы количественно измерять разные виды рисков: от угроз аварий на предприятиях и экстремальных ситуаций к естественным катастрофам.

Такая шкала может давать возможность сравнивать разные виды угроз и соответственно определять уровень безопасности, то есть меру защищенности человека и окружающей среды. В этом случае под термином "риск" в его общепринятом смысле понимают такие количественные показатели, как величину убытка от определенных событий, явлений или действий (например, экономические убытки, количество заболеваний, травм, смертей и т.п.) и вероятность возникновения этих событий, явлений или действий.

Известно, что любая деятельность может оказывать определенное вредное влияние, предопределяя изменения адаптационно-компенсаторных возможностей человеческого организма, возникновение неблагоприятных следствий для окружающей среды и производственно-бытовой сферы.

Остановимся на характеристике этих аспектов. С этой целью мы употребляем набор специализированных терминов, два из которых используются чаще чем остальные - "угроза" (hazard) и "риск" (risk). Разные исследователи рассматривают эти термины как синонимы или же дают им противоречивое содержание. Впрочем, эти термины имеют важное значение в теории риска, поскольку отражают взаимоотношения и разногласия между обществом, окружающей средой и новейшими технологиями. Общество, окружающая среда и техника вместе или в отдельности могут служить источником угрозы для естественной, социальной или природно-социальной генетики.

С методологической точки зрения главной проблемой научного определения понятия "риск" есть его комплексный характер, который требует привлечения широкого круга исследователей - представителей многих дисциплин. Именно здесь необходимо применение методов системного анализа, учет всех факторов, которые предопределяют возникновение критических ситуаций, анализ всех последствий, к которым они могут привести.

Авторы исследования присоединяются к двухстороннему подходу оценивания риска, приближенного к теории принятия решений при условиях недетерминированных параметров. Такая двухуровневая форма определения риска дает возможность объединения в одном показателе разнообразных данных об объекте и субъекте угрозы; дает возможность получить интегральные оценки риска от неограниченного числа отрицательных процессов.

Отдельные виды рисков и характеристика их, вероятностная форма понимания используется ныне исследователями и специалистами-практиками промышленной и экологической безопасности. В этом плане различают индивидуальный и коллективный (социальный), относительные и привнесенный, кумулятивный и дополнительный риски, которые можно применять для оценивания риска в конкретной ситуации.

Приведем отдельные толкования этих понятий.

Индивидуальный риск информирует о распространении риска в виде возможного поражения конкретного или типичного индивида в определенном локальном измерении при определенном влиянии.

Коллективный (социальный риск) характеризует сущность, направление и масштаб угрозы, определяется в зависимости от частоты его возникновения, определенных событий, которые их переживает определенное количество людей в случае реализации определенных угроз.

Относительный риск отражает отношение условных вероятностей и возникновение события В при наличии или отсутствия события А.

Привнесенный риск: если событие А - наличие исследуемого нами фактора риска, а событие В - наличие фактора - результата, тогда величину привнесенного риска можно определить по соответствующим формулам. Привнесенный риск можно интерпретировать как частицу, на которую уменьшится величина - вероятность наличия в популяции фактора - результата в случае устранения фактора риска.

Показатель кумулятивного риска применяют во время анализа рисков для населения - это количество случаев возникновения специфического эффекта, которые ожидают в определенной демографической группе.

Дополнительный риск - возрастание вероятности возникновения нежелательного эффекта, обусловленного специфической причиной.

Благодаря накоплению научных знаний о вероятностном характере естественных и общественных процессов и потребности подготовки юридических норм и правил риск все чаще попадает в поле зрения разных исследователей. Современные достижения науки дают полное представление о риске как о взаимосвязанной двухуровневой структуре, которая имеет теоретический и прикладной аспект. Прикладной является результатом исследования конкретных наук. Теоретический - это результат изучения риска как общественного явления, которое имеет соответствующие закономерности развития и управления в условиях неопределенности.

## **1.8. Социальные риски и их иерархия**

Под социальным риском Ю.И. Саенко понимает вероятность угрозы потери социальным субъектом здоровья, статуса, безопасности, работы и т.п. либо в повседневной жизни или в результате естественных или техногенных аварий или бедствий.

Если в 1970-1980-х годах большей частью оценивали технологии риска, риски хозяйственной деятельности и управленческих решений, то в последнее десятилетие появились публикации, которые содержат анализ политического, экономического, социального риска, а также социально-психологические особенности этого феномена.

Обобщим структурообразующий признак социального риска, которые анализируют исследователи.

- источник (причина) риска;
- субъект риска - индивид, социальная группа, общество;

- статистически выявленная и определенная вероятность угрозы;
- субъективная оценка видов и объемов потерь и компенсаций риска;
- экспертная (нормативная) оценка видов и объемов потерь и компенсаций риска.

Для системного анализа экстремальных ситуаций важно также определить иерархию социальных рисков, структуральную их взаимозависимость. В отечественных научных разработках предлагают следующую иерархию социальных рисков:

- 1) научно обоснованный риск - оценивается на основании научных исследований и мониторинговых наблюдений, выполняет рекомендательную функцию;
- 2) законодательный уровень риска - устанавливается законодательными органами (имеет статус обязательного соблюдения);
- 3) управленческо-практический уровень риска - его придерживаются управленческие структуры на практике, нередко лишь декларируя соблюдение законодательного риска;
- 4) субъективный риск - уровень риска, какого социальные субъекты придерживаются на собственное усмотрение в повседневной жизни.

В реальной жизни приведенные уровни риска не всегда легко выделить. Цель цивилизованного общества - минимизировать разрывы и отклонение между ними. Именно субъективный риск лежит в основе ориентации и поведения населения, которое формируется вследствие влияния на общественное сознание всех перечисленных факторов оценивания ситуации. В основу теоретического анализа Ю.И.Саенко предлагает положить такие аспекты:

- индивидуалистские ориентации - свойства личности в оценивании ситуации и риска, а также принятии решений на основе двух подходов: рационального и эмоционального;
- рациональный подход - в основе оценивания ситуации и принятие решений лежит логическое мышление: знание и опыт;

- эмоциональный подход - в основе оценивания ситуации и принятие решений лежат ощущения, стереотипы, архетипы, традиции и характера. Этот подход преимущественно связан с иррациональным мышлением;
- патерналистские ориентации - ведущая роль в оценивании ситуации и принятии решений принадлежит лидерам и авторитетам;
- волевой параметр - способность принимать волевые решения.

Взаимосвязь указанных факторов, уровней и аспектов исследования делает более выразительная приведенная дальше структурно-функциональная схема. 1.5.

Итак, подытоживая изложенное, получим основание для такого вывода:

- научно обоснованным риском;
- уровнем осведомленности население из всех источников информации;
- уровнем грамотности население;
- уровнем личных ориентаций населения.

Нельзя не согласиться с утверждением, что теории риска и его вероятной исходной - экстремальных ситуаций - практически отсутствуют. Точнее, можно говорить лишь о совокупности исследовательских направлений. Поэтому важно подчеркнуть, что и западная, и отечественная социология находятся не только на этапе осмысления риска и сущности экстремальных ситуаций, а и разработки предупредительных мер.

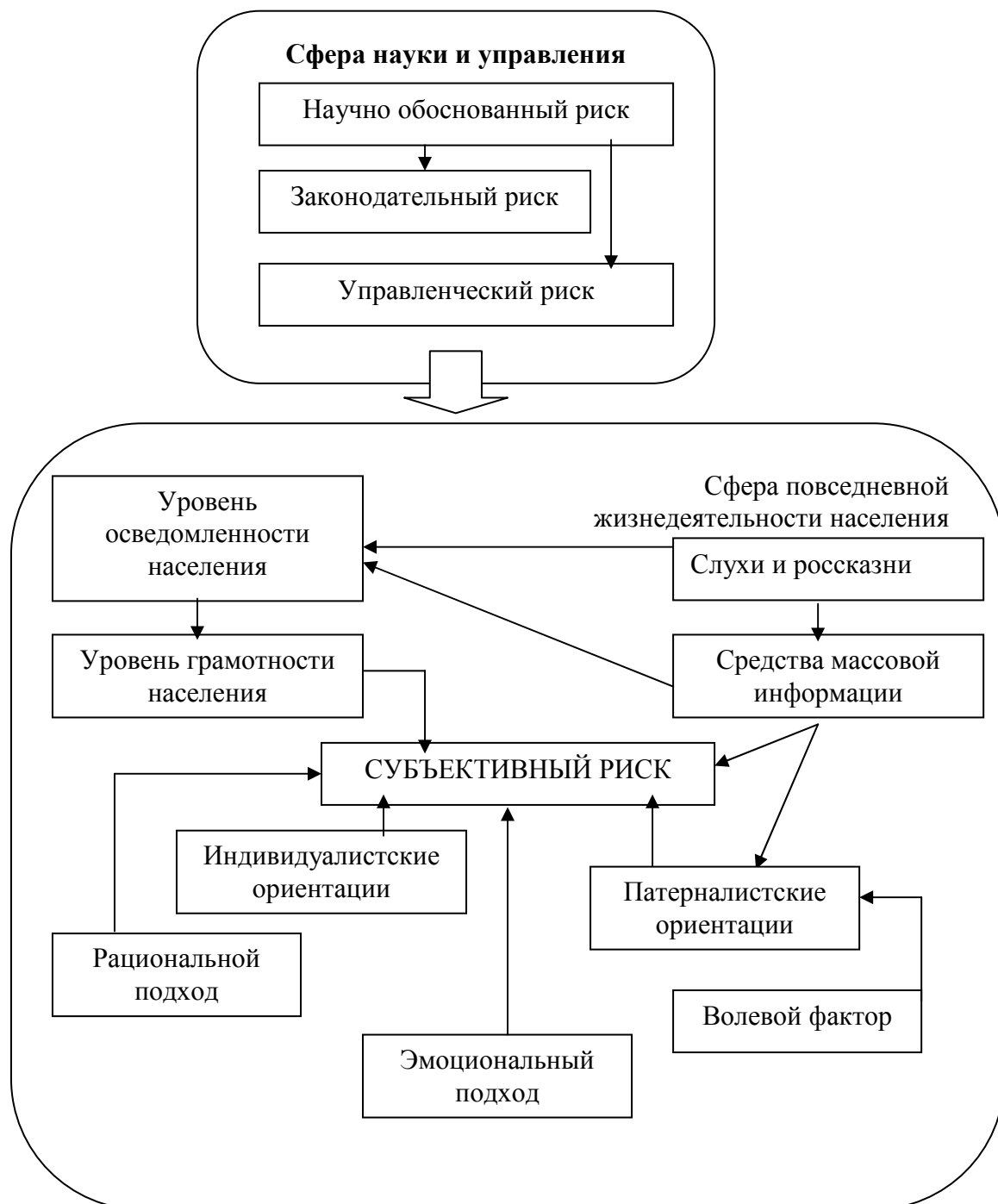
Л.Д. Бевзенко отмечает, что важно исходить из того, что человек ощущает себя, с одной стороны, якобы таким, что имеет возможность надеяться на общими усилиями преодолеть ситуации риска, а с другой - ощущает, что каждый старается спрятаться от таких ситуаций своими силами, не прибегая к попыткам что-то изменить на общем уровне.

При таких условиях "...тяготение к сообществам, - подчеркивает автор, - в которых разрушается стена отчужденности человека от человека, где возникает психологический комфорт от ощущения защищенности благодаря равнодушию социального окружения и своей обратной востребованности

этим окружением, становится спонтанной ... реакцией людей на ситуацию рисков" /16/.

Схема 1.5

Формирование субъективного риска населения



Именно на это в свое время обратил внимание А. Маслоу в контексте темы социальной синергетики.

Системный подход требует идентификации причин угроз и рисков, которые возникают. Социологические исследования последних, в частности, данные социологического мониторинга Института социологии НАН Украины за 1992-2000 года, которые ранжируют опасности и которых люди боятся больше всего", свидетельствуют, что около половины населения считают свое положение нищим и при условиях необходимости выживания люди вынуждены, прежде всего, учитывать социально-экономические факторы ситуации (см. табл. 1.3).

Таблица 1.3

Динамика восприятия населением Украины опасностей, каких люди боятся более всего. По данным мониторинга ИС НАНУ 1992-2003 лет (% , ранги)

<i>Перелік небезпек</i>	1992	1999	2000	2001	2002	2003
Возрастание преступности	68(1)	66 -	71 (4)	70 -	62 -	60 -
Рост цен	66 (2)	77 -	77 (2)	75 -	71 -	75 -
Безработица	60 (3)	84 -	86 (1)	85 -	73 -	76 -
Голод	50 (4)	71 -	72 (3)			
Межнациональные конфликты	49 (5)	32 -	28 (7)	24 -	18 -	17 -
Последствия катастрофы на Чернобыльской АЭС	46 (6)	44 -	40 (6)	36 -	30 -	32 -
Массовые уличные волнения	21 (7)	27 -	21 (8)	23 -	19 -	21 -
Распад Украины, как государства	17 (89)	16 -	12 (12)	12 -	15 -	14 -
Холод в квартире	17 (89)	42 -	45 (5)			
Нападение внешнего врага на Украину	14 (10)	21 -	18 (9)	13 -	16 -	16 -
Остановка производства через массовые забастовки	13 (11-12)	20 -	16 (10)	50 -	33 -	41 -
Возвращение к порядкам времен застоя	13 (11-12)	9 -	11 (13)	9 -	7 -	7 -

Данные таблицы 1.3 свидетельствуют, что 1992 года наибольшими опасностями люди считали "возрастание преступности", "рост цен", "безработица", то есть имеющийся синдром социально-экономических опасностей. Вместе с тем такая экологическая опасность как "последствия



катастрофы на Чернобыльской АЭС" занимает шестое место среди тринадцати наибольших опасностей.

Вывод относительно первостепенности именно социально-экономических по характеру опасностей подтверждают и результаты исследований, проведенных под руководством А.О.Ручки в границах научно-исследовательской программы "Аксиомониторинг", что выполняется с 1991 года в отделе социологии культуры и массовой коммуникации Института социологии НАН Украины. В 2000 году (N=1200), отвечая на вопрос, какие цели являются сейчас важнейшими для реализации, 80% населения указали на "преодоление экономического кризиса", 75% - на "стабилизацию экономики", 65% - на "обеспечение порядка и законности в стране", 25% - на "противодействие росту цен", 21% - на "борьбу с преступностью" и лишь 6% - на "заботу о благоустройстве и экологии наших городов и сел". Итак, за ситуации социально-экономических неурядиц угроза экологической опасности психологически уменьшается, благоустройство и экология городов и сел не получает в массовом сознании надлежащей актуализации.

Стержневым принципом, которым важно руководствоваться в случае принятия рискованных решений, есть максимизация ожидаемой стоимости (полезности) действия. В свою очередь, ожидаемая стоимость (полезность) является суммой всех важных для получения компенсаций, умноженных на вероятность их получения.

### **1.9. Риски хозяйственной деятельности и их интерпретация**

Алгоритм оценивания конкретных рисков субъектов хозяйственной деятельности целесообразно использовать для анализа кризисных и экстремальных ситуаций.

Приведем для иллюстрации отдельные примеры. В частности, Ю.Ю. Кинев /17/ оценивает риски на этапе принятия управленческого решения, которое при условиях рыночного отношения приобретает самостоятельное

значение как важная составная теории и практики управления. Одно из главных правил финансово-хозяйственной деятельности подчеркивает: не избегать риска, а предусматривать его, стараясь снизить его до минимального уровня.

Анализ деятельности предприятия (компании) нуждается в классификации рисков (схема 1.6), требования к которым являются такими:

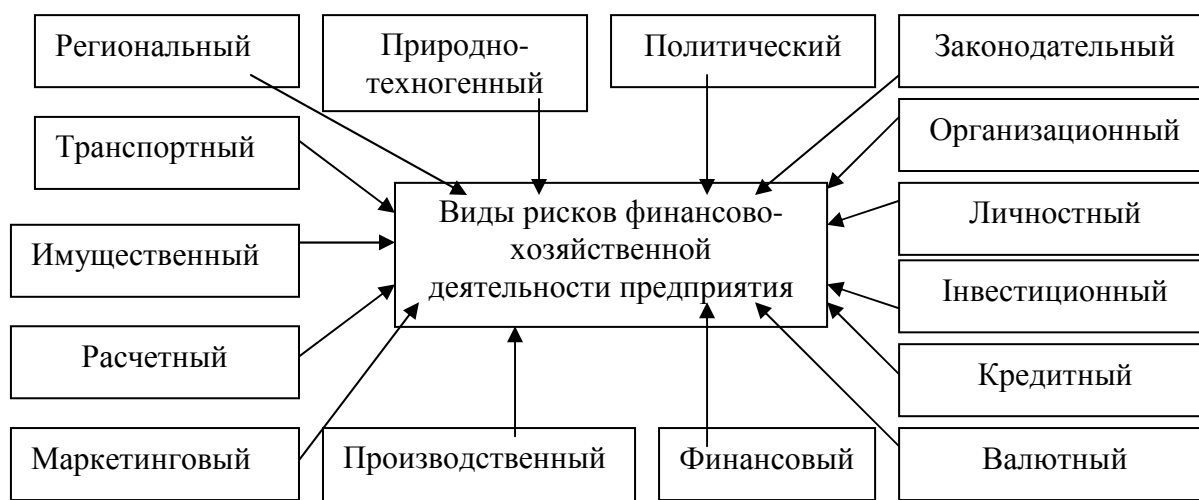
- в классификации не может быть видов и подвидов риска, нельзя объединять риски в определенные группы (иначе может произойти "размывание" риска, то есть уменьшение его значимости);
- каждый риск следует определять в отдельности (чем точнее он определен, тем легче его оценить);
- классификация не может быть "жесткой" (при осуществлении финансово-хозяйственной деятельности можно дополнять перечень рисков в зависимости от конкретных условий). Авторы разделяют такую классификацию рисков, ведь ее можно применить в процессе анализа и разработки предупредительных мер конкретным социальным угрозам.

В специальной литературе приводят критерии определения рисков.

Для методологии предотвращения экстремальным ситуациям путем экстраполяции на отдельные обстоятельства потенциально целесообразными являются такие характеристики рисков:

- природно-техногенная - обусловленная отрицательным влиянием стихийных сил природы и техногенного положения;
- политическая - характеризует возможность изменения общественно-политического климата в стране и регионе, определяет перспективы развития;
- законодательная - определяет возможность изменения разных законодательных актов, которые влияют на финансово-хозяйственную деятельность;

## Классификация рисков



- организационная - зависит от внутренних факторов, которые действуют внутри компании (стратегия фирмы, принципы деятельности, ресурсы и использование их, качество и уровень использования менеджмента и маркетинга);
- имущественная - зависит от вероятности потери имущества вследствие кражи, диверсии, халатности;
- личностная - возникает в случае, если от конкретного человека, его деловых и моральных качеств зависят конечные результаты финансово-хозяйственной деятельности, заключение контрактов, выполнение специальных задач, отбор руководства и формирование профессиональных команд;
- маркетинговая - характеризует условия рынка (спрос, предложение, цены);
- производственная - обусловленная освоением новой техники и технологий;
- расчетная - характеризуется вероятностью финансовых потерь через неправильно избранное время и формы выплат;
- инвестиционная - обусловленная выбором вариантов вложение капитала - инвестиций (инноваций) с целью получения максимальной экономической выгоды;
- валютная - зависит от влияния изменений курса валют на финансово-хозяйственную деятельность предприятия;

- кредитная - характеризует обобщенное понятие всех рисков, связанных с процессом оценивания заемщика;
- финансовая - отбивает анализ финансово-хозяйственной деятельности предприятия на основании данных бухгалтерской отчетности.

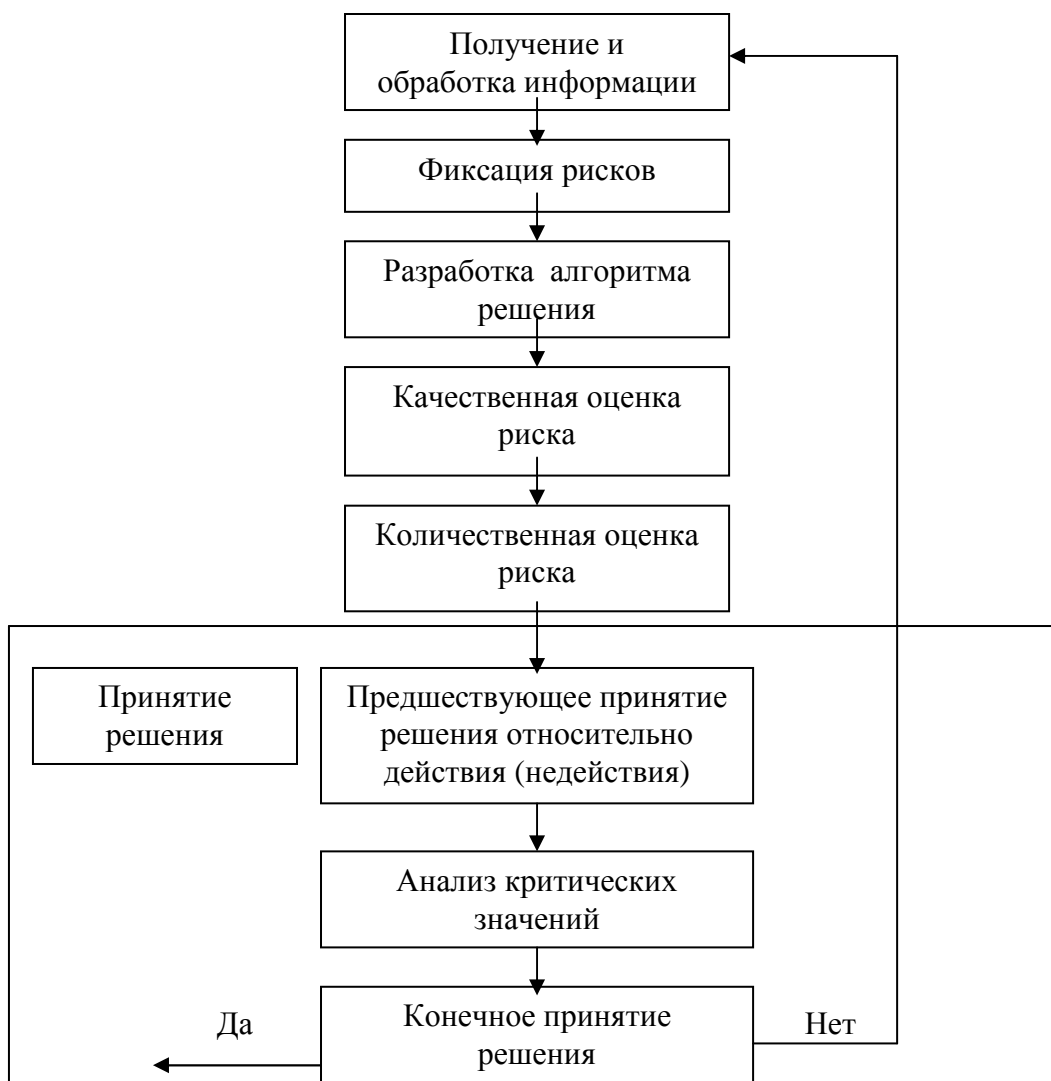
Тем не менее, выше отмечалось, что отдельные характеристики мало что дают для определения совокупного общественного риска. Они могут играть вспомогательную роль, конкретизировать отдельные факторы (а иногда и их удельный вес) при определении синергетичного влияния на исследуемые процессы.

Главной целью предложенной методики оценивания рисков есть разработка комплексного подхода к определению уровня влияния риска на финансово-хозяйственную деятельность предприятия. Отсюда вытекает такой алгоритм оценивания рисков (см. Схему 1.7).

Требования к качеству информации, на наш взгляд, должны быть такими:

- достоверность (корректность) информации - мера приближенности информации к первоисточнику или точность переданной информации;
- объективность информации - мера отображения информацией реальности;
- однозначность (невозможность ее "разночтения");
- логистика информации - количественное передающее звено между первоисточником и конечным пользователем;
- полнота информации - отображение исчерпывающего характера соответствия полученных данных цели анализа;
- релевантность - уровень приближенности информации к сущности проблемы или мера соответствия полученных данных поставленной задаче;
- актуальность информации - своевременность и важность информации для оценивания риска;
- весомость (значимость) информации для процесса аргументированных ВЫВОДОВ.

Схема комплексного оценивания риска



Здесь нужно установить взаимосвязь между риском и качеством информации, какой обусловлено его оценивание. Существует предположение, что вероятность риска, принятие некачественного (убыточного) решения зависит от качества и объема информации. Если выходить из неоклассической теории риска, при наличии нескольких вариантов принятия решения (скажем, по одинаковой прибыльности) избирают тот, что основывается на качественной информации (то есть существует тесная связь между риском и информацией).

Учитывая это, следует определить основные источники и методы получения информации:

- документальная информация - важнейший и ценнейший источник информации;
- пресса и печатные издания - традиционно распространенный метод получения информации;
- сообщение операторов партнеров ("вербовка" их);
- использование косвенных проявлений и признаков;
- агентурные методы - систематическое выполнение задач субъектами информации в ваших интересах (включительно с промышленно-экономическим шпионажем).

Оценивание финансово-хозяйственной деятельности предусматривает обязательную фиксацию рисков, то есть ограничение количества рисков на основании принципа "умной достаточности". Этот принцип основывается на учете важнейших и наиболее распространенных рисков для оценки деятельности предприятия (фирмы). Рекомендуется в первую очередь использовать такие виды рисков: региональный, техногенный, политический, законодательный. Другие виды рисков (транспортный, имущественный, организационный, личностный, маркетинговый, производственный, расчетный, инвестиционный, валютный, кредитный, финансовый) целесообразно привлекать для решения сложных задач. Это важно для разработки алгоритма решения.

Такой анализ оценивания рисков является важным для поэтапного распределения ожидаемого решения на определенное количество мелких и более простых задач. Разработка такой системы действий делает возможной разработку алгоритма решения.

Необходимым становится качественное оценивание рисков, то есть выявление рисков, которые могут сказаться во время реализации принятых решений; определение количественной структуры рисков; выявление наименее безопасных направлений в разработанном алгоритме решения. Главная цель этого этапа - выяснение основных видов рисков, которые могут возникнуть в процессе финансово-хозяйственной деятельности.

Благодаря такому подходу уже на начальном этапе анализа руководство предприятия (фирмы) может наглядно оценить уровень опасности рисков по качественному составу и своевременно отказаться от воплощения в жизни определенного решения.

Процедура количественного оценивания рисков довольно сложная, ее целесообразно осуществлять по методике, которая применяется во время аудиторских проверок, то есть: оценивать риски по контрольным точкам финансово-хозяйственной деятельности. Использование такого метода, а также результаты качественного анализа дают возможность комплексного оценивания рисков. Причем количественное оценивание рисков осуществляют на основании данных, полученных во время качественной оценки их, то есть будут оцениваться лишь те риски, которые имеются во время осуществления конкретной операции алгоритма принятия решения.

Для каждого фиксированного риска составляют таблицу оценивания риска на основании статистических данных, научных, периодических источников, а также на основе собственного опыта руководителей. Данные в таблице располагают таким образом, чтобы по возможности полнее определить факторы риска. В случае использования этого подхода достигается высокая оперативность качественного оценивания финансово-хозяйственной деятельности предприятия (компании). Проблему субъективности во время оценивания можно преодолеть путем применения специальных методов корреляции.

Итак, принятие решения является ответственной процедурой, которая предусматривает несколько этапов.

Первый - предшествующее принятие решения (на основании опосредствованного значения отдельного вида риска и качества информации в отдельности за каждой операцией алгоритма принятия решения).

Второй - анализ критических значений (анализ составных риска, значение которых превышает критическую величину, необходимость

выяснения вероятности таких рисков очень важная, так как они могут привести к потере вложенных средства и банкротства).

Третий - принятие окончательного решения (на основании результатов предшествующего решения и анализа критических значений).

В научной литературе разработан ряд эмпирических методик (в частности аналитических и сравнительных таблиц, схем и характеристик), которыми следует воспользоваться для анализа конкретных ситуаций.

### **1.10. Функциональная зависимость факторов риска**

Чтобы по возможности точнее охарактеризовать категорию "риск", необходимо определиться относительно понятий "вероятность" и "неопределенность", поскольку именно эти факторы лежат в основе рисков". Анализ понятия риска в аспекте предпринимательской деятельности осуществил В.С. Романов /18/. Как матрицу он предлагает взаимосвязь "риск - кризис - экстремальная ситуация".

Теория вероятности дает возможность количественно сравнивать события по их вероятностям. Вероятностью появления события является число, которое тем больше, чем вероятнее событие (число находится между 0 и 1). Наиболее вероятным считают событие, которое происходит чаще всего. Таким образом, понятие вероятности связанное с исследовательским, практическим понятием частоты события. За единицу измерения берут вероятность достоверного события (вероятность достоверного события равна 1), то есть такого события, которое в результате определенного опыта или процесса деятельности непременно должно состояться.

Различают субъективную и объективную вероятности. Концепция объективных вероятностей построена на интерпретации понятия вероятности как предельного значения частоты за бесконечно большое число экспериментов, а оценивание вероятности осуществляют путем вычисления частоты, с которой происходит это событие. Например, частоту



возникновения определенного уровня потерь в процессе реализации проекта можно вычислять по формуле:

$$f(A) = n(A)/n,$$

где  $f$  - частота возникновения некоторого уровня потерь;  $n(A)$  - число случаев наступления этого уровня потерь;  $n$  - общее количество случаев в статистической выборке, которая включает как успешное осуществление, так и неуспешные инвестиционные проекты.

Точность измерения объективных вероятностей зависит от объема статистических данных и возможности использования их для будущих событий, то есть сохранения условий, в которых происходили минувшие события. В частности, с этой целью в экономической практике применяют метод корреляции.

Вместе с тем, во многих случаях во время принятия решения статистические данные относительной частоты появления ситуации мизерные по объему или вообще отсутствуют. Поэтому прибегают к другому способу измерения вероятности события, основанных на субъективных измерениях лица, которое принимает решение.

Измеренные таким способом вероятности называют субъективными вероятностями ситуации. Во время определения субъективных вероятностей на первое место выходит вывод субъекта, который отображает состояние его информационного обеспечения. Иначе говоря, субъективная вероятность определяется на суждении или личном опыте того, кто оценивает (в случае эксперта), а не на частоте, с которой подобный результат был получен при аналогичных условиях. Отсюда варьирование субъективных вероятностей, которое поясняется широким спектром разнообразной информации для разных возможностей оперирования с одной и той самой информацией.

Зависимость от объемов исходной информации, с одной стороны, и зависимость от субъекта - с другой ведет к тому, что к вероятностной ситуации прибавляются неопределенности. Таким образом, одного понятия для характеристики риска недостаточно.

Неопределенность предусматривает наличие факторов, по которым результаты действия не являются детерминированными, а мера возможного влияния этих факторов на результат неизвестна. В частности, это может быть неполнота или неточность информации.

Условия неопределенности, распространенные по любым видам предпринимательской деятельности, является предметом исследования и объектом постоянного наблюдения экономистов разных профилей, а также специалистов других областей (юристов, социологов, политологов, психологов). Такой комплексный подход к изучению этого явления (явление неопределенности в бизнесе) связан с тем, что хозяйственные субъекты в процессе своего функционирования ощущают зависимость от целого ряда факторов, которые можно разделить на внешние и внутренние.

- Внешние факторы: законодательное обеспечение, реакция рынка на продукцию, которая выпускается, действия конкурентов.
- Внутренние: компетентность персонала фирмы, ошибочное определение характеристик проекта и т.п.

Проблема лежит не так в плоскости математических методов, как в формулировании конкретных задач, для чего надо четко вообразить реальный процесс финансовых операций и поведение разных категорий "игроков" по обстоятельствам, которые изменяются.

В контексте нашего исследования представляет интерес анализ, осуществленный В.С.Романовым относительно подхода к классификации неопределенности, которая используется при проектировании работ.

Автор предлагает учитывать такие факторы:

- субъективную неопределенность, связанную с невозможностью точного предвидения поведения в процессе работы людей, которые отличаются уровнем образования, опытом, творческими способностями, интересами. Причем индивидуальные реакции изменяются каждый день, в зависимости от самочувствия, расположения духа, контактов с другими людьми;

- техническую неопределенность, которая значительно меньше по сравнению с человеческой, но ее также надо учитывать. Техническая неопределенность связана с надежностью оснащения, предсказуемостью производственных процессов, сложностью технологии, уровнем автоматизации, объемом производства, темпами обновления;
- социальную неопределенность, которая характеризуется старанием людей образовывать социальные связи взаимопомощи, которые зависят от принятых обязательств, служебных отношений, ролей, стимулов, конфликтов, традиций.

При этих условиях прогнозирования и планирования производства, объем продаж и величины денежных потоков, разработка проектов строительства и бизнес-планов могут быть рассчитаны лишь приблизительно. Часто бизнес вместо ожидаемой прибыли может причинять убытки, величина которых намного превышает не только вложенные средства, а и все имеющееся имущество. На основании этого можно прийти к выводу, что основу рисков составляет вероятностная природа рыночной деятельности и неопределенность ситуации во время ее осуществления.

Здесь вырисовывается еще один аспект риска - его принадлежность к любой деятельности. Иначе говоря, если хозяйственный субъект планирует реализовать проект (бизнес-план и т.п.), он натывается на инвестиционные, рыночные риски; если предприятие (компания) не осуществляет единых действий, оно также не гарантировано от рисков - риска неполучения прибыли, рыночных рисков и т.п.

Итак, риск можно характеризовать как вероятность недополучения запланированных результатов при условиях неопределенности, которая сопровождает хозяйственную и любую деятельность.

Очень тесно с понятием риска связано понятие "рискованной деятельности", или "деятельности, предрасположенной к риску". Учитывая такой подход к риску можно различать понятия "субъект риска" и "объект риска". Под субъектом следует понимать руководство компании, то есть

конкретных лиц или коллектив, которые принимают решение относительно выбора той ли той альтернативы, связанной с деятельностью компании. Соответственно под объектом понимают ресурс, изменение которого возможно в случае возникновения рискованной ситуации, которая может изменяться в направлении, отличном от предусмотренного планами и расчетами.

Таким образом, на всех уровнях существует тесная связь риска, вероятности и неопределенности. Учитывая то, что мы рассматриваем возможность "перетягивания" общественных рисков в экстремальные ситуации, важно более детально подходить к вопросам их классификации.

Итак, социальный риск - сложное многоуровневое понятие, обусловленное неопределенностью и тесной связью с вероятностными процессами. Причины угроз экстремальных ситуаций следует искать как на микро-, так и на макроуровне, важно анализировать весь комплекс разногласий, связанных с глубоким кризисом в экономике и практически во всех сферах жизни общества - экологических, политических, социальной и духовной.

Чтобы оценить риск, надо конкретизировать само понятие "риск". Под оценением риска мы понимаем комплекс действий, направленных на оценку, анализ и идентификацию механизмов возникновения явлений, которые взыскивают влияние на образ жизни и состояние здоровья человека, с целью предотвращения отклонениям, угрозам, вреду, потерям и т.п. или противодействию возникновению их. Формальное описание риска, как уже отмечалось, опирается на теоретико-вероятностный подход. В частности, широко известны исследования, в которых определяли оценку риска для разных видов деятельности. Были выявлены интересные явления. Скажем, люди отдают предпочтение добровольному риску (например, альпинизм, курение), а не принудительному, расположеннее идут на риск, если могут на него влиять.

По мнению многих исследователей, важную роль в современном оценивании индивидуального восприятия риска играют географические и социальные факторы, культурные традиции и психология конкретных групп населения. Если поначалу активной была реакция на естественные опасности, стихийного бедствия, характерные для региона, то теперь границы таких наблюдений расширились и исследователи изучают следствия развития техники и технологий, другие антропогенные факторы.

Исследования показали, что индивидуальное восприятие риска непосредственно связано с социальным статусом и культурными традициями населения. По наблюдениям социологов, в случае существования угрозы, люди вырабатывают для себя определенную стратегию поведения, которое уменьшает в них ощущение неопределенности и страха.

Если у людей еще не сложилась мысль, наблюдается противоположная ситуация - они терпеливо относятся к формулированию проблемы. Наблюдения фиксируют, что информация об угрозах, представленная в разных формах (например, данные о смертности или, наоборот, выживании), способная изменить индивидуальное восприятие риска и поступки людей. Рассматривая разные подходы к оцениванию риска, следует заметить, что они имеют разные сферы применения и не лишены недостатков.

Оценивание риска, то есть прогнозирование технологических и экологических катастроф в регионах - ключевое звено определения уровня экологической безопасности. Предшествующая работа в этом направлении имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами оценивания безопасности. Во-первых, можно целиком реально получить количественную оценку ожидаемого убытка; во-вторых, есть возможность сравнить и учесть риск от всех возможных факторов, дать комплексную оценку.

Стратегия управления риском может основываться на выборе уровня риска в границах от минимального к максимально допустимого. Так, в

Нидерландах, при планировании промышленной деятельности вместе с географическими, экономическими и политическими картами используют также карты риска для территории страны. Чтобы построить промышленное предприятие и ввести его в эксплуатацию, конструкторы должны количественно определить уровень риска от его эксплуатации и обосновать его приемлемость. При лицензировании нового предприятия дополнительно требуют карту риска района, где расположено это предприятие. Теория и практика предотвращения рисков приобрела распространение из-за опасности деградации окружающей среды. Благодаря этому минимизируется убыток и достигается компромисс между необходимостью затрат на повышение экологической безопасности и ожидаемой выгодой. Основанием для разработки соответствующих карт риска служит анализ общего проявления в пространстве и времени экзо- и эндогенных катастрофических процессов и картографирования отдельных видов опасностей. При этом необходимо изучать естественные и антропогенные факторы риска с учетом постоянства территории, объединяя геологические и экологические карты. По мере накопления информации принятые в первых вариантах карт риска качественные характеристики могут превращаться в количественные. Конечный результат разработки карт риска - оценивание и определение на картах естественного потенциала, то есть способности ландшафта конкретной территории к самообновлению после антропогенного или стихийного бедствия.

Современные достижения науки дают представления о риске как двухуровневой взаимосвязанной структуре, которая имеет прикладной и теоретический аспекты. Прикладной - результат исследования конкретных наук. Теоретический - результат изучения риска как общественного явления, которое имеет собственную сущность, соответствующие закономерности развития и управление по ситуации неопределенности /19/.

А.Б. Качинский отмечает, что анализ понятия "риск" может дать ответ на широкий круг экологических и эколого-гигиенических вопросов и отразить его современное содержание (риск через угрозу). Это предусматривает:

- вероятность того, что группы людей будут испытывать отрицательное влияние разных уровней антропогенных факторов окружающей среды;
- вероятность того, что у этих лиц возникнут именно такие, а не другие нежелательные эффекты;
- прогнозируемую векторную величину убытка, который может возникнуть вследствие принятия решений при условиях неопределенности и реализации угрозы.

Итак, **риск** является **количественной мерой безопасности**, которая равняется **произведению вероятности реализации определенной угрозы на вероятность величины** возможного убытка от нее.

В терминах теории риска принято проводить анализ событий, вероятность которых равняется единицы (например, загрязнение окружающей среды). В таком случае срок "риск" эквивалентный термину "убыток", и соответственно величина риска количественно равняется величине убытка.

Заслуживает внимания характеристика риска, осуществленная А. Альгиным: - возможность отклонения от поставленной цели, ради которой была избрана альтернатива;

- вероятность достижения желательного результата;
- отсутствие уверенности в достижении поставленной цели;
- возможность возникновения нежелательных следствий (материальные или физические убытки, заболеваемость, смертность и т.п.) во время проведения тех или других действий при условиях неопределенности для субъекта, который рискует;
- материальные, экологические, моральные и прочие затраты, связанные с внедрением избранной при условиях неопределенности альтернативы;

- ожидание угрозы, неудачи вследствие выбора альтернативы и ее реализации.

Из этого следует такое определение термина "риск": это деятельность, осуществляемая субъектами общественной жизни при ситуации неминуемого выбора в условиях творчества, внедрение новаций, инициативы и т.п., связанная с "устранением" неопределенности, то есть вероятность наступления благоприятных или неблагоприятных следствий деятельности.

Эти характерные признаки риска указывают, что его содержание отождествляется не только с возможными отрицательными следствиями. Будучи разновидностью человеческой деятельности и выполняя специфические социальные функции, риск, с одной стороны, направлен на получение общественно значимых результатов в новые способы в условиях неопределенности и ситуации неминуемого выбора. Тем самым он оказывает содействие преодолению консерватизма, догматизма, разных психологических барьеров. С другой - риск может подтолкнуть к авантюрным поступкам, волюнтаризма, субъективизма, затормозить социальный прогресс, если при условиях неполной информации альтернативу избирают без надлежащего учета объективных закономерностей развития социальных явлений, относительно которых принимают решение.

При этих условиях теория риска получила конкретное практическое воплощение. Организация Объединенных Наций промышленного развития (UNIDO), Международное агентство из атомной энергетики (IAEA) и Всемирная организация здравоохранения (WHO) на основании научных исследований разработали рекомендации относительно оценивания и управления риском. Это, в частности, Программа окружающей среды (UNEP).

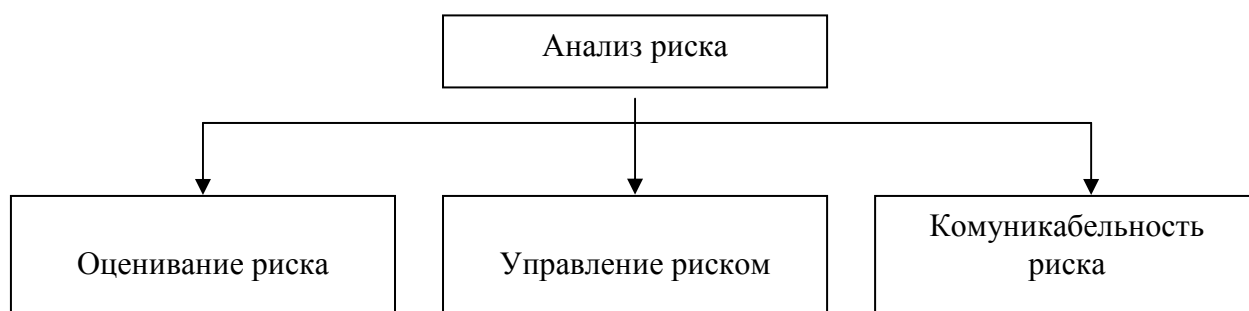
Наибольшего внимания, по мнению А.Б. Качинского, заслуживает Заявление Американской Ассоциации Инженерных обществ "Анализы риска.



Процессы и применение" с 1996 года. Ключевым понятием здесь есть "анализ риска", что охватывает три состава (см. Схему 1.8).

Схема 1.8

Компоненты "анализа риска" по версии  
Американской Ассоциации Инженерных обществ



Первая составная оценивание риска (risk assessment) включает научные и технические проблемы. Компонентами "оценивания риска" являются:

Объективные	Субъективные
Оценка источника	Политика оценки риска
Оценка влияния	
Оценка эффективности влияния	
Характеристика риска	

Причиной возникновения риска социологи считают неопределенность и отсутствие исчерпывающей информации, которая заставляет сомневаться в том, что именно избранный вариант обеспечит наилучший результат".

Проблемой научного определения понятия "риск" есть его комплексный характер, который требует привлечения широкого круга ученых - представителей гуманитарных и естественных дисциплин. Здесь нужно применение методов системного анализа, учет всех факторов, которые предопределяют возникновение критических ситуаций и, соответственно, анализа всех последствий, к которым они могут привести.

Методология оценивания риска охватывает широкий спектр взаимосвязанных проблем и разных этапов: идентификацию факторов риска,

оценивание риска, управление риском, поэтому целесообразно рассматривать ее как схему, которая отвечает анализу риска. Очевидно, что само определение проблемы как "анализ риска" удостоверяет попытку системного подхода с точки зрения организации этого процесса вместе с логическим завершением в виде создания государственного механизма управления риском, включительно с элементами популяризации такого подхода".

Теория экономического риска бурно развивается в течение последних десятилетий в работах экономистов и социологов. Риск является неотъемлемой составной любых предпринимательских решений. Разработаны базовые математические модели принятия решений при условиях риска, изложены основные идеи анализа поведения страховых компаний и их клиентов и т.п.". От прогнозирования риска зависят инвестиции, кредиты, торговля, предпринимательское дело, на купле-продаже риска сформировался многомиллиардный страховой бизнес.

### 1.11. Компоненты "управление риском"

Составная управление риском (risk management) содержит экономические, правовые и политические аспекты. Компоненты "управление риском" на примере США приведены в таблице 1.4 .

Таблица 1.4

Компоненты "управления риском"

Объективные	Субъективные
Характеризованный риск	Восприятие риска
Сравнительная оценка риска	Политическое влияние
Оценка стоимости	Юридическое влияние
Оценка стоимость-польза	Неохваченные аспекты
Управленческие решения	

Такая важная составная как коммуникабельность риска (risk communication) предусматривает распространение информации о риске,

который представляет собой своеобразная цепочка "послание - источник (послание) - канал - абонент".

Американская Ассоциация Инженерных обществ разработала ряд рекомендаций относительно недопущения рисков.

Сущность их можно охарактеризовать так:

- всем федеральным агентствам целесообразно использовать единую терминологию в своих решениях, а для этого следует принять единую терминологию для процесса "анализ риска";
- всем агентствам, которые имеют отношение к опасным видам деятельности, естественных и финансовых рисков, целесообразно объединить свои усилия с Координационным комитетом по анализу риска;
- все социальные ценности следует учитывать, исходя из оценивания риска;
- специфические риски здоровью (смертности) должны рассматриваться как уменьшение продолжительности жизни конкретной группы населения;
- результаты анализа "стоимость-выгода", отображенные в стоимости отвернутого риска, должны стать подпочвой для правительственных решений;
- стоимость человеческого здоровья (смерти) может быть выражена в долларах на единицу времени сокращение продолжительности жизнь; основу этой величины должны составлять вероятностные оценки со статистическими верхними и нижними показателями достоверности;
- регулировочным агентствам целесообразно проводить сравнительные оценки риска и анализ на основании концепции "стоимость-выгода";
- характерный риск для акций, которые предполагаются правительством, следует сравнивать с обычными рисками, которые случаются в повседневной жизни; основой для сравнения целесообразно избрать стоимость, связанную с продолжением продолжительности жизнь, на основании статистических данных;
- все оценки риска, сделанные регулировочными агентствам, должны базироваться на результатах научных исследований; такие оценки должны

стать предметом изучения независимой экспертизы, позицию которой следует доводить до широких слоев населения;

- регулятивные органы, научные и инженерные силы, другие заинтересованные организации и общественность должны принимать участие в процессе анализа риска.

Общепризнанной дефиницией термина "риск" (среди научных работников естественного цикла) есть потенциальная угроза реализации техногенных или естественных чрезвычайных ситуаций с последствиями в виде вреда здоровью человека и окружающей среде или в виде материальных ущербов обществу и государству.

Для получения оценок риска, которые используют во время решения прикладных задач в науке и технике, применяют два показателя:

$P$  - вероятность (частота) возникновения события, которое приводит к нежелательным следствиям;  $W$  - масштаб следствий для заданной событий.

При этом для формализации риска  $R$  широко используют аддитивно-мультипликативную модель, которая связывает вероятность возникновения событий  $P_i$  (угроз) и соответствующих им нежелательных следствий  $W_i$  :

$$R = \sum P_i \cdot W_i, \quad (1.1)$$

в случае, если  $i = 1$

$$R = P \cdot W \quad (1.2)$$

С помощью формулы (1.1) риски можно объяснить как неопределенность относительно возможности события, которое приводит к нежелательным последствиям, и оценить масштабы этих последствий. Поскольку  $0 \leq P \leq 1$  и нормированный убыток  $0 \leq W \leq 1$ , ее можно использовать для анализа риска в виде четырех идеализированных ситуаций, которые являются обычным способом исследования поведения функций в математике.

а)  $P = 1, W = 0, R = 0$ .

Случай отвечает ситуации, если частота реализации события большая, а величина следствий для заданного события незначительная.

б)  $P = 0, W = 1, R = 0$ .

Случай отвечает ситуации, если событие наблюдается довольно редко, а величина следствий для них значительная.

с)  $P = 0, W = 0, R = 0.$

Случай отвечает ситуации с довольно редкими событиями и незначительными следствиями.

d)  $P \neq 0, W \neq 0, R \neq 0$

Случай отвечает ситуации, если наблюдается разная частота события и следствий. Она может оцениваться как опасная и характеризоваться соответствующей величиной риска.

Таким образом, риск - это векторная величина, которая определяется как произведение вероятности возникновения события, которое приводит к нежелательным следствиям, на величину следствия для заданного события. Риск является количественной мерой безопасности.

В настоящее время с понятием "риск" связан немало производных терминов, среди которых наиболее распространенными для прикладных исследований являются *индивидуальный* и *социальный* риски.

В этом плане различают:

- индивидуальный риск - вероятность испытания определенного вредного влияния вследствие деятельности человека. Влияние может быть мгновенным, вызванным аварией (взрывом, пожаром или токсичным выбросом), или постоянным при наличии отрицательных факторов, например токсичных соединений, в окружающей среде;

- социальный риск - соотношение между количеством людей, которые испытали влияние со стороны источника угрозы (погибли, заболели, травмировались и т.п.), и вероятностью такого события (авария, землетрясение, наводнение и т.п.). Применение этого критерия дает возможность определить количество людей, которые могут пострадать вследствие реализации нежелательного события.

В оценивании риска можно отметить четыре основных направления, причем все они имеют разные сферы применения и не лишены отдельных недостатков:

**Инженерный риск** - основные усилия направляются на собирание статистических данных об авариях и связанные с ними выбросы токсичных соединений в окружающей среде. В математическом моделировании разрабатывают математические модели процессов, которые приводят к нежелательным последствиям для человека и окружающей среды, в частности в случае использования вредных химических соединений.

**Экспертный риск** - при использовании первых двух подходов для оценивания риска часто происходят случаи, если ненадежны статистические данные или не совсем понятными являются отдельные принципиальные зависимости. Тогда единственным источником данных являются эксперты.

**Социологический риск** - широко известные исследования, в которых риск оценивают для разных видов деятельности, предлагаемых во время социологического опроса. С помощью этого метода определяют восприятие определенного риска населением вообще и отдельными группами.

Основой стратегии управления экологической безопасностью составляет концепция *ненулевого* риска. Она признает факт недостижимости абсолютной безопасности. Распространенная до недавнего времени концепция *нулевого* риска очень помешала народному хозяйству, здоровью людей, окружающей среде Украины. Чернобыльская авария доказала ошибочность этой концепции.

Стратегия управления риском может основываться на выборе уровня риска в границах от минимального к максимально допустимой. Вспомним распространенную в Нидерландах практику планирования промышленной деятельности и лицензирование нового предприятия.

Концепция *ненулевого* риска опирается не только на изучение факторов и источников повышенного риска, а и предлагает будущий ход событий, оценку последствий естественных и технологических катастроф. Если знать

вероятность таких катастроф и ожидаемую величину потерь, то можно избежать тяжелых катастроф, ослабить их благодаря альтернативным решениям, предусмотреть эффективные компенсационные механизмы. Разработка нормативных актов - законов, постановлений, инструкций - делает возможной реализацию запланированных мероприятий по экологической безопасности и является необходимым правовым элементом управления, которое оказывает содействие снижению риска.

Изучение риска как социального феномена открывает широкие возможности для решения проблем национальной безопасности, дает возможность, исходя из новых теоретических и методологических позиций, исследовать процессы социального экспериментирования, механизмы формирования государства современного политического и экономического типа.

Уровень национальной безопасности, что сложился и будет формироваться в Украине в будущем, определяют величиной риска как от возможных катастроф (естественных и техногенных), так и от отрицательных процессов, которые происходят медленно, но с течением времени могут привести к социальным взрывам (экологические проблемы, социальные конфликты).

Пренебрежение этими факторами в экономической и социальной политике государства может послужить причиной полного развала экономики, невозобновляемое уничтожение материальных ценностей, ухудшение здоровья населения, моральную и физическую деградацию общества и нанести тем самым значительный вред национальной безопасности Украины. Поэтому управление процессами, внедрение в общественную жизнь новых видов деятельности, развитие отдельных сфер научной и практической деятельности (атомная энергетика, экология, генетика, медицина и т.п.) требуют взвешенных решений на уровне правительства, государственных и межгосударственных организаций и

политических партий и учета уровня и меры риска для настоящего и грядущих поколений.

Отставание нашего государства в этой сфере становится угрожающей. Это ведет не только к дискредитации украинской науки, а и к неэффективности национальной промышленности, ее высокой аварийности и, что страшнее, к неоправданным человеческим жертвам. Поскольку оценивание рисков можно рассматривать как задачу принятия многокритериального коллективного решения, которое требует исследований в технических, экономической, социальной сферах, в повестке дня в Украине стоит создание системы административного управления риском. Эта система может стать координационным центром для воплощения в жизни главных идей анализа систем риска в Украине и охватить изучения рационального информационного простора как метода снижения риска в обществе.

### **1.12. Экстремальные ситуации: система критериев и признаков**

Выше уже отмечалось, что для кризиса всегда присущ фактор неожиданности. Тем не менее, в каждом кризисе можно выделить период (как правило, наиболее очевидный для аналитиков, которые потом будут изучать уже произошедший кризис), от которого зависит дальнейший ход событий. Кризис после определенного периода, разного по продолжительности и напряженности, вплоть до насильнических действий, со временем идет на убыль. Это, однако, не гарантирует от перерастания кризисных явлений в перманентный процесс, который вспыхнет снова, как только количество дестабилизационных факторов достигнет критической границы.

Для развертывания экстремальной ситуации характерны высокий уровень интенсивности событий и осознание лицами, которые принимают решение, того, что последствия кризиса и опасности могут быть непредвиденными, в значительной мере повлиять на формирование будущего, и потому все



решения - действовать немедленно, подождать, бездействовать вообще - являются чрезвычайно важными.

### *1.12.1. Факторы и гипотезы эскалации кризиса*

Не вдаваясь в рассмотрение кризисных ситуаций на международной арене (эта проблематика выходит за пределы нашего исследования), подчеркнем лишь основные положения, которые вытекают из проведенного анализа.

На возможность преобразования кризиса в открытый конфликт прежде всего влияет структура самой системы. Относительно меньшее количество случаев, если кризисы перерастали в конфликты и войны и резкое увеличение количества больших и маленьких конфликтов в посткоммунистический период приводят к мнению, что эскалация кризиса вероятнее в многоцентриковой среде, чем в двухполярной системе. Наличие многих "центров силы" расплывает кризисное влияние, а отсутствие общепризнанного "жандарма" не обеспечивает необходимых сдерживающих факторов. И вдобавок наличие многих центров силы увеличивает соблазн возникновения коалиций, возможностей маневра, неадекватных ситуаций.

Наиболее часто переход кризиса в экстремальную ситуацию обусловлен уровнем угрозы национальным интересам, а в распоряжении тех, кто принимает решение, являются силовые средства и материальные ресурсы, достаточные, по их мнению, для достижения поставленной цели. Прямая опасность конфликта существует, если ресурсы подготовки и ведение боевых действий выдаются достаточными, вооруженные силы - способными к победе, а международным давлением и требованиями мирного урегулирования можно презреть.

Обычно эскалация кризиса сопровождается провозглашением сторонами конфликта лозунга "беспроблемного" сохранения территориальной целостности, наоборот ли, возвращение "законных"

территорий, увольнение этнических "братьев" и единоверцев (вплоть до провозглашения джихада), возрождение обиженного достоинства или приниженного влияния.

Экстремальные ситуации международного характера имеют свою специфику и особенности. Общие параметры возникновения их представляют интерес для нашего исследования.

Воспользуйтесь, в частности, исследовательскими приемами, предложенными американским экспертом по вопросам кризисов и конфликтов Майклом Бретером. Он рассмотрел разные варианты гипотез эскалации кризиса, которые дают возможность объяснить, проанализировать и спрогнозировать возможность возникновения экстремальных ситуаций.

Гипотеза 1. Кризис может перерасти в полномасштабную экстремальную ситуацию при таких условиях:

- возникает в разбалансированной структуре;
- отбивает разногласия формационных изменений, порождается расхождением интересов разных слоев населения;
- есть составная "хронического" конфликта;
- в противостояние втянуто большинство населения, немало разных интересов поставлено на карту;
- разногласия отбивают несколько взаимосвязанных проблем.

Гипотеза 2. Кризис имеет наиболее шансов послужить причиной экстремальных следствий:

- имеются все условия, приведенные в гипотезе 1;
- противостояние подавляет авторитарный режим, отсутствуют основы демократии (или ими пренебрегают);
- силы участников кризиса явно неравны;
- сильные союзники (в частности внешние) предоставляют активную воинскую помощь участникам конфликта.

Гипотеза 3. Кризис имеет наиболее шансов перерасти в жестокое противостояние, если:

- есть все условия, приведенные в гипотезах 1 и 2;
- поводом к эскалации кризиса послужили необыкновенные ситуации, в особенности проявление насилия;
- оппозиционная сторона ответила адекватными действиями (вплоть до насилия).

Гипотеза 4. Властные структуры могут допустить эскалацию кризиса или перехода его в полномасштабный конфликт, если:

- социум возглавляет недемократический режим;
- имеющийся хронический конфликт власти с оппозицией;
- оппозиция считает силовое давление (административное, финансовое, идеологическое) главным средством влияния;
- социум находится в состоянии острой внутренней нестабильности, или это молодая только что родившаяся единица.

Гипотеза 5. Государство (социум) имеет наиболее шансов оказаться в экстремальной ситуации (вплоть до насилия), если есть все условия, перечисленные в гипотезе 4, и в особенности - если поступает поддержка из-за границы.

Гипотеза 6. Государству наиболее часто угрожает эскалация кризиса, перехода его в экстремальную ситуацию и прямую вспышку конфликта, который сопровождается насилием, если:

- внутренний кризис дополняется внешнеполитической дестабилизацией и характеризуется всеми условиями, перечисленными в предшествующих гипотезах;
- в стране властвует дискредитированный режим;
- государство неспособно найти реальный выход из кризиса.

Методологические основы применения экспертных технологий для оценивания риска в социальных системах в контексте анализа следствий Чернобыльской катастрофы /20/ обоснованы коллективом научных работников Института социологии НАНУ Украины.

На основании определения социальных критериев и показателей экспертизы экстремальных ситуаций осуществляются исследования, которые дают возможность оценивать и прогнозировать, как под влиянием социальных, правовых, экономических и политических изменений в жизни общества, происходит возрастание социальной напряженности, возникновение острых политических и социальных проблем, оценить привлекательность инвестиционного климата, проявлять потенциальные направления развития социальной и экономической политики, разрабатывать соответствующие положительные решения, оценивать риск социальных трансформаций.

В этом плане целесообразно воспользоваться информационно-аналитическими технологиями обработки мониторинговой социальной и экономической информации, методом фокус-групп в разных социальных структурах, системными исследованиями интересов главных действующих сил и распределением их на социальной арене, оценкой риска имплементации принятых решений в жизни. Именно эти методы и технологии используют в своей деятельности разные ситуационные и аналитические центры.

Одним из важнейших задач государственного управления есть создание системы индикативного оценивания кризисных ситуаций и их напряженности, комплексная оценка, ситуационного анализа и прогнозирования вероятных сценариев развития и последствий принятых решений.

Ю.И. Саенко отмечает, что в большинстве случаев социологический прогноз опирается на экстраполяцию уже имеющихся процессов (речь идет о прогнозе постоянных процессов). Однако в социальной жизни метод экстраполяции не всегда уместен, поскольку не учитывает незаметных качественных изменений и того, что каждый процесс предопределяет много факторов, которые изменяются, причем вместе с тем изменяется и соотношение и приоритетность между основными и второстепенными

факторами - одни переходят в другие и наоборот. Огромное количество изменений, тенденций, процессов, присущих социальной ситуации и трансформационным процессам, практически делает невозможный обычный логический анализ и прогноз. Лишь системный подход с применением мониторинговых и экспертных информационно-аналитических технологий может дать приближенное к реальности представления о социальных событиях и следствиях их во времени, обеспечить вероятное прогнозирование и оценку меры риска кризисных явлений и перерастание их в экстремальную ситуацию.

В процессе обоснования определенное решение с применением информационно-аналитических технологий различают две основных фазы: первая - фаза собирания, обработка и анализа информации, вторая - очень ответственная: принятие управленческих решений на основании смоделированной и рекомендованной структуры.

Эта фаза управления может объединяться с анализом его успешности и собиранием соответствующей информации (индикаторов) относительно возникновения текущих рисков и результатов применения разных подходов к организации управленческой деятельности.

Вместе с тем, причинно-следственные связи в большинстве социально-экономических систем имеют запутанный характер, который делает анализ, принятый в теории систем распределение объектов на "вход" и "выход" во многих случаях невозможным или крайне сложным. При этих условиях возрастает роль социального проектирования, целью которого является обеспечение оптимальных условий для возникновения, развития и функционирования новых объектов в интересах общества, создание оптимальных условий работы и жизнь для всех, кто будет работать на этих объектах или будет жить рядом с ними, а также максимальное предотвращение возникновению социальной напряженности среди населения.

Технология формирования социального проекта предусматривает такие элементы:

- разработка программы и комплекса методик получения и анализа информации, необходимой для выявления "поискового проблемного поля", что характеризует объект;
- определение "технологической карты", что содержит описание всех этапов сбора информации, нужной для имитационного моделирования или построения аналитических многофакторных моделей (соответствующих нормативных режимов деятельности, то есть правовых, финансовых параметров и т.п.);
- анализ разного рода возможных социальных и экологических последствий от запланированных преобразований (правовых, научно-технических, экономических, территориальных, социально-психологических, историко-культурных и т.п.). Это требует изготовления качественных критериев оценивания преобразований и, по возможности, формализованных принципов расчета социального и экологического эффекта;
- проверку жизнеспособности социального проекта, включительно с экспертной апробацией.

Опираясь на эти методологические основы, Ю.И. Саенко приходит к выводу, что социальное проектирование расширяет масштаб управления социальными объектами, так как рядом с макро-социальными процессами, инструментом анализа которых есть модель исторической и социальной ситуации, к исследованию привлекаются микросоциальные процессы, инструментом анализа которых есть жизненные ситуации людей. Это дает возможность учитывать личностные предпосылки социального развития общества, то есть соотносить социальные последствия от внедрения инноваций с социальным самочувствием и благополучием людей, с одной стороны, и с социально-экономическими, экологическими процессами в региональном и национальном масштабах - с другой.

И вдобавок возникает возможность исследовать "точки напряженности", которые в перспективе могут привести перерастание социальных проблем в отрицательные жизненные личностные ситуации. Большое значение имеет также многомерная "сценарная" разработка комплексов управленческих решений с соответствующей оценкой их последствий относительно макро- и микросоциальных процессов.

### *1.12.2. Признаки чрезвычайных (экстремальных) ситуаций*

Чрезвычайные ситуации (как ситуативная составная экстремальных ситуаций), которые могут возникнуть на территории Украины и отрицательно повлиять на функционирование объектов экономики и жизнедеятельность населения в мирное или военное время, распределяют за такими основными признаками:

- по сфере возникновения;
- по отраслевой принадлежности;
- по масштабам возможных последствий.

По первым основным признаком чрезвычайные ситуации распределяют по характеру возникновения на: техногенные, природные, социально-политические и военные.

Чрезвычайные техногенные ситуации классифицируют по типам аварий (катастроф). Чрезвычайные ситуации техногенного характера классифицируют по характеристикам явлений, которые определяют особенности действия факторов поражения на людей, окружающую среду и объекты хозяйственной деятельности. Различают аварии (катастрофы), которые сопровождаются выбросами опасных веществ, пожарами, взрывами, затоплениями, аварии на инженерных сетях и системах жизнеобеспечения, аварии, связанные с разрушением домов и сооружений, аварии транспортных средств и т.п.. Аварии (катастрофы), которые связаны с выбросами опасных веществ, дополнительно классифицируют на

радиационные, химические, биологические, а также различают по видам распространения веществ в окружающей естественной среде (см. Приложение 1).

Естественные чрезвычайные ситуации классифицируют по видам возможных естественных явлений, которые приводят к их возникновению. Это опасные геологические, метеорологические, гидрологические морские и пресноводные явления, деградация грунтов или недр, естественные пожары, изменение состояния воздушного бассейна, инфекционная заболеваемость людей и сельскохозяйственных животных, массовое поражение сельскохозяйственных растений болезнями и возбудителями, изменение состояния водных ресурсов и биосферы.

Каждый класс стихийных бедствий классифицируется по характеристикам явлений, которые касаются особенностей действия факторов поражения на людей, окружающей среды и объектов хозяйственной деятельности.

Чрезвычайные ситуации социально-политического характера, связанные с противоправными действиями террористического и антиконституционного направления, разделяют на: осуществление или реальную угрозу террористического акта, похищение или уничтожение судов, захват заложников, установление взрывных устройств в общественных местах, похищение или захват оружия, обнаружение устаревших боеприпасов и т.п..

К чрезвычайным ситуациям военного характера, обусловленным применением оружия массового поражения или обычных средств поражения, относят те, во время которых возникают вторичные факторы поражения населения вследствие разрушения атомных или гидроэлектрических станций, составов и хранилищ радиоактивных и токсичных веществ и отходов, нефтепродуктов, взрывчатки, транспортных и инженерных коммуникаций и т.п.

По второму признаку (отраслевой принадлежностью) чрезвычайные ситуации разделяют на ЧС, возможные: в строительстве, промышленности,



жилой коммунальной и бытовой сфере обслуживания населения, на транспорте, в сельском и лесном хозяйстве. Чрезвычайные ситуации на транспорте дополнительно делятся в зависимости от вида транспорта на ЧС на воздушном, водном, наземном и на подземном транспорте.

Учитывая территориальное распространение, характер сил и средств, примененных для ликвидации последствий, различают чрезвычайные ситуации:

- общегосударственного уровня, если чрезвычайная ситуация охватывает территорию двух или больше областей (Автономную Республику Крым, города Киев и Севастополь) или угрожает трансграничным распространением, а также в случае, если для ее ликвидации необходимы материальные и технические ресурсы, объемы которых превышают возможности отдельной области по крайней мере на процент от объема затрат из соответствующей статьи бюджета;
  - регионального уровня, если чрезвычайная ситуация развивается на территории двух или больше административных районов (мест областного подчинения) или угрожает распространиться на территорию соседней области, а также в случае, если необходимые для ее ликвидации материальные и технические ресурсы превышают возможности определенного района и достигают процента от объема затрат из соответствующей статьи бюджета;
  - местного уровня, если чрезвычайная ситуация, которая выходит за пределы потенциально опасного объекта, угрожает распространением опасности или ее вторичных последствий на окружающую среду, соседние населенные пункты, инженерные сооружения, а также в случае, если для ее ликвидации необходимы материальные и технические ресурсы, которые превышают собственные возможности потенциально опасного объекта, но не менее чем на процент объема затрат из соответствующей статьи бюджета.
- Чрезвычайными ситуациями местного уровня считают те, что возникают на

объектах жилищно-коммунальной сферы, которые не входят в утвержденные списки потенциально опасных;

- объектного уровня, если чрезвычайные ситуации не подпадают под единую классификационную позицию.

Риск перехода чрезвычайной ситуации в сугубо социальное измерение и соответствующую экстремальную ситуацию существует в случае обострения совокупности рисков. Ныне нет однозначного понимания сущности этого процесса, который поясняется, в частности, многоаспектностью явления, игнорированием вероятности его законодательством в реальной практике и управленческой деятельности. В частности распространенными являются такие характеристики риска:

Прежде всего, это потенциальная, количественно измеренная возможность потери, которая характеризуется неопределенностью и которая может модифицироваться в зависимости от дальнейших неблагоприятных последствий. При этих условиях понятие риска транслируется как неопределенность результатов в будущем.

Далее: это неопределенность события, которое ведет не только к потерям (финансовых, материальных, человеческих), но и непосредственно предопределяет опасность социальных потрясений и конфликтов. И, в конце концов, вследствие трансформационных процессов возникает вероятность потери суверенитета государства и ценностей нации, прежде всего этнических и идеологических.

Разработка соответствующих научных рекомендаций и мероприятий требует расширение связей, обмена идеями между специалистами промышленности, системы государственного управления, экологии, здравоохранения, науки и образования, овладение современных методов анализа риска нестандартных ситуаций лицами, ответственными за принятие решений. Особенно актуальным является разработка базы согласованного, многоуровневого управления эколого-экономическими системами, правовой

и страховой систем, проведение комплексного оценивания влияния хозяйственной деятельности на окружающую среду и т.п..

Поскольку ошибки во время принятия соответствующих решений стоят обществу весьма дорого, в особенности, если речь идет об анализе риска, то требуется ускоренное внедрение таких мероприятий как: новые информационные технологии, автоматизация экологического управления, математическое моделирование оценивания деградации окружающей среды под влиянием антропогенных факторов, пакеты программ для принятия решений в условиях риска, экспертные системы для принятия решений в случае экологических и техногенных катастроф.

Работа, которая будет осуществляться в границах государственной программы, дает возможность избрание наилучшей системы мониторинга, который даст возможность комплексно оценить влияние хозяйственной деятельности на окружающую среду, усилить мероприятия, направленные на укрепление безопасности работы предприятий, переосмыслить цели и приоритеты системы здравоохранения, предотвратить социальные конфликты, которые могут обусловить экологические проблемы.

Указанная схема анализа предусматривает широкий спектр исследований взаимосвязанных проблем и разных этапов: идентификацию факторов, оценивание их, управление процессом и т.п.. Особое значение имеет определение наиболее серьезных источников опасности и ранжирования их с целью выяснения реальной угрозы для человека и окружающей среды с помощью риска, определение порогов выносливости технических и экологических систем и в дальнейшем - использования имитационного моделирования.

В последнее время общественность все более внимательно относится к таким глобальным проблемам, как возможность изменения климата, разрушение озонового пласта, непредвиденные следствия генной инженерии, антропогенное влияние на природу и человека.

### *1.12.3. Чрезвычайные ситуации техногенного и естественного характера*

Возрастание в мире масштабов хозяйственной деятельности, использование в производстве в больших объемах потенциально опасных технологий и веществ увеличивает вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций, внезапный характер которых приводит к значительным социально-экологическим и экономическим убыткам. Появляется нужда в защите людей от действия вредных для здоровья факторов поражения, применение спасательных, неотложных медицинских и эвакуационных мероприятий, а также ликвидации отрицательных последствий, вызванных чрезвычайными техногенными ситуациями.

Эти проблемы являются весьма актуальными для Украины. Потенциальную опасность содержат, в частности:

- наличие развитой промышленности, сверхвысокая концентрация ее в отдельных регионах;
- существование больших промышленных комплексов, большинство из которых являются потенциально опасными из-за концентрации на них оснащения большой и очень большой мощности;
- высокий уровень износа основных фондов, который приближается к критическому;
- развитая сеть транспортных коммуникаций, а также нефте-, газо- и продуктопроводов;
- значительное количество энергетических, в частности атомных объектов;
- разветвленный комплекс жилищно-коммунальных объектов;
- воинская инфраструктура с большими объемами вооружения и накопленных боеприпасов;
- чрезмерное использование потенциально опасных веществ и т.п.

Все эти факторы увеличивают вероятность возникновения чрезвычайных техногенных ситуаций, которые несут угрозу и для человека, и для экономики и для окружающей среды.

Чрезвычайные ситуации техногенного характера могут возникать в каждом городе, населенном пункте, районе, области или регионе государства. Красноречивые примеры опасности техногенного кризиса в столице Украины приведен ведущими учеными на заседании "круглого стола", который состоялся в ноябре 2003 года. В частности, по свидетельству академика Л. Лобанова, все киевские мосты являются ограниченно пригодными для эксплуатации, а в общеукраинском масштабе две трети из них (те, что находятся в распоряжении коммунальных служб) вообще не отвечают нормам безопасности. Академик И. Походня подчеркнул, что катастрофически стареет и недостаточно обновляется парк самолетов, академик В.Панасюк оценил лифтовое хозяйство как "архизаброшенное".

Не лучше дела и в других сферах жизнедеятельности - от канализационных систем и водоснабжения до тепловых и атомных электростанций. Так, целиком заамортизовано 5,3 тыс. км канализационных сетей, в аварийном состоянии находятся 17,2 тыс. км сетей водоснабжения, 80% оборудования в энергетике отработало критические сроки и требует замены.

"Там, где возникают денежные интересы, там надежность падает, - указал доктор технических наук В. Гиренко. - У нас бизнес хочет мгновенной прибыли". Но без регулятивных государственных мероприятий здесь не обойтись.

Увеличивается также количество обращений со стороны населения в связи с чрезвычайными ситуациями. Выручает потерпевших спасательная служба, созданная по образцу американской "911". Ежедневно лишь в столице возникает близко 130 ситуаций (пожаров, аварий или дорожно-транспортных событий), которым срочно должны помочь спасатели.

Опаснейшими из них являются аварии (катастрофы) с выбросами радиоактивных, химических или биологических веществ, взрывы, пожар, прорывы водохранилищ, аварии на транспорте, в промышленности и других

областях экономики. В особенности опасными являются транснациональные аварии (катастрофы), в частности на АЭС и химических объектах.

Важно учитывать то, что сейсмически опасными в Украине являются: Карпатская, Крымско-Черноморская и Южно-Азовская зоны. В Закарпатской, Ивано-Франковской, Черновицкой, Одесской областях и Автономной Республике Крым сила землетрясений может достигать 7-8 баллов, а в некоторых других областях - 5-6 баллов.

Грязевые вулканы характерны для южной части Украины (Автономная Республика Крым и акватория Азовского моря), выбросы которых сопровождаются взрывами и локальными землетрясениями. За последние годы активизировались грязевые вулканы в зоне Южно-Азовского разлома, который приводит к возникновению новых островов и мелей в акватории Азовского моря и Керченского пролива.

Сели распространены в горных районах Карпат и Крыма, а также в некоторых местах на правом берегу Днепра. К катастрофическим принадлежат сели с объемом выноса 10-100 тыс. куб. м и периодичностью до пяти лет. В Крыму они случаются на 9% территории, в Закарпатской области - на 40%; в Ивано-Франковской - на 33%; в Черновицкой - на 15% территории.

Карстовые процессы распространены почти на 60% территории Украины, причем это очень опасные выходы открытого карста. В некоторых областях Украины уровень поражения карстовыми процессами превышает 60% территории, преобладают явления карбонатного, сульфатного и соляного карста.

Сдвиги грунтов распространены на 50% территории Украины, в особенности в Закарпатской, Ивано-Франковской, Черновицкой, Николаевской, Одесской, Харьковской, Днепропетровской областях и Автономной Республике Крым. На побережье Азовского и Черного морей частыми являются фронтальные сдвиги, обвалы характерные для отдельных районов Карпатских и Крымских гор. Абразивные процессы наиболее

распространенные на Черноморском побережье, а также угрожают почти 60% берегов Азовского моря.

В Украине случаются и опасные гидрологические явления: сильные сливы (Карпатские и Крымские горы); град на всей территории Украины; сильная жара угрожает Степной зоне; суховеи, засухи - это бедствие для Степной и восточной Лесостепной зоны; ураганы, шквалы, смерчи затрагивают преобладающую часть Украины; пылевые бури - юго-восток Степной зоны; сильные туманы - юго-восток Степной зоны; сильные метели - юго-восток Степной зоны; снеговые заносы - Карпаты; сильная гололедица угрожает Степной зоне; сильные морозы - север Полесья и восхода Лесостепной зоны; наводнения - бассейны рек; снеговые лавины часто бывают в Карпатских и Крымских горах; побережье и акватории Черного и Азовского морей испытывают штормы, ураганные ветры, смерчи, слив, обледенение сооружений и судов.

Наводнения случаются почти на всех речках Украины, а в Карпатах и Крыму имеют выраженный паводковый режим стока. Наводнения на горных речках (Днестр, Тиса, Прут и другие) формируются очень быстро, от нескольких часов до 2-3 суток. Высокие наводнения, присущих рекам Днепр, Днестр, Дунай и Северский Донец, образуют опасность возникновения катастрофического затопления во время прорыва дамб и плотин водохранилищ.

Естественные пожары в наибольшей степени поражают Степную, Полесскую и Лесостепную зоны, в Крымских горах очень распространены лесные и торфяные пожары.

Инфекционные заболевания людей и животных, биологическое поражение растений характерны для всей Украины, в особенности опасных уровней они достигают в южных областях и Автономной Республике Крым.

Чрезвычайные ситуации экологического характера обусловлены изменением состояния суши (катастрофические провалы, сдвиги, обвалы земной поверхности, эрозия, дефляция, химическое загрязнение грунтов

тяжелыми металлами, интенсивная деградация грунтов, невозпроизводимость естественных ресурсов), состава и свойств атмосферы (резкое изменение климата вследствие антропогенных факторов), превышение допустимых концентраций вредных примесей в атмосфере, температурная инверсия и недостаточность кислорода в атмосфере над горами, значительное превышение предельно допустимого уровня городского шума, возникновение зон кислотных осадков, разрушение озонового пласта атмосферы, гидросферы (истощение водных ресурсов, загрязнение морской среды) и биосферы присущи всей территории Украины, каждому региону, области, района, населенному пункту.

Чрезвычайные ситуации социально-политического характера могут возникать в любом городе, населенном пункте, районе, области или регионе Украины. Чрезвычайные ситуации военного характера с поражением населения вторичными факторами вследствие разрушения объектов экономики и воинской инфраструктуры возможны лишь в военное время на территории государства.

В системе гражданской обороны употребляют ряд характеристик и основных сроков относительно определения чрезвычайных ситуаций.

Приведем главные.

Чрезвычайная ситуация (ЧС) - нарушение нормальных условий жизни и деятельности людей на объекте или территории, обусловленное аварией, катастрофой, стихийным бедствием или другим событием, которые привело (могут привести) к гибели людей и (или) значительных материальных ущербов.

По классификации ЧС разделяют на классы и подклассы в зависимости от их характера.

Классификационный признак ЧС - техническая или другая характеристика аварийной ситуации, на основании которой ее относят к чрезвычайной.

Порог значения классификационного признака ЧС - определенные в установленном порядке технические или другие характеристики конкретной



аварийной ситуации, на основании которых ситуацию относят к чрезвычайной.

Экстремальное событие техногенного, экологического или естественного характера - событие, которое состоит в существенном резком отклонении от нормы протекания процессов или явлений.

Под нормой понимают такой ход процессов или явлений, к которой население и производство приспособились вследствие продолжительного опыта или специальных научно-технических разработок.

Техногенная чрезвычайная ситуация - состояние, при котором на объекте, на определенной территории или акватории нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей, возникает угроза жизни и здоровью, наносятся убытки имуществу, населению, экономике и окружающей среде.

Источник техногенной чрезвычайной ситуации - опасное техногенное событие, вследствие которого на объекте, определенной территории или акватории возникает техногенная чрезвычайная ситуация.

Катастрофа - большая по масштабам авария или другое событие, которое приводит к тяжелым трагическим последствиям.

Техногенная опасность - состояние, внутренне присуще технической системе, производственному или транспортному объекту, который реализуется в виде поражающего действия источника техногенной чрезвычайной ситуации на человека или окружающую среду в случае его возникновения, или в виде прямого или побочного вреда для человека или окружающей среды в процессе нормальной эксплуатации этих объектов.

Поражающий фактор источника техногенной чрезвычайной ситуации - составная опасного события, которое характеризуется физическими, химическими и биологическими действиями и проявлениями, которые имеют соответствующие параметры. Поражающее действие источника техногенного ЧС - отрицательное влияние одного или нескольких факторов поражения источника техногенной чрезвычайной ситуации на жизнь людей, сельскохозяйственных животных и растений, на субъекты хозяйственной

деятельности и окружающей среды. Зона техногенной чрезвычайной ситуации - территория или акватория, в границах которой распространяется отрицательное влияние одного ли совокупности факторов поражения источника техногенной ЧС.

Естественная чрезвычайная ситуация - положение на определенной территории или акватории, что сложилось в случае возникновения источника естественной чрезвычайной ситуации, которое может привести или привело к человеческим жертвам, нанесло вред здоровью людей, окружающей среде, причинило значительные материальные потери и нарушение жизнедеятельности людей.

Источник естественной чрезвычайной ситуации - опасное естественное явление или процесс, вследствие которого на определенной территории или акватории возникла или может возникнуть ЧС. Фактор поражения источника естественной ЧС - составная опасного естественного явления или процесса, обусловленная источником естественной ЧС, которая характеризуется физическими, химическими, биологическими действиями и проявлениями, которые имеют соответствующие параметры. Действие источника поражения естественной ЧС - отрицательное влияние одного или совокупности факторов поражения источника естественной ЧС на жизнь и здоровье людей, сельскохозяйственных животных и растений, объекты экономики и окружающей среды.

Опасное естественное явление - событие естественного происхождения или результат деятельности естественных процессов, которые по своей интенсивности, масштабу распространения и продолжительности могут поражать людей, объекты экономики и окружающую среду.

Стихийное бедствие - разрушительное естественное или антропогенное явление или процесс значительного масштаба, вследствие которого возникает угроза жизни и здоровью людей, разрушаются или уничтожаются материальные ценности и компоненты окружающей среды.

Природно-техногенная катастрофа - разрушительный процесс, который развивается вследствие нарушения нормального взаимодействия технологических объектов с окружающей средой, предопределяет массовую гибель людей, уничтожение и разрушение объектов экономики и компонентов окружающей естественной среды.

Зона естественной чрезвычайной ситуации - территория или акватория, на которой существует возможность возникновения естественной чрезвычайной ситуации.

Экологическая чрезвычайная ситуация - состояние на определенной территории или акватории, что сложилось в случае возникновения источника экологической чрезвычайной ситуации, которое приводит к обострению неблагоприятных изменений в среде проживания людей и, как правило, к массовой гибели живых организмов и экономических убытков.

Поражающий фактор источника экологической чрезвычайной ситуации - составная опасного стихийного бедствия, большой производственной или транспортной аварии, которые привели к обострению неблагоприятных изменений в среде проживания людей и, как правило, к массовой гибели живых организмов и экономических убытков.

Поражающее действие источника экологической чрезвычайной ситуации - отрицательное влияние одного или совокупности факторов поражения источника экологической чрезвычайной ситуации на жизнь и здоровье людей, сельскохозяйственных животных и растений и окружающей среды.

Зона экологической чрезвычайной ситуации - территория или акватория, на которой вследствие возникновения источника экологической чрезвычайной ситуации или распространения его последствий из других районов возникла экологическая ЧС.

Зона возможностей экологической чрезвычайной ситуации - территория или акватория, на которой существуют или могут возникать экологические чрезвычайные ситуации.

Экономические убытки от ЧС - оцененные соответствующим образом потери, вызванные этой ситуацией.

Общими признаками чрезвычайных ситуаций являются:

- наличие или вероятность угрозы гибели людей или значительное нарушение условий жизнедеятельности;
- задача экономических убытков;
- резкое ухудшение состояния окружающей среды.

С целью конкретного анализа факторов и опасностей, которые приводят к экстремальным ситуациям, целесообразно рассмотреть их в отраслевом аспекте.

#### *1.12.4. Угрозы экстремальных ситуаций (отраслевой аспект)*

Проблема угроз в отдельных областях деятельности разработанная как в теории, так и в известных практических рекомендациях. В особенности такие исследования активизировались в экономической сфере в 40-х годах минувшего столетия после выхода книги Неймана и Моргенштерна /21/, где американские ученые впервые исследовали проблему максимизации полезности индивидуума и прибыли фирмы с учетом фактора риска. Особое внимание они уделили исследованию финансовых и коммерческих рисков, включая рынок ценных бумаг, что имеет общеметодологическое значение. В частности, в финансовом деле риск определяется как отклонение желательных результатов от желаемой или средней величины. Его также рассматривают, как шанс понести урон или получить доход от инвестирования в определенные проекты. В проблеме риска различают уровень риска, который определяют путем сравнения рискованности тех или других взносов, и риск во времени, который в экономике иногда называют возрастающей функцией времени и который означает, что чем длиннее срок взноса, тем больше риск.

По методам аналогии подобные разработки целесообразно использовать в других исследованиях, в частности в отраслевом аспекте.

**Энергетика.** В начале 1970-х лет в мире наблюдалось бурное развитие вероятностного анализа безопасности атомных станций. К понятию "риск" включали вероятность события и его последствия (выбросы и сбросы радиоактивных веществ за границу АЭС), вероятные климатические параметры в момент аварии, опасность облучения человека разными способами, вероятность нанесения вреда здоровью вследствие облучения. Таким образом, за величину безопасности брали "риск" для жизни человека, который живет вблизи атомной станции, учитывая возможные аварии.

Со временем вероятностный анализ безопасности атомных станций начали использовать как способ оценивания безопасности конкретного блока станции в плане эффективности функционирования систем безопасности и мероприятий предотвращения аварий. Величину риска в этом случае оценивают как произведение вероятности выброса (сброса) радиоактивных веществ на вероятность (частоту) таких выбросов за год. Это дало возможность сравнения состояния безопасности разных блоков АЭС.

Позднее еще больше упростили вероятностный подход к оцениванию состояния безопасности АЭС. Поскольку значительные выбросы радиоактивных веществ случаются вследствие разрушения активной зоны, за критерий безопасности берут вероятность (частоту) разрушения (повреждения) активной зоны реактора за год.

**Промышленная безопасность.** В настоящее время наиболее распространенным методом оценивания вероятности реализации событий с тяжелыми последствиями на промышленных объектах является "дерево событий", которое дает возможность определять вероятность выхода из строя любого узла по известным вероятностям отказа его элементов.

В фундаментальной монографии В.Маршала "Основные опасности химических производств" /1/, посвященной научным проблемам

промышленной безопасности, рассмотрены индивидуальный и социальный риски и приведены такие их определения:

- индивидуальный риск - частота возникновения поражающих влияний определенного вида, которые возникают при реализации определенных опасностей в определенной точке пространства, где в данный момент может находиться индивидуум. Характеризует распределение риска;

- социальный риск – зависимость риска (частота возникновения) событий, состоящих в поражении определенного числа людей, подвергаемых поражающим воздействиям определенного вида при реализации определенных опасностей, от этого числа людей. Характеризует масштаб катастрофы.

### **Строительство. Организация и выполнение обследований, оценки технического состояния и паспортизации зданий (сооружений)**

Владелец здания (сооружения) в сроки и в случаях, отмеченных в ” Нормативные документы по вопросам обследования, паспортизации, безопасной и надежной эксплуатации производственных зданий и сооружений. К.: НИИСП, 2003. — 144 с” обязан обеспечить обследование зданий (сооружений) путем привлечения на договорных началах для выполнения этой работы специализированной организации (организаций).

Для организации указанной работы владелец здания (сооружения) издает приказ (распоряжения) по предприятию (организации) с определением объектов, которые подлежат обследованию; видов и сроков обследований; лиц, которые отвечают за составление договора и организационно-техническое обеспечение работ; источники финансирования. Методы и объемы отдельных видов работ и исследований детализируются в техническом задании, которое прилагается к договору. В договоре обуславливаются также обязательства сторон относительно выполнения подготовительных и вспомогательных работ. Результаты обследований и оценки технического состояния здания (сооружения) рекомендуется представлять в виде технического отчета специализированной организации,

который представляется владельцу здания (сооружения) и используется им для заполнения Паспорта технического состояния здания (сооружения) и принятия обязательных мер для его безопасной эксплуатации.

Владелец здания (сооружения) при организации и проведении обследований несет ответственность за:

соблюдение сроков и видов обследований;

своевременное составление договоров и полное финансирование работ по обследованию зданий (сооружений);

полноту и достоверность представленной технической документации; своевременное и качественное выполнение рекомендаций, выданных при обследовании здания (сооружения) специализированной организацией.

Специализированная организация, выполняющая обследование зданий (сооружений), несет ответственность за:

качество и достоверность материалов обследований и оценки технического состояния зданий (сооружений), которые обследуются, обоснованность выводов и рекомендаций.

При организации и выполнении обследований необходимо пользоваться технической документацией здания (сооружения), которое обследуется. Владелец здания (сооружения) обязан в течение всего срока эксплуатации здания (сооружения) сохранять и предоставлять специализированной организации техническую документацию в объеме пунктов 2.7, 2.10 ДБН А. 3.1-3-94, а также:

типовые проекты и решения, которые использовались;

акты рабочих и государственных (технических) комиссий;

проекты ремонтов, усилений и реконструкций, которые выполнялись за этот период;

отчеты об обследованиях и испытаниях конструкций, систем зданий (сооружений);

паспорт технического состояния здания (сооружения).

При отсутствии тех или других чертежей или документации допускается их восстановление владельцем здания (сооружения) путем копирования, обмеров и другими обоснованными способами.

Кроме технической документации на здание (сооружение), которая должна постоянно храниться у владельца здания (сооружения), рекомендуется при организации обследований предпринять меры по ее расширению и углублению за счет получения в проектных (авторы проекта), подрядных и иных организациях копий архивных документов, которые содержат:

расчетные схемы, статические и динамические расчеты конструкций;

исполнительные чертежи и производственную документацию заводоизготовителей конструкций;

фактические данные внутрицеховой и общезаводской среды (температурный режим, влажность воздуха, состав и интенсивность пылевывбросов, параметры агрессивных сред и др.);

фактические данные о режиме работы и нагрузке от основного и вспомогательного оборудования, о фактических нагрузках - от подвижного состава, от сырья и материалов;

Фактические данные об экстремальных природных явлениях (катастрофические наводнения, ураганы, обледенения, землетрясения и др.).

Сведения, которые невозможно получить из документов, могут определяться путем опроса эксплуатационного персонала, а также расчетами, обследованиями и изысканиями.

Плановые обследования зданий (сооружений) проводятся с распределением на такие этапы:

предварительное обследование, которое включает:

сбор и анализ технической документации;

общий осмотр с оценкой состояния конструкций и выявлением наиболее изношенных, а также аварийных конструкций;



составление программы инструментальных специальных обследований и технического задания на выполнение работ по обследованию;

детальное обследование, которое включает:

уточнение обмером сечений элементов, конструктивных схем нагрузок, определение приборами фактических физико-механических характеристик материалов (прочность, относительное удлинение, модуль упругости, плотность, теплопроводность и др.);

выявление, обмер, эскизирование дефектов и повреждений конструкций (смещения в плане, оседание, крены, прогибы и др.);

определение размеров деформаций швов и стыков, ширины раскрытия и глубины трещин, сечений арматуры, толщины защитного слоя бетона;

анализ результатов предыдущих инструментальных обследований;

специальные обследования, которые включают:

уточнение данных инженерно-геологических, инженерно-геодезических и иных изысканий;

испытание конструкций пробными нагрузками и воздействиями;

длительные наблюдения и измерения деформаций, осадок, кренов, температурно-влажностного режима и др.

В конкретных условиях, в зависимости от ответственности зданий (сооружений) и их состояния, некоторые этапы обследований могут не проводиться.

Специальные обследования рекомендуется назначать в тех случаях, когда данных предварительных и инструментальных обследований недостаточно для принятия обоснованного решения о техническом состоянии, функциональной пригодности и безопасности здания (сооружения).

В сравнении с обычными детальными обследованиями специальные обследования нуждаются в более длительных и точных наблюдениях, проведении изысканий, исследований, испытаний конструкций и сооружений в естественных условиях. Для выполнения специальных обследований

целесообразно привлекать головные по соответствующим проблемам научно-исследовательские институты и специализированные организации.

К специальным обследованиям рекомендуется относить:

сложные инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания (испытания большими штампами, испытания натуральных образцов на сдвиг, натурные фильтрационные испытания и др.);

длительные высокоточные геодезические наблюдения за осадками и деформациями;

натурные испытания конструкций и сооружений (статические, динамические, гидравлические, пневматические и др.);

другие сложные изыскания, испытания и исследовательские работы, связанные с определением технического состояния конструкций зданий (сооружений).

Итоги работы по обследованию и анализу его результатов необходимо оформлять в виде отчета специализированной организации, которая выполняла обследование.

В общем случае отчет должен содержать:

данные о технической документации, ее полноте и качестве, описание конструктивных решений, выводы о неудачных, устаревших и неверных решениях;

сжатое описание технологии строительства с указанием имевших место отклонений от проекта, а также дефектов, которые возникли на стадии строительства;

сведения, которые характеризуют проектный и фактический режим эксплуатации конструкций зданий (сооружений) и содержат данные о фактических нагрузках и воздействиях, а также о характере внутрипроизводственной среды;

результаты осмотра зданий (сооружений) с указанием состояния отдельных конструкций и частей;

сведения и схемы дефектов и повреждений конструкций;

результаты геодезических и иных измерений конструкций, неразрушающих методов контроля, других натурных исследований и испытаний;

результаты физико-механических испытаний образцов материалов, химических анализов материалов и среды;

результаты анализов дефектов, повреждений, а также причин их возникновения;

проверочные расчеты конструктивных элементов и систем;

выводы о состоянии конструкций и их пригодности к дальнейшей эксплуатации или ремонту;

сведения, необходимые для заполнения Паспорта технического состояния здания (сооружения);

сжатые технические решения относительно методов ремонта или замены дефектных конструкций, рекомендации по улучшению эксплуатации строительных конструкций и оснований.

Сведения и выводы, полученные при периодическом обследовании здания (сооружения) специализированной организацией, используются при заполнении “Паспорта технического состояния здания (сооружения)” (далее - Паспорт).

Паспорт является техническим документом владельца здания (сооружения), в котором содержится сделанный на основе объективных данных, полученных специализированной организацией в процессе выполнения инструментальных обследований, периодически уточняемый вывод о пригодности (или непригодности) зданий (сооружений) к дальнейшей эксплуатации. Паспорт оформляется владельцем здания (сооружения) при принятии объекта в эксплуатацию. Первая запись о техническом состоянии здания (сооружения) заносится в Паспорт владельцем здания (сооружения) на основе Акта государственной приемной комиссии о принятии в эксплуатацию законченного строительством объекта (Акт государственной технической комиссии о готовности законченного

строительством объекта к эксплуатации). Форма Паспорта приведена в ”Нормативные документы по вопросам обследования, паспортизации, безопасной и надежной эксплуатации производственных зданий и сооружений. К.: НИИСП, 2003. — 144 с.”.

С целью обеспечения надежности и безопасности эксплуатации здания (сооружения) владелец здания (сооружения) должен по итогам обследований и паспортизации принимать обязательные и своевременные меры по ремонту, реконструкции отдельных конструктивных элементов, систем или здания (сооружения) в целом. Ремонт, замена, реконструкция несущих элементов и ограждающих конструкций зданий (сооружений) могут выполняться только по проекту, разработанному специализированной проектной организацией, которая имеет соответствующую лицензию Головного центра по лицензированию Госстроя Украины.

При выявлении зданий (сооружений) или их конструктивных элементов в непригодном к нормальной эксплуатации или аварийном состоянии (III и IV состояния зданий (сооружений) или их отдельных конструкций) специализированная организация, выполняющая обследование, обязана сделать соответствующие записи в Паспорте с указанием сроков устранения дефектов и повреждений, а владелец здания (сооружения) обязан устранить их в указанные сроки.

Если обследование определило, что состояние объекта или его отдельных конструкций отвечает III или IV категории технического состояния, копия Паспорта в десятидневный срок после окончания обследования направляется представителем специализированной организации в реестр аварийноопасных зданий и сооружений в Научно-исследовательский институт строительного производства заказным письмом с сообщением о получении.

Данные дополнительного обследования также направляются обследующей организацией в Центр ведения реестра аварийноопасных промышленных зданий и сооружений.

Если органы или должностные лица, осуществляющие ведомственный или государственный надзор, не согласны с задекларированным владельцем техническим состоянием зданий и сооружений или выводами специализированной организации, то по их требованию владелец обязан заказать проведение государственной диагностики технического состояния здания или сооружения другой специализированной организации.

Требования относительно обеспечения надежности являются определяющими при разработке защитных мероприятий сооружений от чрезвычайных ситуаций естественного и техногенного характера. На основании рассчитанных оценок надежности сооружений избирают оптимальный вариант решений. Таким образом, надежность, безопасность и риск сводятся к определению вероятности выхода отдельных характеристик состояния объекта за границы допустимых значений (за рассчитанное время эксплуатации). При этом оценка убытков, которые возникают вследствие разрушения, работающих под нагрузкой оборудования и конструкций, очевидна, однако не определена. В границах этого направления под "риском" понимают вероятность катастрофического разрушения основных элементов оборудования и конструкций потенциально опасных объектов, которые априори известны и могут привести к значительным отрицательным последствиям

**Военное дело.** Объектами влияния опасных факторов считают отдельных военнослужащих, группы или категории военнослужащих, личный состав Вооруженных сил, население региона и страны в целом, промышленные и воинские объекты, их инфраструктуру, экономику страны, окружающую среду.

На основании рассчитанных оценок риска определяют состояние безопасности воинской службы для соединений, объединений и видов Вооруженных сил, а также для категорий военнослужащих в мирное и в военное время.

**Геология.** Качество территории как экологического ресурса геологического пространства характеризуется пригодностью конкретного участка литосферы для поселения и проживания на ней биоты, в частности жизнедеятельности человека. Собственно это оценка оптимальности эколого-геологической экосистемы в плане безопасного существования биоты вообще и населения, в частности. Поэтому известный специалист по оцениванию геологического риска Е.С. Дзекцер /22/ предлагает рассматривать влияние и условия, при которых возможно возникновение угрозы получения убытков человеку, хозяйственным объектам, окружающей среде, как факторы риска. Таким образом, геологический фактор риска - это влияние, которое с разной мерой вероятности приводит к возникновению экстремальной ситуации.

**Экология.** Главной задачей анализа риска относительно экологической безопасности является изучение разнообразных аспектов взаимодействия разных антропогенных факторов с элементами биосферы и последствий этого влияния с целью выяснения их характеристик и количественного оценивания отрицательного влияния. Анализ угрозы в экологии предусматривает такие этапы:

- изучение эффектов влияния разных факторов на окружающую среду: анализ реакций организмов, популяций, экологических систем на многочисленные взаимодействия в разных средах и последствий этого взаимодействия (болезни, смерть отдельных организмов, гибель популяций, экосистем);
- количественная оценка риска (этап математического моделирования), которая является вероятной характеристикой угрозы для окружающей среды в случае возможных антропогенных загрязнений. Математическое моделирование экологических процессов и систем с целью анализа риска – это, прежде всего выявление потоков соединений - биогеохимических циклов. Наиболее часто здесь используют линейные стационарные балансовые модели;

- управление риском. На этом этапе определяют эколого-экономические позиции допустимых нагрузок на область, регион с учетом экономических аспектов, в частности соотношения вида затраты - выгода.

Особенностью этого этапа является его многообразие. Он имеет важное значение для управления естественной средой и регулирования ее качества. Оценка риска для экологических систем основывается на объективных оценках экологического убытка. Примеры таких оценок - вероятность вымирания популяции или уменьшение растительного и животного царства.

**Медицина.** Количественная оценка риска здоровья населения от химических соединений является главной целью в стратегии защиты человека от загрязнений, которые постепенно накапливаются в окружающей среде и наносят ущерб людям, которые попадают под их влияние.

Оценивание риска в медицинских исследованиях - это комплекс для изучения, анализа и идентификации механизмов возникновения явлений, которые оказывают ощутимое влияние на образ жизни и состояние здоровья человека, с целью предотвращения упомянутых явлений. Результат анализа риска - оценка состояния здоровья части населения, которая испытывает влияние химических соединений и у которой можно ожидать проявление вредных для здоровья эффектов.

Сущность неблагоприятных эффектов легко можно изучить, но довольно тяжело определить вероятность возникновения их. Последнее определяют по двум факторам: вероятность того, что группы людей испытают влияние разных уровней загрязнений; вероятность того, что у этих людей возникнут вредные эффекты.

Эти два фактора отвечают двум основным направлениям исследования анализа риска - влияния и эффектам. Для количественной оценки риска используют математические модели, наиболее распространенными среди которых является модель Мантела-Бриана и так называемая "одноходовая модель"; применяют также косвенные методы исследований, включительно с экспериментами над животными, а также эпидемиологические наблюдения.

Наличие разных толкований понятия и показателей риска в отдельных сферах науки и практической деятельности на этапе становления науки о безопасности в целом и безопасность жизнедеятельности человека является закономерным и оправданным. Тем не менее, мерой осознания обществом потребности в научно обоснованной политике прогнозирования и противостояния угрозам безопасности человеку, обществу и государству возникает необходимость в разработке общего подхода, который бы учитывал методические, юридические, экономические и т.п. аспекты.

Важное теоретическое и практическое значение приобрела проблема риска для национальной безопасности Украины, учитывая трудные последствия чернобыльской катастрофы и разработки новых подходов к изучению взаимосвязи человека с окружающим естественной и социальной средой, а также изменения, которые происходят ныне в здоровье людей. В последнее время проблему риска изучают много научных дисциплин с точки зрения влияния вредных факторов. В частности, исследуют опасность алкоголя, папиросного дыма, наркотиков, применение в сельском хозяйстве пестицидов, а в медицине - определенных видов лекарства, ионизиционного облучения.

Во время анализа вероятности возникновения нежелательных эффектов вследствие действия химических загрязнителей возникают проблемы, обусловленные их свойствами: для высокостойких соединений, которые входят в рацион человека и вызывают отдаленные эффекты, главным является оценка вероятности возникновения нежелательных эффектов, а для нестойких веществ важнее оценить вероятность их действия.

Методологические основы идентификации факторов угрозы для окружающей среды и здоровья рассмотрены в ряде работ. К этим основам относят:

1. Предположения, что фактор риска возникает при наличии однонаправленной корреляции между присутствием (или возрастанием) признака и присутствием (или возрастанием) явления, которое изучается.



2. Такая связь может быть последовательной во времени. Для ее выявления нужны перспективные исследования. Мерой связи является частота возникновения новых случаев заболеваний за определенный период времени, поэтому в краткосрочных исследованиях невозможно доказать, что появляющийся признак является фактором риска.

3. Повторяемость выявленной связи при одинаковых условиях. Невозможность повторения в однотипной ситуации или повторение в разных условиях приводит к мнению о действии других закономерностей.

4. Признак считается фактором риска, если его связь с поражением является самостоятельной и независимой. Всегда следует помнить, что отсутствие информации о наличии других факторов риска не означает, что их не существует на самом деле.

5. Наличие величины риска, который достигает практического значения порогу отбора. Например, критерием признака как фактора риска может быть такая величина относительного риска, по которой поражение возрастает как минимум вдвое по сравнению с контрольной группой.

Признак признается фактором риска в тех случаях, если его связь с заболеванием окончательно не доказана и оценивается как вероятность. Наличие нескольких направлений оценивания риска делает возможным выбор системы мониторинга, который даст возможность по-новому определить цели и приоритеты соответствующей службы, усилить мероприятия, направленные на укрепление экологической безопасности.

Главной задачей анализа экологической безопасности является изучение разнообразных аспектов взаимодействия разных антропогенных факторов с элементами биосферы и последствий этого влияния с целью выявления характеристик и количественной оценки отрицательного их влияния.

Результаты анализа риска нужны для оптимизации условий жизни человека. Анализ риска как фактора национальной безопасности Украины, в частности ее экологических систем требует анализа разных видов взаимодействия человека с природой. Эта проблема давно интересовала

исследователей, и она всесторонне обоснована в методологическом аспекте. В частности, считается, что первым видом взаимодействия человека с природой является стихийное антропогенное взаимодействие, если человек в процессе хозяйственной деятельности использует естественная среда как определенный "амортизатор" между собою и источниками взаимодействия. Выбросы предприятиями отходов в окружающую среду служит примером такого взаимодействия.

Второй вид - взаимодействие с окружающей средой, которая предопределяет влияние на природу и преобразование биосферы. Это строительство городов, обработка сельскохозяйственных угодий, добыча полезных ископаемых открытым способом и т.п.

Третий вид - целенаправленное широкомасштабное преобразование окружающей среды. Это сознательное влияние. Примеры его - строительство водохранилищ, попытки вызвать дополнительные осадки и т.п.

Для построения математических моделей оценивания риска для экологических систем техногенных соединений и анализа влияния их на экосистемы необходимо ввести нелинейность и исследовать их на основании таких базовых характеристик, как иерархичность, нелинейность, открытость. Исходя из концепции риска, целесообразно использовать несколько стратегий управления экологической безопасностью:

- предотвращение причин возникновения катастроф вплоть до отказа от продукции опасных производств, закрытие аварийных объектов и т.п.;
- предотвращение возникновению чрезвычайных ситуаций в случае, если невозможно отвернуть последствия катастроф (строительство защитных сооружений, плотин, создание подземной экономики, заблаговременная эвакуация населения и т.п.);
- смягчение последствий катастроф, употребление стабилизационных и компенсационных мероприятий.

Наиважнейшей в плане главной цели управления безопасностью окружающей среды есть минимизация риска, то есть реализация первой и

второй стратегий. Впрочем, на практике это не всегда возможно. Наивероятнейшим является объединение всех трех видов стратегий. Распространенная до недавнего времени концепция нулевого риска, как уже отмечалось, очень помешала народному хозяйству, здоровью людей, окружающей среде в связи с Чернобыльской аварией.

Мировой опыт управления чрезвычайными ситуациями свидетельствует, что учет величины риска в случае организации предупредительных мер дает возможность избежать многих трагических последствий. Концепция ненулевого риска требует не только изучения факторов и источников повышенного риска, а и предусмотрение хода событий, оценивание последствий естественных и техногенных катастроф. Зная их вероятность и ожидаемую величину потерь, можно избежать в ряде случаев тяжелых последствий, находя альтернативные решения, ослабить их силу, предусмотреть эффективные компенсационные механизмы.

Итак, подчеркнем: важное значение имеет разработка нормативных актов (законов, постановлений, инструкций) и усовершенствование структуры и функций государственных учреждений, которые должны обеспечивать мероприятия по экологической безопасности.

## **Часть 2. Методы анализа и оценки риска аварий**

### **2.1. Подходы и методы анализа и оценки риска**

Последние годы активно развивается новый подход к обеспечению промышленной безопасности, основанный на принципах приемлемого риска и оптимизации защитных и природоохранных мер на основе управления риском. Главным постулатом данного подхода является утверждение, что абсолютная безопасность в принципе не достижима. Научным базисом такого подхода является вероятностный подход к обеспечению безопасности, а величина ущерба рассматривается совместно с вероятностью ее реализации. Система единых количественных критериев риска позволяет проводить комплексный анализ аспектов жизнедеятельности общества и на основе этого анализа принимать обоснованные решения по снижению уровня техногенного риска для населения и окружающей среды. Основным этапом управления безопасностью на основе принципа приемлемого риска является количественная оценка риска.

Под управлением риском в общем случае понимается комплекс законодательных, организационных, инженерно-технических, технологических и других мер, направленных на обеспечение безопасности (снижение риска).

Управление риском базируется на следующих трех основных принципах, вытекающих из концепции устойчивого развития и того обстоятельства, что ресурс человека и природы не ограничен: принцип оправданности практической деятельности; принцип оптимизации защиты; принцип обстоятельности.

#### **Принцип оправданности практической деятельности**

Любая деятельность, если польза от нее для общества не превышает ущерба от связанного с ней риска, не может быть оправдана. Польза для общества от какой-либо деятельности не всегда может совпадать с пользой

для отдельной личности, поэтому данный принцип должен быть дополнен следующими условиями: деятельность, при которой тот или иной индивидуум подвергается чрезмерному риску, не может быть оправдана, даже если эта деятельность выгодна для общества в целом; члены общества добровольно соглашаются на наличие в их жизни определенного риска от той или иной деятельности, не превышающего допустимого уровня, и находящихся в пределах традиционных изменений ущерба и выгод от этой деятельности; затраты на защиту каждой личности от чрезмерного риска (денежные компенсации, перемещения населения и т.п.) должны включаться в общую сумму затрат на данный проект и вид деятельности и учитываться при оценке полезности этого проекта или вида деятельности для общества в целом. При выборе конкретных мер защиты от чрезмерного риска необходимо в обязательном порядке учитывать мнение индивидуума, нуждающегося в защите.

### **Принцип оптимизации защиты**

Тактической целью управления безопасностью (риском) является максимизация общей выгоды, получаемой обществом от того или иного вида деятельности, выраженной в увеличении средней ожидаемой продолжительности жизни, в течение которой личность может вести полноценную деятельность в состоянии физического, душевного и социального благополучия.

Очевидно, что естественным критерием, определяющим степень достижения цели, должен выступать такой показатель социально-экономического развития, как стоимость продления жизни, позволяющий оптимизировать затраты на снижение различных видов риска.

Практическая реализация этого принципа сводится к мерам по уменьшению риска для общества в целом с компенсацией тем отдельным личностям или группам людей, которые подвергаются повышенному (но не чрезмерному!) риску в результате этих мер.

## **Принцип обстоятельности**

Политика управления риском будет эффективной и последовательной только в том случае, если в управление риском включен весь совокупный спектр существующих в обществе опасностей и общий риск от них для любого человека и общества в целом не превышает допустимый уровень.

Например, при разработке политики риском должно быть учтено взаимодействие между регионами. Необходимо добиваться кооперативных соглашений, которые были бы не только выгодны всем партнерам, но и эффективны. В таких соглашениях могут быть определены справедливые квоты вложений в меры обеспечения безопасности от общих для участников соглашения источников опасности.

При реализации этих принципов вновь необходимо напомнить, что безопасность – категория экономическая, однако не только в утилитарном плане. Снижение рисков и соответственное увеличение продолжительности жизни делает ее богаче как в моральном плане, так и в материальном.

Приведенные принципы носят общий характер и должны учитываться при разработке стратегии безопасности. На практике управление риском может быть сведено к принципиальной схеме приведенной на рис.2.1.

Мониторинг ЧС и анализ риска, т.е. определение плотности вероятности и частоты (повторяемости) возникновения опасных воздействий (источников) является исходной информацией для последующих процедур, включающих разработку возможных сценариев развития ЧС, применительно к рассматриваемому объекту и оценку вероятности ущерба того или иного уровня в случае реализации того или иного сценария.

Учет возможного воздействия ЧС даже только на определенный тип объектов приводит к рассмотрению значительного числа факторов, каждый из которых применяется в определенном, достаточно широком диапазоне, и может приводить к различным последствиям. Поэтому общая методология построения сценариев включает выделение из общего числа факторов наиболее важные и их ранжирование.

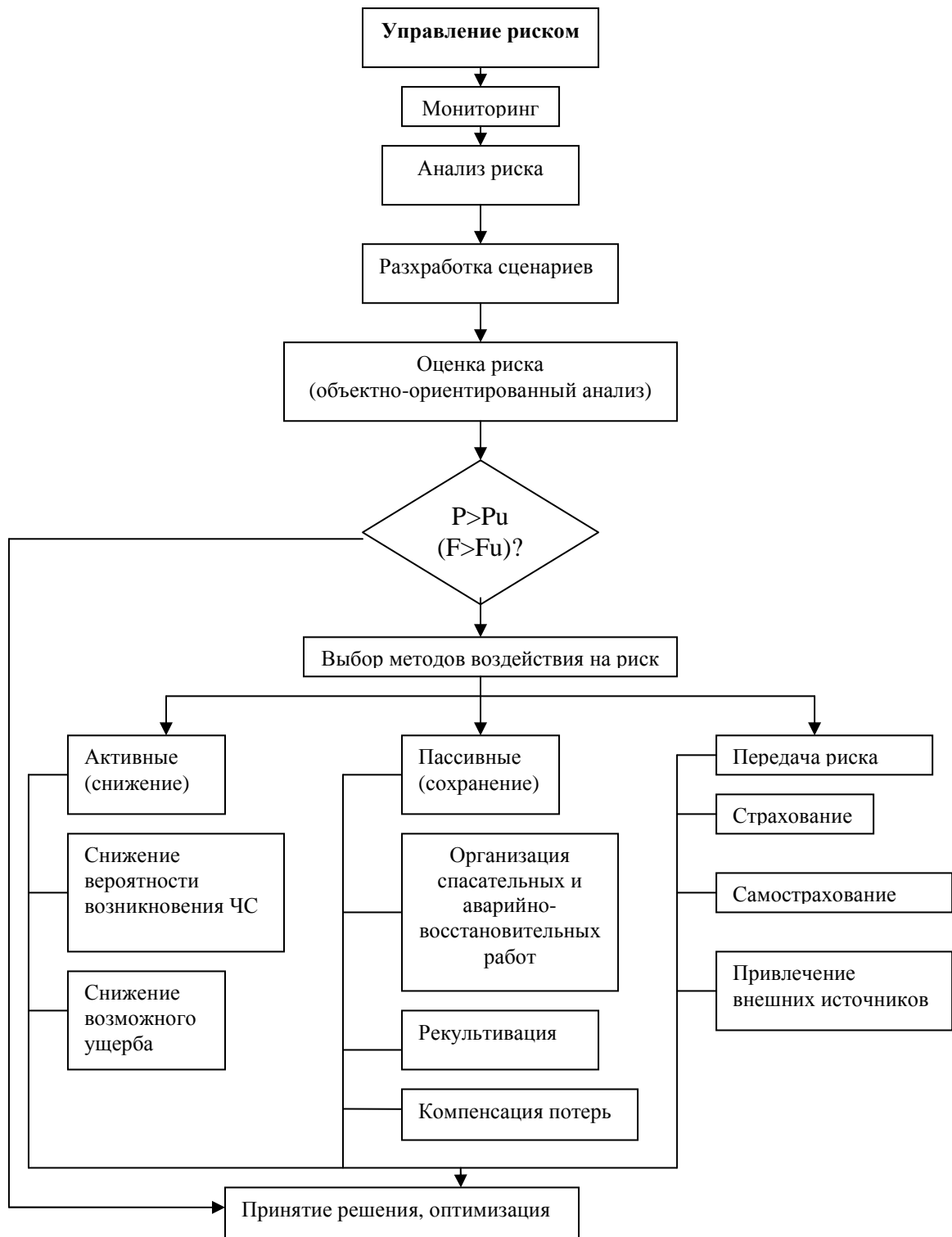


Рис. 2.1. Схема управления безопасностью (риском)

Последнее предполагает разбиение факторов и их параметров на группы в соответствии с производимыми последствиями для объекта, а также выделение некоторого среднего в пределах группы, наиболее полно

характеризующего всю группу. Таким образом, обычно выделяют три сценария: оптимистический, нормальный и пессимистический.

Анализ риска аварий на опасных производственных объектах (далее - анализ риска) является составной частью управления промышленной безопасностью. Анализ риска заключается в систематическом использовании всей доступной информации для идентификации опасностей и оценки риска возможных нежелательных событий. Системный подход к анализу техногенного риска требует рассмотрения источника риска – самой инженерной системы, ее потенциально опасной продукции и отходов производства, т.е. всего производственного цикла,- и его природного и социального окружения как единого целого. Кроме того, данный подход предполагает комплексную характеристику риска. С одной стороны, того, что связано с нормальным, штатным режимом эксплуатации объектов. Известно, что даже тогда, когда последние функционируют без нарушения технологического регламента, из-за несовершенства управления производством, в том числе вследствие недостаточной подготовки кадров, а также производственного и очистного оборудования, использование в технологических процессах потенциально опасных компонентов приводит к серьезному загрязнению окружающей среды с риском для здоровья людей и материальных и культурных ценностей.

С другой стороны, системный подход подразумевает анализ и того риска, который сопряжен с аварийными ситуациями, вызванными выходом инженерной системы из строя, либо грубым нарушением регламента эксплуатации такой системы (залповые выбросы), что может стать предпосылкой чрезвычайной ситуации «взрывного» типа. Следовательно, важно рассматривать как риск (вероятность) возникновения самой аварии, так и ее последствий и последствий штатной эксплуатации потенциально опасных объектов. Оценка риска должна характеризовать как вероятность наступления самого неблагоприятного события, например, аварии или выброса вредных загрязняющих воздух веществ «нормально» действующим



предприятием, так и вероятность негативных последствий этого события, например, заболевания или смерти человека.

Существует два основных подхода к анализу риска.

В рамках первого подхода рассматриваются три основных направления анализа риска, связанных с предметом системного анализа:

- 1) безопасность (надежность) технологических систем, включая аварийные ситуации;
- 2) воздействие токсичного загрязнения на здоровье человека и окружающую среду, в том числе медико-экологические последствия аварий и катастроф;
- 3) восприятие риска людьми (экспертами и рядовыми гражданами, общественностью).

Согласно второго подхода рассматривают следующие направления анализа риска:

- 1) измерение риска (восприятие его людьми, способы его количественного определения);
- 2) повышение безопасности крупномасштабных технологических систем, включая определение допустимого уровня риска (установление стандартов), выбор места расположения новых систем, анализ человеко-машинного взаимодействия, разработку более безопасных технологий, определение экономически оправданного уровня затрат на безопасность;
- 3) анализ, в том числе изучение причин возникновения, процесса развития и последствий аварий, организационно-управленческих проблем подготовки к возможным авариям и управления в чрезвычайной обстановке.

В рамках перечисленных направлений выделяется ряд подходов и методов, которые приведены в таблице 2.1.

Системный подход к анализу риска диктует необходимость разработки и совершенствования как инженерно-технологических, так и организационно-

управленческих методов и процессов, направленных на предотвращение и (или) минимизацию риска, вызванного техногенными источниками опасности. Таким образом, данный подход предполагает комплексную характеристику риска.

Таблица 2.1. Основные направления, подходы и методы анализа риска

Направления исследований	Подходы	Конкретные методы
Измерение риска	Инженерный	Деревья отказов, деревья событий
Анализ безопасности крупномасштабных технологических систем	Модельный	Метод «доза - эффект»*
	Экспертный	Экспертные оценки
	Социологический	Социологические опросы, анкетирование
Анализ аварийных ситуаций	Минимизация нового риска: выбор места расположения новой системы	Экономический анализ, линейное программирование (критерий оптимальности – минимум затрат), аксиоматический метод построения функции полезности, многокритериальный анализ (нормативно-дескриптивный подход), метод «затраты-выгоды»**
	Создание систем с внутренне присущей безопасностью	Инженерные методы
	Минимизация существующего риска: оптимизация человека-машинного взаимодействия	Эргономические методы, создание специальных экспертных систем
	Анализ реальных и потенциальных ситуаций	Статистический анализ, экономический анализ, сценарии, зонирование (составление карт)

\* Метод «доза-эффект». Под дозой понимается количественная мера вредного воздействия на организм, под эффектом – патологические или иные последствия этого воздействия.

\*\* Метод «затраты - выгоды» - метод анализа уровня безопасности, выраженного через величину риска. Под затратами понимаются расходы на осуществление мер безопасности, под выгодами – степень достижения безопасности. Здесь имеются ввиду затраты на предотвращение ущерба, выражающегося в ухудшении здоровья и гибели людей. Выгода оценивается по числу спасенных человеческих жизней в расчете на определенное количество денежных вложений.

С одной стороны, эта характеристика риска при нормальном, штатном режиме эксплуатации объектов. Известно, что даже тогда, когда объект функционирует без нарушения технологического регламента, из-за

несовершенства управления, в том числе вследствие недостаточной квалификации кадров, а также использование в технологических процессах потенциально опасных компонентов приводит к аварийной ситуации с риском для здоровья людей и сохранности материальных и культурных ценностей.

С другой стороны, системный подход подразумевает анализ и того риска, который сопряжен с аварийными ситуациями, вызванными выходом инженерной системы из строя либо грубым нарушением регламента эксплуатации такой системы (залповые выбросы), что может стать предпосылкой чрезвычайной ситуации «взрывного» типа. Следовательно, важно рассматривать риск, как самой аварии, так и ее последствий, а также риск последствий штатной эксплуатации потенциально опасных объектов.

С позиций системного подхода под **анализом риска** подразумевается процесс выявления и оценки возможных негативных последствий нарушений в работе технологических систем и представление этих последствий в количественных показателях.

**Оценка риска аварии** – процесс, используемый для определения вероятности (или частоты) и степени тяжести последствий реализации опасности аварий для здоровья человека, имущества и (или) окружающей природной среды. Оценка риска включает анализ вероятности (или частоты), анализ последствий и их сочетания.

Оценка риска должна характеризовать как вероятность наступления самого неблагоприятного события, например аварии или выброса в атмосферный воздух в режимах нормального функционирования, так и вероятность негативных последствий этого события, например заболевания или поражения людей в результате негативных воздействий.

Результаты анализа риска используются при **декларировании** промышленной безопасности опасных производственных объектов, **экспертизе** промышленной безопасности, обосновании технических

решений по обеспечению безопасности, **страховании**, экономическом анализе безопасности по критериям "стоимость - безопасность - выгода", оценке воздействия хозяйственной деятельности на окружающую природную среду и при других процедурах, связанных с анализом безопасности. Сведения, представленные в декларации промышленной безопасности, являются основой для принятия органами государственной власти объективных решений по обеспечению промышленной и экологической безопасности, предупреждению аварий и чрезвычайных ситуаций.

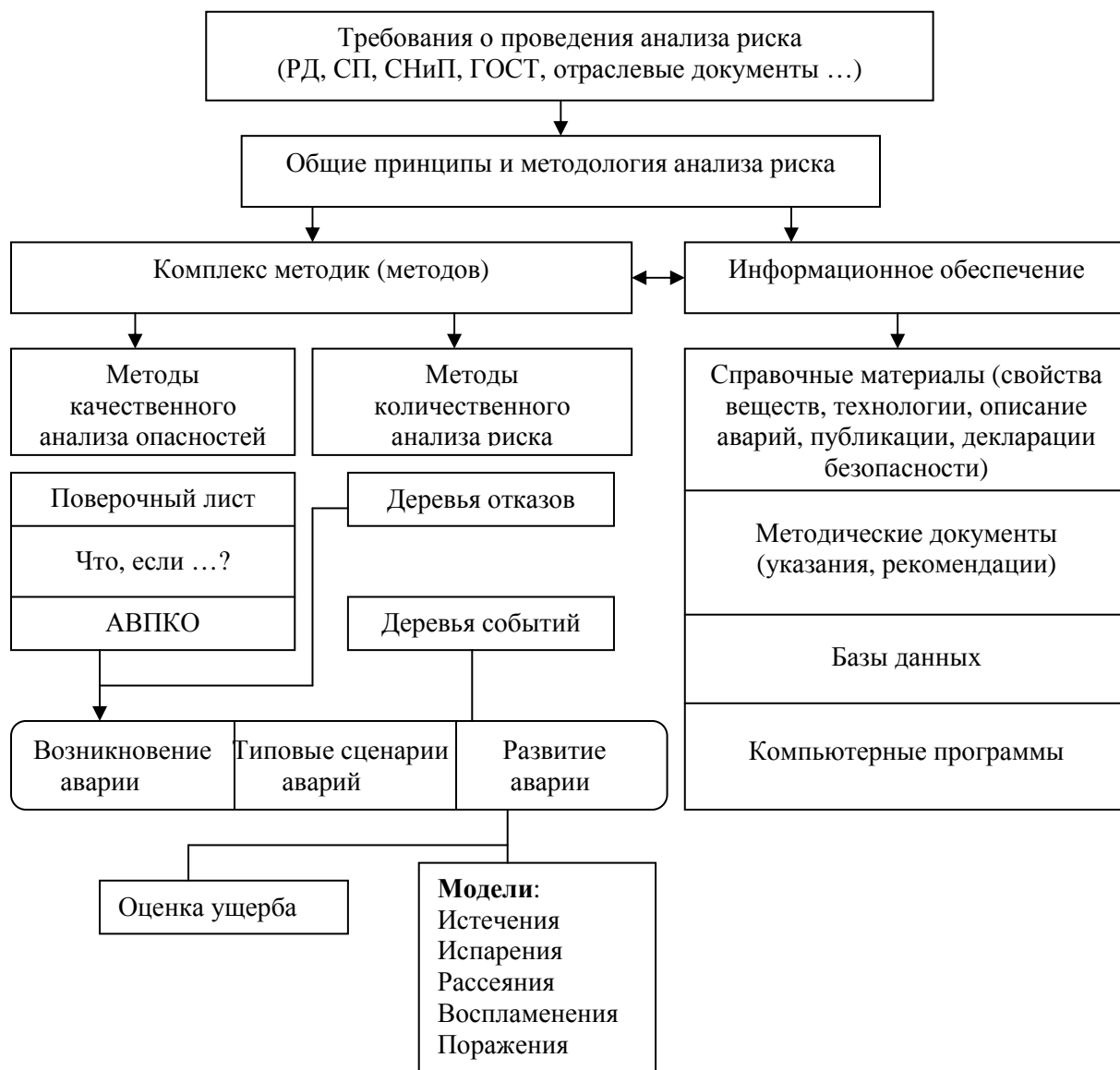


Рис.2.2. Основные элементы нормативно-методического обеспечения анализа риска

Для совершенствования нормативно-методической базы декларирования в части анализа риска необходима система мер, связанных с внедрением в нормативную документацию методологии анализа риска, разработкой соответствующих методик, руководств и справочных материалов, а также с разработкой **информационного комплекса**, включающего автоматизированные системы, базы данных по аварийности, надежности оборудования, инспекционной деятельности и т.д. Общая схема нормативно-методического обеспечения анализа риска представлена на рис.2.2. Для совершенствования нормативно-методической базы декларирования необходима система мер, связанных с внедрением в нормативную документацию методологии анализа риска, разработкой соответствующих методик, руководств и справочных материалов, а также с разработкой информационного комплекса, включающего автоматизированные системы, базы данных по аварийности, надежности оборудования, инспекционной деятельности и т.п.

Особое место при проведении оценки и (или) прогнозирования опасности (риска) занимает процедура анализа аварийных и нештатных ситуаций на объекте (рис.2.3.). При проведении подобного анализа предполагается отдельно рассматривать аварийные и нештатные ситуации.

Для повышения эффективности декларирования промышленной безопасности необходимо активизировать деятельность в следующих направлениях: внедрение методов качественного анализа опасностей и инженерных методов оценки риска; установление критериев приемлемого риска и безопасности; разработке методик, учитывающих основные стадии и эффекты аварийного процесса (истечения, распространения, рассеяния опасных веществ, воспламенения, оценки поражения людей и разрушения материальных объектов и т.п.) и объединенных на основе общих параметров в комплекс взаимосвязанных методик - экспертную систему; методик "прямого численного" моделирования аварийных процессов, основанных на численном решении уравнений, описывающих процессы разрушения

технических устройств и условия выброса опасных веществ в окружающее пространство; оценки параметров разлива нефти и нефтепродуктов по рельефу местности; оценки ущерба от аварий на опасных типовых производственных объектах; развития информационной базы и методов сбора и анализа данных об инцидентах, авариях на опасных производственных объектах.

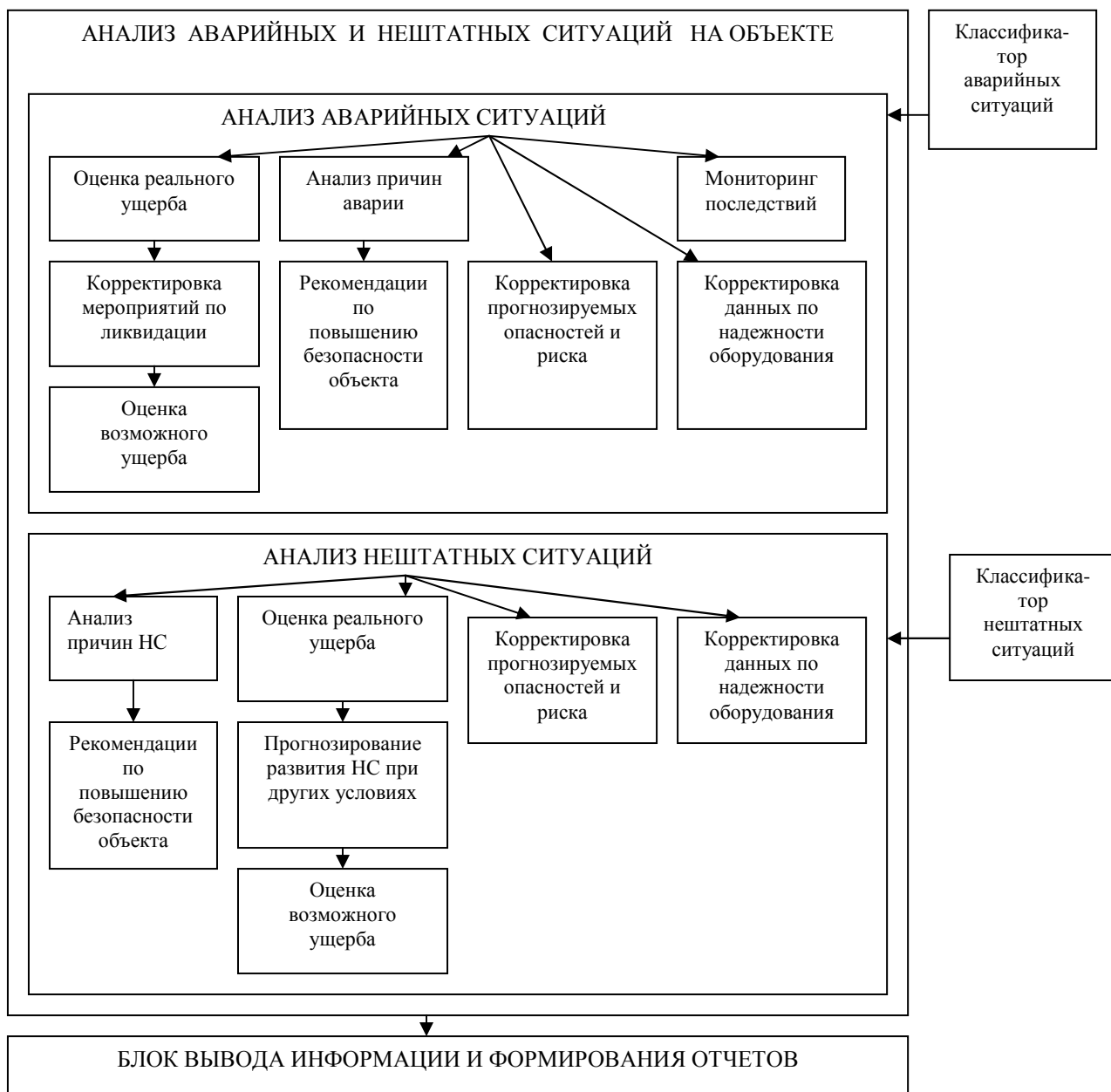


Рис.2.3. Блок-схема анализа аварийных и нештатных ситуаций на объекте

Основные задачи анализа риска аварий на опасных производственных объектах заключаются в представлении лицам, принимающим решения:

- объективной информации о состоянии промышленной безопасности объекта;
- сведений о наиболее опасных, "слабых" местах с точки зрения безопасности;
- обоснованных рекомендаций по уменьшению риска.

Для количественных оценок возникновения аварии используют два показателя:

1) вероятность возникновения аварии (отношение числа случаев режимов эксплуатации, приводящих к аварии, к общему множеству режимов эксплуатации за произвольное время (бесконечное);

2) частота аварии (выборка отношения числа произошедших событий (аварий) к периоду наблюдений (времени эксплуатации промышленного предприятия).

Как правило, к авариям на промышленных и других объектах приводит отказ (неполадка) – события, заключающееся в нарушении работоспособного состояния оборудования, объекта. К одной и той же аварийной ситуации могут привести различные виды отказов и один и тот же отказ может привести к различным аварийным ситуациям. В свою очередь аварийная ситуация – это сочетание условий или обстоятельств, появление которых может привести к возникновению факторов риска – причин, движущих сил, приводящих к негативному воздействию на различных реципиентов. Каждая ситуация может привести как к одному фактору риска, так и к нескольким сразу, которые, в свою очередь, могут приводить к возникновению одного или нескольких видов риска, в зависимости от характера наносимого ущерба.

**Риск** – сочетание частоты (или вероятности) возникновения и последствий определенного опасного события. Понятие риска всегда включает два элемента: частота, с которой осуществляется опасное событие, и последствия

этого события. С позиции вероятностной логики понятие риска характеризуется сочетанием вероятностей: вероятностью возникновения неблагоприятного воздействия; вероятностью того, что возникает неблагоприятное воздействие именно данного типа и масштаба; вероятностью того, что именно данный тип воздействия вызывает определенную величину отклонений состояния субъекта от его динамического равновесия. Риск оценивается соответствующими показателями, например ожидаемыми уровнями негативных последствий аварий в годовом исчислении (ожидаемым ущербом в денежной форме, вероятностью возникновения аварий с определенными последствиями и т.п.). Каждая ситуация может привести как к одному фактору риска, так и к нескольким сразу, которые, в свою очередь, могут приводить к возникновению одного или нескольких видов риска, в зависимости от характера наносимого ущерба.

**Анализ риска аварии** - процесс идентификации опасностей и оценки риска аварии на опасном производственном объекте для отдельных лиц или групп людей, имущества или окружающей природной среды. Анализ риска заключается в использовании всей доступной информации для идентификации (выявления) опасностей и оценки риска аварии и связанных с ней ситуаций.

**Риск** - максимальный ущерб, нанесенный событием (вероятность возникновения аварийной ситуации объединенная с величиной возможного экологического, социального и экономического ущерба).

Причина аварийной ситуации – отказ (накопление единичных отказов), инициирующее событие – развитие аварии.

Оценки современных химических производств дают показатель вероятности аварии  $10^{-3}$ , т.е. имеются большие потенциальные технические возможности для управления риском до состояния фактической надежности объектов и оснащения их средствами контроля, диагностики и аварийной защиты. Имеется значительный запас управляемости риском, как по параметру



ущерба, так и по параметру вероятности реализации опасности. Под термином риска принято описывать и опасности от достоверных событий (происходящих с вероятностью, равной единице), например, загрязнение окружающей среды отходами нормально функционирующего производства. Обычно риск определяется как функция вероятности возможных событий и связанных с ними последствий.

Под риском понимается вероятная мера опасности, установленная для данного объекта (субъекта) в виде возможных потерь за определенный период времени.

Таким образом, риск является функцией вероятности возникновения возможного воздействия (в общем случае не зависящей от объекта) и реакции на это воздействие (уязвимости). В простейшем варианте риск негативного события (отказа), обусловленного опасностью  $H$  определенной интенсивности, может быть определен по формуле:

$$P(F) = P(H) \cdot P(F/H),$$

где  $P(H)$  – вероятность (повторяемость) опасности;  $P(F/H)$  - вероятность отказа, т.е. выхода из строя объекта при воздействии этой опасности.

Уровень безопасности  $P(S)$  (которая нас и интересует) в вероятностных терминах может быть определен по формуле:

$$P(S) = 1 - P(F).$$

Обычно оперируют с понятием риска  $P(F)$ , предполагая, что определение безопасности не вызывает затруднений.

Анализ риска позволяет обеспечить интегральную оценку безопасности с учетом вероятности поражения объекта во времени и пространстве при возникновении ЧС, а также возможных последствий. Например, для оценки риска потерь при действии природных аварий и катастроф предложена формула

$$R = P(F) = P(H) \cdot P(F/H) = P(H) \cdot P(S/H) \cdot P(T/H) \cdot P(O/H) \cdot D,$$

где  $R$  – интегральный риск от опасности  $H$  в любой сфере фиксации потерь;  $P(H)$  – повторяемость опасности  $H$  определенной интенсивности, численно

равная ее статистической вероятности;  $P(S/H), P(T/H)$  – вероятность поражения объекта опасностью  $H$  в пространстве и времени;  $P(O/H)$  – степень уязвимости (вероятность поражения, разрушения, гибели и т.п.) объекта при событии  $H$ ;  $D$  - площадь, стоимость объекта, численность населения и другие подобные показатели.

**Коллективный риск** – отношение между частотой происшествия и общим количеством людей, которым причинен вред. **Индивидуальный риск** – частота, с которой индивидууму, находящемуся в каком-либо определенном месте, причиняется вред (травма, заболевание). Сочетание коллективного и индивидуального рисков определяет общий риск и его распределение. Социальный риск ( $F$ ) выражается ожидаемым в течение года числом смертельных несчастных случаев. Индивидуальный риск ( $R$ ) измеряется ежегодной вероятностью для индивидуума стать жертвой несчастного случая вследствие аварии на различных этапах трансформации энергии. Он находится путем деления ежегодного числа несчастных случаев ( $F$ ) на полное количество людей, которые могут стать жертвами ( $N$ ):

$$R = \frac{F}{N}.$$

Групповой риск (например, отраслевой) измеряется вероятностью  $R_G$  для индивидуума, относящегося к группе  $G$ , стать жертвой несчастного случая в определенном году и находится:

$$R_G = \frac{FG}{NG},$$

где  $FG$  - ожидаемое количество несчастных случаев в год для группы  $G$ ;  $NG$  – число индивидуумов, относящихся к группе  $G$ .

Риск возникновения технологической катастрофы и других чрезвычайных ситуаций обуславливается следующими необходимыми предпосылками: существование источников потенциальной опасности; действие факторов риска (вещества, энергии), высвобождаемых этими источниками; наличие определенного уровня фактора риска (для случаев, когда такие пороговые

значения существуют или известны, что бывает не всегда); экспозиция людей и окружающей среды воздействию указанных факторов. Риск трактуется как вероятностная мера возникновения техногенных или природных явлений, сопровождающихся формированием и действием вредных факторов, и нанесенного при этом социального, экономического, экологического и других видов ущербов. Оценка риска производится по формуле:

$$R = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \text{ или упрощенная } R = R_2 \cdot R_3,$$

где  $R$  – уровень риска, т.е. вероятность нанесения определенного ущерба человеку и окружающей среде;  $R_1$  – вероятность возникновения события или явления, обуславливающего формирование и действие вредных факторов;  $R_2$  – вероятность формирования определенных уровней физических полей, ударных нагрузок, полей концентраций вредных веществ в различных средах и их дозовых нагрузок, воздействующих на людей и другие объекты биосферы;  $R_3$  – вероятность того, что указанные уровни полей и нагрузок приведут к определенному ущербу.

Иногда риск интерпретируется как математическое ожидание ущерба, возникающего при авариях, катастрофах и опасных природных явлениях:

$$R_{\text{МО}} = \sum_i^n R_i \cdot Y_i,$$

где  $R_{\text{МО}}$  - уровень риска, выраженный через математическое ожидание ущерба;  $R_i$  – вероятность возникновения опасного события  $i$ -го вида или типа;  $Y_i$  – величина ущерба при  $i$ -ом событии.

На основании систематизации данных предложено /20/ классифицировать риски по следующим признакам:

- по источникам риска:

*техногенный* – риск, источником которого является хозяйственная деятельность человека;

*природный* - риск, связанный с природными явлениями, такими как землетрясения, наводнения и т.д.

- по виду источника риска:

для любого объекта риска (отдельного производства, предприятия или отрасли в целом) источники риска можно подразделить на

*внешние* - т.е., существование или образование которых не связано с деятельностью данного объекта риска;

*внутренние* - т.е., которые находятся в прямой зависимости от функционирования объекта;

риски, связанные с человеческим фактором – ошибки конкретных лиц (работников предприятия, проектировщиков и т.п.);

- по характеру наносимого ущерба: *экологический; социальный; экономический.*

- по величине ущерба: *допустимый; предельный; катастрофический.*

- по уровню опасности:

*неприемлемый* – риск  $> 10^{-6}$ ; *приемлемый* –  $10^{-6} \leq \text{риск} \leq 10^{-8}$ ; *безусловно приемлемый* - риск  $> 10^{-8}$ .

Поскольку естественными границами риска для человека является диапазон между  $10^{-2}$  (вероятность заболевания на душу населения) и  $10^{-6}$  (нижний уровень риска от природной катастрофы или другой серьезной опасности), техногенный риск считается приемлемым, если он меньше  $10^{-6}$ ;

- по времени воздействия: *краткосрочный* – опасное воздействие не превышает по времени 1 час, например, взрыв или небольшой пожар; *среднесрочный* и *долгосрочный* связаны с появлением радиации, уничтожением флоры и фауны и другие, последствия которых могут сказываться долгое время;
- по частоте воздействия: *постоянный* – риск, воздействие которого существует постоянно; *периодический* - риск, возникающий время от времени (например, при пуске или останове оборудования); *разовый* – риск, появляющийся при создании нестандартной ситуации;
- по уровню воздействия: *локальный; глобальный;*

- по масштабу воздействия: *масштабный; коллективный;*
- по восприятию риска людьми: *добровольный; принудительный.*

Риск, связанный с возникновением аварийных ситуаций на предприятии для работающих на данном предприятии будет добровольным, а для населения, проживающего вблизи предприятия - принудительным.

**Оценка риска аварии** - процесс, используемый для определения вероятности (или частоты) и степени тяжести последствий реализации опасностей аварий для здоровья человека, имущества и (или) окружающей природной среды. Оценка риска включает анализ вероятности (или частоты), анализ последствий и их сочетания (научный анализ масштабов риска в конкретной ситуации).

**Приемлемый риск аварии** - риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из социально - экономических соображений. Риск эксплуатации объекта является приемлемым, если ради выгоды, получаемой от эксплуатации объекта, общество готово пойти на этот риск.

**Технический риск** - вероятность отказа технических устройств с последствиями определенного уровня (класса) за определенный период функционирования опасного производственного объекта;

**Управление риском** – разработка решений, направленных на минимизацию риска.

**Анализ риска** – последовательность действий, упорядоченную по этапам: количественная оценка риска; анализ структуры риска; управление риском.

Оценка риска включает 4 этапа:

- выявление потенциальной опасности;
- количественная оценка реакции на дозу воздействующих токсичных веществ;
- оценка подверженности, т.е. реального воздействия токсичного вещества на человека;
- характеристика риска (заключение о вероятности нанесения ущерба или возникновения заболевания).

## 2.2. Идентификация опасностей

Основные задачи этапа идентификации опасностей - выявление и четкое описание всех источников опасностей и путей (сценариев) их реализации. Это ответственный этап анализа, так как не выявленные на этом этапе опасности не подвергаются дальнейшему рассмотрению и исчезают из поля зрения.

При идентификации следует определить, какие элементы, технические устройства, технологические блоки или процессы в технологической системе требуют более серьезного анализа и какие представляют меньший интерес с точки зрения безопасности.

Для идентификации опасностей рекомендуется применять методы, изложенные ниже.

Результатом идентификации опасностей являются:

- перечень нежелательных событий;
- описание источников опасности, факторов риска, условий возникновения и развития нежелательных событий (например, сценариев возможных аварий);
- предварительные оценки опасности и риска (например, при идентификации опасности, при необходимости, могут быть представлены показатели опасности применяемых веществ, оценки последствий для отдельных сценариев аварий и т.п.).

Построение сценариев развития аварии. Для определения характерных факторов опасности на потенциально опасных объектах предлагается общая схема вероятностной модели возникновения и развития аварии. Блок-схема модели представлена на рис.2.4. В соответствии с этой схемой в каждой аварийной ситуации выделено три фазы:

Фаза 1 – период возникновения аварийной ситуации в пределах одного технологического блока (аппарата, процесса);

Фаза 2 – развитие аварии в пределах цеха, участка производства и угроза цепного развития аварии с выходом за пределы локального участка технологического блока и вовлечением в аварийный процесс всего технологического объекта; эта фаза представляет опасность в основном для работающих на данном предприятии;

Фаза 3 – цепное развитие аварии на уровне технологических объектов с возможным разрушением зданий и сооружений; существенные разрушения и гибель людей могут произойти на всей территории предприятия и за ее пределами.

Идентификация опасностей завершается также выбором дальнейшего направления деятельности. В качестве вариантов дальнейших действий может быть:

- решение прекратить дальнейший анализ ввиду незначительности опасностей или достаточности полученных предварительных оценок (в этом случае под идентификацией опасностей подразумевается анализ или оценка опасностей);
- решение о проведении более детального анализа опасностей и оценки риска;
- выработка предварительных рекомендаций по уменьшению опасностей.

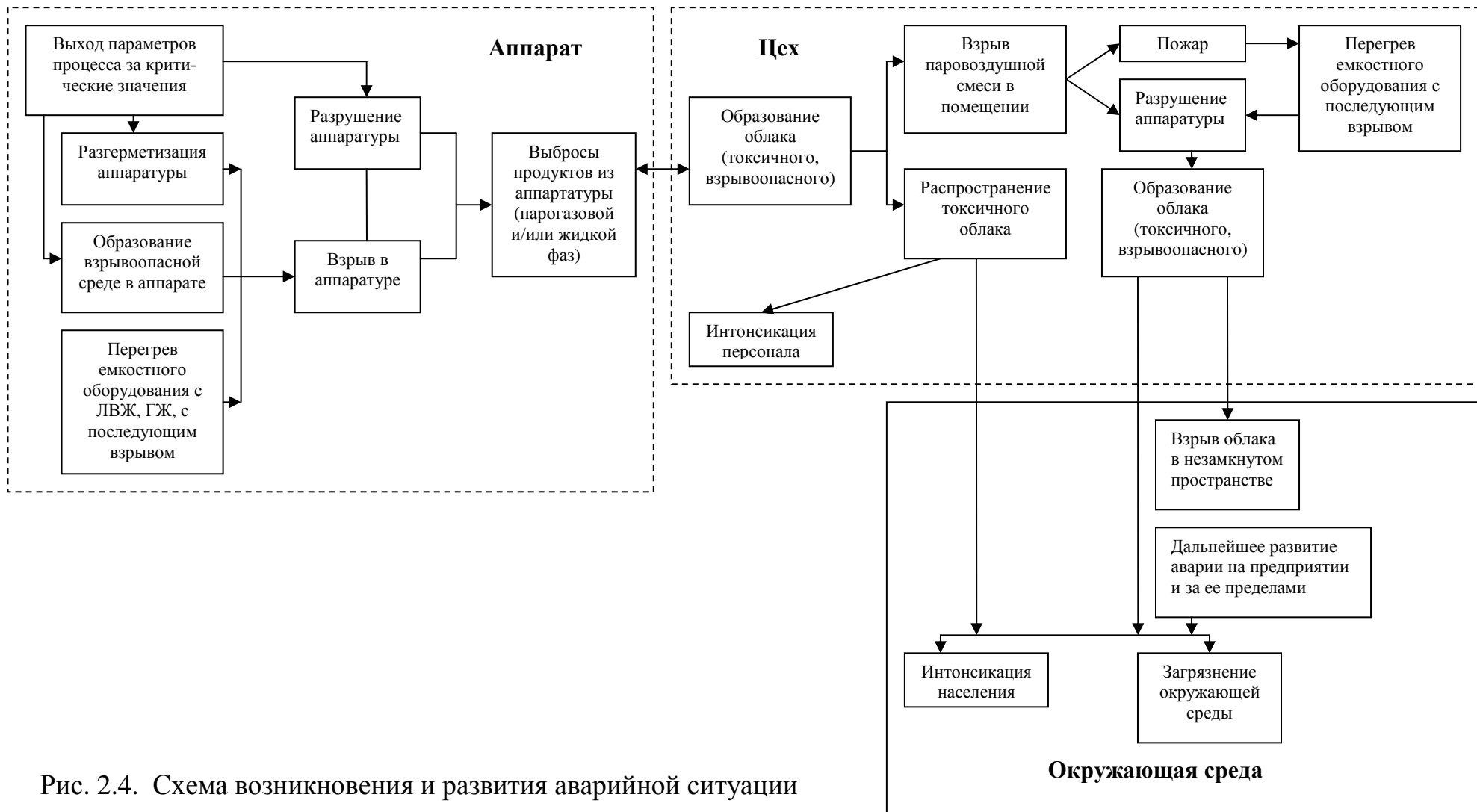


Рис. 2.4. Схема возникновения и развития аварийной ситуации



### 2.3. Оценка вероятности аварий и их последствий.

При оценке риска, возникающего в ходе конкретной деятельности, нужно оценивать величины последствий, а также вероятности того, что они произойдут. Факторами, которые играют важную роль в таких оценках, являются степень воздействия, его продолжительность, характеристики веществ, размер области, в которой оно произошло и присутствие людей, животных, растений, имущества, а также природа вредных воздействий.

Последствия выброса опасных веществ определяется в три этапа:

- определение мощности и скорости выброса;
- определение распространения загрязняющего вещества после выброса;
- определение его воздействия на исследуемые объекты.

Для анализа последствий необходимо иметь модели для расчета:

- выбросов вредных веществ;
- нарушений герметичности резервуара давления;
- утечки из трубопровода;
- выброс без взрыва и со взрывом;
- испарения с поверхности жидкости и т.д.;
- рассеяния вредных веществ;
- загрязнения воздуха на малых и больших расстояниях;
- загрязнения воды;
- загрязнения почвы и продовольствия;
- теплового излучения;
- взрывов;
- выпадения примесей;
- химических реакций;
- долгосрочной и краткосрочной токсичности (для факторов с пороговым и беспороговым действием, учет аддитивности, синергизма, фармакинетики);

- ущерба для здоровья населения и другие.

### 2.3.1. Оценка риска

Оценка риска включает оценку вероятности события в сочетании с анализом последствий и позволяет представить количественное выражение опасности через величину риска. Основные задачи этапа оценки риска связаны:

- 1) определением частот возникновения инициирующих и всех нежелательных событий;
- 2) оценкой последствий возникновения нежелательных событий;
- 3) обобщением оценок риска.

Для определения частоты нежелательных событий необходимо использовать /25/:

- статистические данные по **аварийности** и **надежности** технологической системы, соответствующие специфике опасного производственного объекта или виду деятельности (т.е. использовать существующие сведения об авариях на заводах или отказах систем);
- анализ протекания аварии с целью определения необходимой вероятности;
- логические методы анализа "**деревьев событий**", "**деревьев отказов**", **имитационные модели** возникновения аварий в **человеко-машинной** системе;
- **экспертные оценки** путем учета мнения специалистов в данной области.

Оценка последствий включает анализ возможных воздействий на людей, имущество и (или) окружающую природную среду. Для оценки последствий необходимо оценить физические эффекты нежелательных событий (отказы, разрушение технических устройств зданий, сооружений, пожары, взрывы, выбросы токсичных веществ и т.д.), уточнить объекты, которые могут быть подвергнуты опасности. При анализе последствий аварий необходимо использовать модели аварийных процессов и критерии

поражения, разрушения изучаемых объектов воздействия, учитывать ограничения применяемых моделей. Следует также учитывать и, по возможности, выявить связь масштабов последствий с частотой их возникновения.

Обобщенная оценка риска (или степень риска) аварий должна отражать состояние промышленной безопасности с учетом показателей риска от всех нежелательных событий, которые могут произойти на опасном производственном объекте, и основываться на результатах:

- интегрирования показателей рисков всех нежелательных событий (сценариев аварий) с учетом их взаимного влияния;
- анализа неопределенности и точности полученных результатов;
- анализа соответствия условий эксплуатации требованиям промышленной безопасности и критериям приемлемого риска.

При обобщении оценок риска следует, по возможности, проанализировать неопределенность и точность полученных результатов. Имеется много неопределенностей, связанных с оценкой риска. Как правило, основными источниками неопределенностей являются неполнота информации по надежности оборудования и человеческим ошибкам, принимаемые предположения и допущения используемых моделей аварийного процесса. Чтобы правильно интерпретировать результаты оценки риска, необходимо понимать характер неопределенностей и их причины. Источники неопределенности следует идентифицировать (например, "человеческий фактор"), оценить и представить в результатах.

### *2.3.2. Разработка рекомендаций по уменьшению риска*

Разработка рекомендаций по уменьшению риска является заключительным этапом анализа риска. В рекомендациях представляются обоснованные меры по уменьшению риска, основанные на

результатах оценок риска. Заметим, что **повышение уровня безопасности (снижение аварийности) производств** в общем случае может происходить по трем направлениям:

- 1) *снижение вероятности возникновения аварии*; ее уровень зависит от надежности технологического оборудования, степени контролируемости производственного процесса и эффективности управления им, квалификации и профессионализма работников;
- 2) *уменьшение силы аварийного события* (размеров и направлений распространения воздействия энергии) в окружающем пространстве;
- 3) *уменьшение масштабов поражения*.

Меры по уменьшению риска могут иметь технический и (или) организационный характер. В выборе типа меры решающее значение имеет общая оценка действенности и надежности мер, оказывающих влияние на риск, а также размер затрат на их реализацию.

На стадии эксплуатации опасного производственного объекта организационные меры могут компенсировать ограниченные возможности для принятия крупных технических мер по уменьшению риска.

При разработке мер по уменьшению риска необходимо учитывать, что вследствие возможной ограниченности ресурсов в первую очередь должны разрабатываться простейшие и связанные с наименьшими затратами рекомендации, а также меры на перспективу.

Затраты, направленные на снижение вероятности производственной аварии, связаны с повышением надежности работы первичных элементов технологических схем, внедрением в технологические процессы схем блокирования отдельных «цепочек» распространения аварийных предпосылок, со снижением их в вероятность результирующей аварии.

Определение недостаточно надежных элементов производственных технологий и мест установки схем, блокирующих предпосылки аварий, на практике обычно осуществляется с использованием «деревьев отказов».

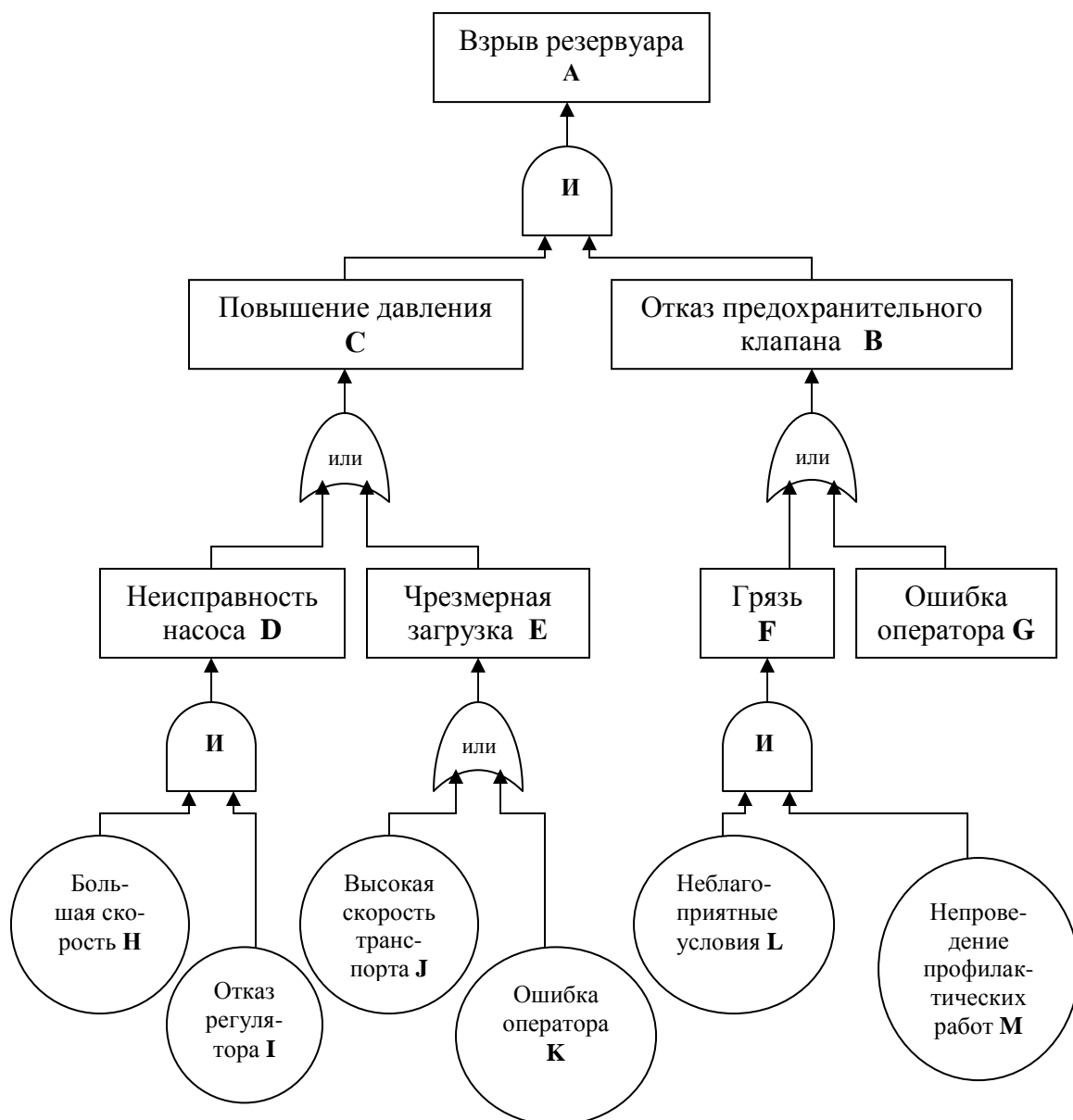


Рис. 2.5. Дерево "ошибок" возникновения аварии взрыва резервуара

По существу, дерево событий (отказов) представляет собой сценарий развития ситуации, в результате которого возможно возникновение неблагоприятного события. Заметим также, что построение дерева событий одновременно позволяет определить значение вероятности возникновения результирующего неблагоприятного события.

На рис. 2.5 изображено дерево событий, характеризующее сценарий возникновения крупномасштабной аварии – взрыва резервуара, последствием которого является распространение в окружающей среде опасного загрязнителя.

Авария может произойти при различных комбинациях (сочетаниях) неблагоприятных событий на различных элементах этой системы. В соответствии с кодами, присвоенными каждому элементу на рис. , возможность осуществления главного события А – «авария», определяется следующей формулой:

$$A = (D \cup E) \cap (F \cup G) = [(H \cap I) \cup (K \cup J)] \cap [(M \cap L) \cup G].$$

Затраты, уменьшающие силу аварийного события, могут осуществляться как для смягчения последствий производственных аварий, техногенных катастроф, так и уменьшения зоны распространения поражающих факторов, устранения каскадных эффектов в их распространении. Примерами являются вложения в повышение сейсмостойкости, снижение пожароопасности зданий и сооружений, в увеличении прочности корпусов трубопроводных систем и хранилищ топлива, в сооружении барьеров на пути распространения ударной волны и т.п. Эффективность таких мер существенно зависит от достоверности прогноза сценария развития физических эффектов, обусловленных возникновением неблагоприятного события, их воздействия на окружающую среду. Следует отметить, что такие затраты в определенной степени направлены на уменьшение зоны распространения поражающих факторов, вызванных неблагоприятным событием, в окружающем пространстве, а следовательно, и масштабов поражения. Однако в риск-анализе часто масштабы поражения определяют не по площади или объему распространения поражающих факторов, а по количеству людей (персонала или населения), находящихся в зоне их влияния, чьи жизни и здоровье находятся под реальной угрозой. Вследствие этого в риск-анализе обычно выделяется специальный вид затрат по уменьшению масштабов поражения, направленных на повышение подготовленности персонала и населения к защитным действиям при авариях и катастрофах, обеспечение их индивидуальными средствами защиты и укрытиями от воздействия поражающих факторов, снижение негативных эффектов, например, за счет оказания медицинской помощи, размещения пострадавшего населения в

специально приспособленных местах для временного проживания, обеспечения одеждой, продуктами питания, чистой питьевой водой и т.п.

В большинстве случаев первоочередными мерами обеспечения безопасности, как правило, являются меры предупреждения аварии. Выбор планируемых для внедрения мер безопасности имеет следующие приоритеты:

1) меры уменьшения вероятности возникновения аварийной ситуации, включающие:

-меры уменьшения вероятности возникновения инцидента;

-меры уменьшения вероятности перерастания инцидента в аварийную ситуацию;

2) меры уменьшения тяжести последствий аварии, которые, в свою очередь, имеют следующие приоритеты:

-меры, предусматриваемые при проектировании опасного объекта (например, выбор несущих конструкций, запорной арматуры);

-меры, относящиеся к системам противоаварийной защиты и контроля (например, применение газоанализаторов);

- меры, касающиеся готовности эксплуатирующей организации к локализации и ликвидации последствий аварий.

При необходимости обоснования и оценки эффективности предлагаемых мер уменьшения риска рекомендуется придерживаться двух альтернативных целей их оптимизации:

1) при заданных средствах обеспечить максимальное снижение риска эксплуатации опасного производственного объекта;

2) обеспечить снижение риска до приемлемого уровня при минимальных затратах.

Для определения приоритетности выполнения мер по уменьшению риска в условиях заданных средств или ограниченности ресурсов следует:

- определить совокупность мер, которые могут быть реализованы при заданных объемах финансирования;

- ранжировать эти меры по показателю "эффективность - затраты";
- обосновать и оценить эффективность предлагаемых мер.

### 2.3.3. Методы проведения анализа отказов и рисков

При выборе методов проведения анализа риска необходимо учитывать этапы функционирования объекта (проектирование, эксплуатация и т.д.), цели анализа, критерии приемлемого риска, тип анализируемого опасного производственного объекта и характер опасности, наличие ресурсов для проведения анализа, опыт и квалификацию исполнителей, наличие необходимой информации и другие факторы.



Рис.2.6. Классификация методов анализа отказов и рисков

Так, на стадии идентификации опасностей и предварительных оценок риска рекомендуется применять методы качественного анализа и оценки риска (эта стадия может именоваться как анализ опасностей), опирающиеся на продуманную процедуру, специальные вспомогательные средства (анкеты, бланки, опросные листы, инструкции) и практический опыт



исполнителей. Классификация методов анализа отказов и рисков представлена на рис.2.6.

Практика показывает, что использование сложных количественных методов анализа риска зачастую дает значение показателей риска, точность которых для сложных технических систем невелика. В связи с этим проведение полной количественной оценки риска более эффективно для сравнения источников опасностей или различных вариантов мер безопасности (например, при размещении объекта), чем для составления заключения о степени безопасности объекта. Однако количественные методы оценки риска всегда очень полезны, а в некоторых ситуациях и единственно допустимы, в частности, для сравнения опасностей различной природы, оценки последствий крупных аварий или для иллюстрации результатов. Обеспечение необходимой информацией является важным условием проведения оценки риска. Вследствие недостатка статистических данных на практике рекомендуется использовать экспертные оценки и методы ранжирования риска, основанные на упрощенных методах количественного анализа риска. В этих подходах рассматриваемые события или элементы обычно разбиваются по величине вероятности, тяжести последствий и риска на несколько групп (или категорий, рангов), например, с высоким, промежуточным, низким или незначительным уровнем риска. При таком подходе высокий уровень риска может считаться (в зависимости от специфики объекта), неприемлемым (или требующим особого рассмотрения), промежуточный уровень риска требует выполнения программы работ по уменьшению уровня риска, низкий уровень считается приемлемым, а незначительный вообще может не рассматриваться.

При выборе и применении методов анализа риска рекомендуется придерживаться следующих требований:

- метод должен быть научно обоснован и соответствовать рассматриваемым опасностям;

- метод должен давать результаты в виде, позволяющем лучше понять формы реализации опасностей и наметить пути снижения риска;
- метод должен быть повторяемым и проверяемым.

На стадии идентификации опасностей рекомендуется использовать один или несколько из перечисленных ниже методов анализа риска:

- "Что будет, если...?";
- проверочный лист;
- анализ опасности и работоспособности;
- анализ вида и последствий отказов;
- анализ "дерева событий";
- анализ "дерева отказов";
- соответствующие эквивалентные методы.

Традиционный подход к анализу риска сводится к оценке вероятностей и величины последствий. Постсовременный анализ риска учитывает социальный контекст происходящих событий: возникающего риска и его последствий, т.е. учет восприятия риска и опасности людьми.

При выборе методов анализа риска необходимо учитывать: этап разработки системы, цели анализа, критерии приемлемого риска, тип анализируемой системы и характер опасности, наличие ресурсов для проведения анализа, опыт и квалификацию исполнителей, наличие информации и другие факторы.

Ниже представлена краткая характеристика основных методов, применяемых для проведения анализа риска.

1. Методы "поверочного листа" и "что будет, если...?" или их комбинация относятся к группе методов качественных оценок опасности, основанных на изучении соответствия условий эксплуатации объекта или проекта требованиям промышленной безопасности.

Результатом поверочного листа является перечень вопросов и ответов о соответствии опасного производственного объекта требованиям промышленной безопасности и указания по их обеспечению.

Метод проверочного листа отличается от "что будет, если ...?" более обширным представлением исходной информации и представлением результатов о последствиях нарушений безопасности.

Эти методы наиболее просты (особенно при обеспечении их вспомогательными формами, унифицированными бланками, облегчающими на практике проведение анализа и представление результатов), нетрудоемки (результаты могут быть получены одним специалистом в течение одного дня) и наиболее эффективны при исследовании безопасности объектов с известной технологией.

2. "Анализ вида и последствий отказов" (АВПО) применяется для качественного анализа опасности рассматриваемой технической системы. Под технической системой в зависимости от целей анализа могут пониматься как совокупность технических устройств, так и отдельные технические устройства или их элементы. Существенной чертой этого метода является рассмотрение каждого аппарата, установки, блока, изделия или составной части системы (элемента) на предмет того, как он стал неисправным (вид и причина отказа) и какое было бы воздействие отказа на техническую систему.

Анализ вида и последствий отказа можно расширить до количественного анализа вида, последствий и критичности отказа (АВПКО). В этом случае каждый вид отказа ранжируется с учетом двух составляющих критичности - вероятности (или частоты) и тяжести последствий отказа. Определение параметров критичности необходимо для выработки рекомендаций и приоритетности мер безопасности. Результаты анализа представляются в виде таблиц с перечнем оборудования, видом и причин возможных отказов, частотой, последствиями, критичностью, средствами обнаружения неисправности (сигнализаторы, приборы контроля и т.п.) и рекомендациями по уменьшению опасности.

Систему классификации отказов по критериям вероятности - тяжести последствий следует конкретизировать для каждого объекта или технического устройства с учетом его специфики. Ниже (таблица 2.2) в качестве примера приведены показатели (индексы) уровня и критерии критичности по вероятности и тяжести последствий отказа. Для анализа выделены четыре группы, которым может быть нанесен ущерб от отказа: персонал, население, имущество (оборудование, сооружения, здания, продукция и т.п.), окружающая среда.

Таблица 2.2

МАТРИЦА "ВЕРОЯТНОСТЬ - ТЯЖЕСТЬ ПОСЛЕДСТВИЙ"

Частота возникновения отказа 1/год		Тяжесть последствий отказов			
		Катастрофический отказ	Критический отказ	Некритический отказ	Отказ с пренебрежимо малыми последствиями
Частый отказ	>1	A	A	A	C
Вероятный отказ	1.0 – 0,01	A	A	B	C
Возможный отказ	0,01-0,0001	A	B	B	C
Редкий отказ	0,0001 - 0,000001	A	B	C	D
Практически невероятный отказ	< 0,000001	B	C	C	D

В таблице 2.2 применены следующие варианты критериев:

- критерии отказов по тяжести последствий;
- катастрофический отказ - приводит к смерти людей, существенному ущербу имуществу, наносит невосполнимый ущерб окружающей среде;
- критический / некритический отказ - угрожает / не угрожает жизни людей, приводит (не приводит) к существенному ущербу имуществу, окружающей среде;

- отказ с пренебрежимо малыми последствиями;
- отказ, не относящийся по своим последствиям ни к одной из первых трех категорий.
- Категории (критичность) отказов:
  - "А" - обязателен количественный анализ риска или требуются особые меры обеспечения безопасности;
  - "В" - желателен количественный анализ риска или требуется принятие определенных мер безопасности;
  - "С" - рекомендуется проведение качественного анализа опасностей или принятие некоторых мер безопасности;
  - "Д" - анализ и принятие специальных (дополнительных) мер безопасности не требуется.

Методы АВПО, АВПКО применяются, как правило, для анализа проектов сложных технических систем или технических решений.

Выполняется группой специалистов различного профиля (например, специалист по технологии, химическим процессам, инженер - механик) из 3 - 7 человек в течение нескольких дней, недель.

3. В методе "Анализ опасности и работоспособности" (АОР) исследуется влияние отклонений технологических параметров (температуры, давления и пр.) от регламентных режимов с точки зрения возможности возникновения опасности. АОР по сложности и качеству результатов соответствует уровню АВПО, АВПКО.

В процессе анализа для каждой составляющей опасного производственного объекта или технологического блока определяются возможные отклонения, причины и указания по их недопущению. При характеристике отклонения используются ключевые слова "нет", "больше", "меньше", "также как", "другой", "иначе чем", "обратный" и т.п.

Применение ключевых слов помогает исполнителям выявить все возможные отклонения. Конкретное сочетание этих слов с технологическими параметрами определяется спецификой производства.

Примерное содержание ключевых слов следующее:

"НЕТ" - отсутствие прямой подачи вещества, когда она должна быть;

"БОЛЬШЕ (МЕНЬШЕ)" - увеличение (уменьшение) значений режимных переменных по сравнению с заданными параметрами (температуры, давления, расхода);

"ТАКЖЕ КАК" - появление дополнительных компонентов (воздух, вода, примеси);

"ДРУГОЙ" - состояние, отличающееся от обычной работы (пуск, остановка, повышение производительности и т.д.);

"ИНАЧЕ ЧЕМ" - полное изменение процесса, непредвиденное событие, разрушение, разгерметизация оборудования;

"ОБРАТНЫЙ" - логическая противоположность замыслу, появление обратного потока вещества.

Результаты анализа представляются на специальных технологических листах (таблицах). Степень опасности отклонений может быть определена количественно путем оценки вероятности и тяжести последствий рассматриваемой ситуации по критериям критичности аналогично методу АВПКО (Таблица 1). Отметим, что метод АОР, также как АВПКО, кроме идентификации опасностей и их ранжирования позволяет выявить неясности и неточности в инструкциях по безопасности и способствует их дальнейшему совершенствованию. Недостатки методов связаны с затрудненностью их применения для анализа комбинаций событий, приводящих к аварии.

4. Практика показывает, что крупные аварии, как правило, характеризуются комбинацией случайных событий, возникающих с различной частотой на разных стадиях возникновения и развития аварии (отказы оборудования, ошибки человека, нерасчетные внешние воздействия, разрушение, выброс, пролив вещества, рассеяние веществ, воспламенение, взрыв, интоксикация и т.д.). Для выявления причинно - следственных связей между этими событиями используют логико-графические методы анализа

"деревьев отказов" и "деревьев событий". Анализ и использование дерева ошибок и причинно-следственный анализ требуют для своей реализации довольно сложных логических построений, а построение дерева ошибок и причинно-следственных диаграмм и определения на их основе количественных оценок – знаний булевой алгебры, теории множеств и других довольно сложных математических методов.

5. Методы количественного анализа риска, как правило, характеризуются расчетом нескольких показателей риска и могут включать один или несколько вышеупомянутых методов (или использовать их результаты). Проведение количественного анализа требует высокой квалификации исполнителей, большого объема информации по аварийности, надежности оборудования, проведения экспертных работ, учета особенностей окружающей местности, метеоусловий, времени пребывания людей в опасных зонах и других факторов.

Количественный анализ риска позволяет оценивать и сравнивать различные опасности по единым показателям и является наиболее эффективным:

- на стадии проектирования и размещения опасного производственного объекта;
- при обосновании и оптимизации мер безопасности;
- при оценке опасности крупных аварий на опасных производственных объектах, имеющих однотипные технические устройства (например, магистральные трубопроводы);
- при комплексной оценке опасностей аварий для людей, имущества и окружающей природной среды.

6. Рекомендации по выбору методов анализа риска для различных видов деятельности и этапов функционирования опасного производственного объекта представлены ниже (таблица 2.3).

В таблице 2.3 приняты следующие обозначения:

- "0" - наименее подходящий метод анализа;

- "+" - рекомендуемый метод;
- "++" - наиболее подходящий метод.

Таблица 2.3.

### РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ МЕТОДОВ АНАЛИЗА РИСКА

Метод	Вид деятельности				
	Размещение (предпроектные работы)	Проектиро- вание	Ввод/вывод из эксплуа- тации	Эксплуа- тация	Реконст- рукция
Анализ "Что будет, если...?"	0	+	++	++	+
Метод проверочного листа	0	+	+	++	+
Анализ опасности и работоспособности	0	++	+	+	++
Анализ видов и последствий отказов	0	++	+	+	++
Анализ деревьев отказов и событий	0	++	+	+	++
Количественный анализ риска	++	++	0	+	++

Методы могут применяться изолированно или в дополнение друг к другу, причем методы качественного анализа могут включать количественные критерии риска (в основном, по экспертным оценкам с использованием, например, матрицы "вероятность-тяжесть последствий" ранжирования опасности). По возможности полный количественный анализ риска должен использовать результаты качественного анализа опасностей.

**Первая стадия анализа риска** – предварительный анализ опасностей, который включает не только предварительное выявление элементов системы или событий, которые ведут к опасным ситуациям, но и использование формализованных (количественных) примов, в том числе с включением в рассмотрение последовательности событий, превращающих опасность в



происшествие, а также корректирующих мероприятий для устранения последствий происшествия.

**Вторая стадия** – выявление последовательности опасных ситуаций, построение „деревьев отказов” и „деревьев событий”.

**Третья стадия** - анализ последствий. На этой стадии производится:

- подсчет количества утечки токсичного материала и выделяемой энергии для каждого варианта развития аварии;
- изучение закономерностей распространения токсичных продуктов, ударной волны или фронта пожара, ведущих к летальным последствиям;
- оценка воздействия на здоровье людей и повреждений материальных ценностей;
- вывод об опасности данного производственного процесса на основе сравнения с другими видами риска для общества в целом.

#### **2.4. Методология исследования риска.**

Причиной риска является возможность неконтролируемого выброса отравляющих веществ или выход из-под контроля процесса высвобождения энергии. Анализируя причинно-следственную связь техногенных чрезвычайных ситуаций (ЧС) с производственно-хозяйственной деятельностью человека, можно выделить три группы причин роста числа и масштабов аварий:

**объективные** (характерные для поромышленно развитых стран) – повышение технологических нагрузок и параметров (давлений, температур, мощностей, напряжений, концентраций, скоростей и т.д.), усиление производственно-хозяйственной деятельности человека, повышение концентрации производства;

**субъективные** – пренебрежительное или некомпетентное отношение к вопросам промышленной безопасности, допущенные ошибки или дефекты при проектировании, монтаже и на стадии эксплуатации объекта (системы);

**специфические** (для страны на данном этапе) – изношенность основных фондов, отсталость ряда технологий, недостаточный уровень эксплуатации оборудования, системы защиты, не всегда отвечающие требованиям мировых стандартов.

Абсолютной безопасностью обладают только системы, полностью лишённые энергетического потенциала, а также – активных химических или биологических компонентов. В остальных случаях риск аварии не равен нулю (т.е. вероятность аварии не может быть нулевой) В этом – суть концепции ненулевого риска. Можно стремиться только к снижению до бесконечно малых величин за счёт наращивания ступеней защиты, повышения надёжности, эффективного контроля и своевременного выполнения регламентных работ. Практика показывает, что полностью исключить техногенные ЧС теоретически невозможно из-за ненулевого риска, но практически – вероятно при условии выполнения соответствующих требований и мероприятий. Потому чрезвычайные ситуации необходимо предупреждать или ослаблять их вредное воздействие, а если это не удалось, то быстро на них реагировать и эффективно ликвидировать последствия.

Для предупреждения аварии (проведения профилактических мероприятий) или ослабления ее вредного воздействия следует проводить анализ состояния данного объекта (системы), оценивать опасность возникновения аварии (риск), прогнозировать развитие аварийного процесса и возможный ущерб. Для эффективных действий при ликвидации последствий аварии необходим прогноз потребных ресурсов – трудовых, материальных, энергетических и др.

Подсчитать вероятность аварии объекта (системы) казалось бы возможно перемножением неблагоприятных событий. Однако, не всегда ясно, какие события составляют неблагоприятную последовательность (цепочку),

сколько таких цепочек имеется и каковы вероятности этих событий. Потому для анализа причинно-следственной связи факторов, приводящих к аварии, полезно использовать дерево событий (граф состояний), благодаря которому создается наглядность и обзорность конечных исходов и возможность количественного учета всех неблагоприятных исходов. Такой метод применяется при проектировании потенциально опасных объектов.

А	Б	В	Г	Д
---	---	---	---	---

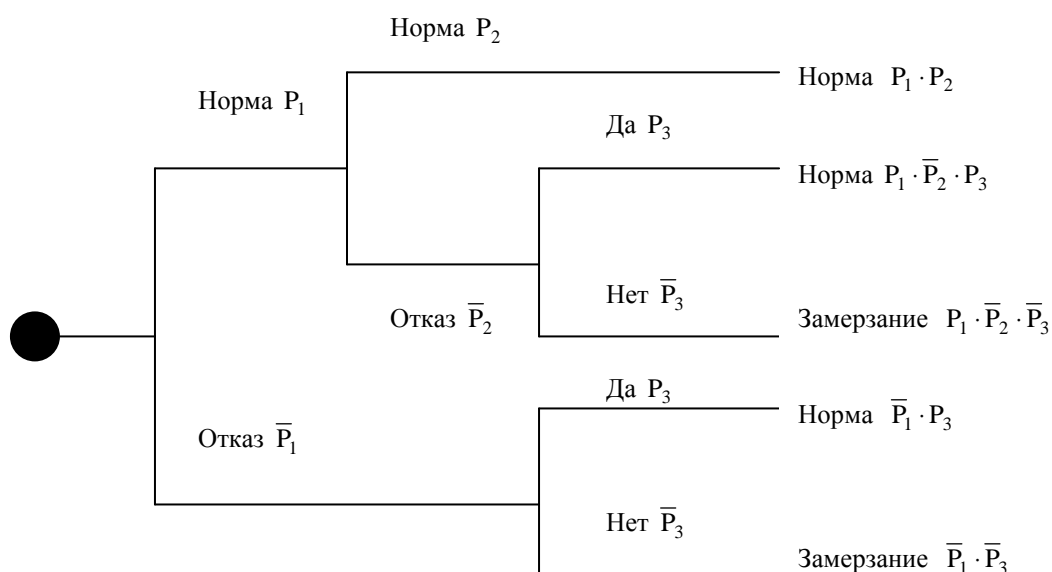


Рис. 2.7. Дерево событий: А – исходное состояние (период резкого похолодания), Б – отключение электро-энергии, В – прекращение подачи тепла от источника, Г – своевременное освобождение системы от теплоносителя, Д – конечный результат (вероятности исходов)

В качестве примера проанализируем опасность замерзания теплоносителя в системе водяного отопления здания (при независимой схеме подключения централизованного теплоснабжения). На рис.2.7 представлено трехуровневое дерево событий. Над деревом показаны наименования событий каждого уровня.

Каждое из событий рассматривается в двух альтернативных состояниях: произошло или не произошло (например, "норма-отказ" или "да-нет"), т.е. каждая ветвь дерева может давать два отростка.

Это бинарное дерево обладает некоторыми свойствами:

вероятность каждого исхода (каждой цепочки последовательных событий) равна произведению вероятностей этих событий (вероятность появления нескольких событий, независимых в совокупности, равна произведению вероятностей этих событий)

$$P_i = \prod_{j=1}^m P_j, \quad (2.1)$$

сумма вероятностей исходов равна единице (сумма вероятностей в полной группе событий равна 1)

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1, \quad (2.2)$$

где  $m$  – число уровней дерева ( $j = 1, \dots, m$ ),  $n$  – число исходов, вариантов на каждом уровне ( $i = 1, \dots, n$ ).

Просуммировав все благоприятные (или отдельно – неблагоприятные) исходы, получим вероятность интересующего нас события (отказа, аварии и т.д.). Если из всех имеющихся исходов дерева только один (по одной цепочке) является неблагоприятным, т.е. приводящим к аварии, то расчет упрощается и вероятность аварии может быть установлена по формуле (2.1).

В рассматриваемом примере два исхода из пяти являются неблагоприятными. Поэтому вероятность замерзания (неблагоприятный исход) на основании (2.2) будет

$$\bar{P} = P_1 \cdot \bar{P}_2 \cdot \bar{P}_3 + \bar{P}_1 \cdot \bar{P}_3,$$

а вероятность противоположного события (благоприятный исход)

$$P = 1 - \bar{P}.$$

Любые отказы в технических системах относятся к случайным событиям. Для выявления вероятности подобных отказов используются известные стандартные методы теории надежности с построением структурно-

логической схемы и поэлементным расчетом безотказности каждого узла, блока, подсистемы и системы в целом. При этом необходимо знать статистику отказов элементов или узлов, а лучше – законы распределения отказов.

Для оценки опасности возникновения аварии действующего объекта (системы) должно периодически проводиться его натурное обследование (визуальное и инструментальное) в сочетании с постоянным наблюдением (контролем), использованием средств мониторинга. Полученные данные обрабатываются с помощью соответствующих отраслевых методик или экспресс-методов, а затем проводится на соответствие проекту и допустимым нормативам безопасности. По результатам анализа делается вывод о возможности или о прекращении дальнейшей эксплуатации объекта, о необходимости устранения опасных дефектов или внеочередного ремонта.

Конечно, некоторые подсистемы предприятия с большей вероятностью могут быть причиной аварии, чем другие. В связи с этим заданием первого этапа анализа является декомпозиция предприятия в целом на подсистемы, чтобы идентифицировать подсистемы или даже отдельные компоненты, которые могут быть вероятными источниками неконтролируемого выброса ядовитых веществ или энергии. В связи с этим, первыми двумя шагами анализа будут:

- 1) Определение возможных видов аварий ( или возможный выброс ядовитых веществ, взрыв, пожар,...).
- 2) Определение тех частей системы, которые могут вызвать аварии (к этим частям системы может быть отнесен химический реактор, накопительные емкости, энергостанция предприятия,...).

Единым средством к пониманию причин и условий возникновения аварий является инженерный здравый смысл и детальный анализ условий окружающей среды, самого процесса и используемого оснащения. Фундаментальными относительно этого являются знания по токсичности материалов, реактивности, стойкости к коррозии, взрывоопасности и

воспламеняемости, а также знания нормативных и ведущих материалов по проблеме обеспечения безопасности. Основным инструментом этого этапа анализа риска является перечень веществ и процессов, которые могут стать причиной аварии (источники энергии, которые могут быть причиной аварии), например:

- Разные виды топлива;
- Двигатели;
- Запалы;
- Заряды взрывчатки;
- Заряженные конденсаторы;
- Электробатареи;
- Электростатические заряды;
- Баллоны со сжатым газом;
- Механизмы, которые содержат пружины в сжатом состоянии;
- Подвесные системы (висячие мосты, краны);
- Газогенераторы;
- Электрогенераторы;
- Топливные источники энергии;
- Источники энергии радиационного типа (радиевые, батареи стронция);
- Нагревательные устройства;
- Насосы, вентиляторы;
- Машины и механизмы с движущимися частями;
- Устройства силового привода;
- Устройства, которые используют атомную энергию и т.п.

**Процессы и события, которые могут быть причиной аварии:**

- Ускорение;
- Загрязнение, радиоактивное заражение;
- Коррозия;
- Химическое растворение, диссоциация;

- Электрические явления: удар, нагревание, неумышленное (или через невнимательность), включение, электромагнитное излучение;
- Взрыв;
- Пожар;
- Температурные явления: высокая температура; низкая температура; резкие смены температуры;
- Истечение;
- Увлажнение: высокая влажность, низкая влажность;
- Явления, связанные с действием давления: высокое давление, низкое давление, резкие смены давления;
- Радиационные явления: тепловое излучение, электромагнитное излучение, ионизирующее излучение, ультрафиолетовое излучение;
- Химическое замещение;
- Механические действия, повреждение, удар и т.п.

Следующим шагом исследования риска является: ограничение сферы охвата исследования (или надо включать в проводимое исследование подробное рассмотрение влияния на уровень риска возможности саботажа, диверсионных акций, войны, нарушение общественных коммуникаций, поражение молнией, землетрясений, ...). Довольно часто реализация этой фазы исследования риска весомее, чем выявление элементов системы и событий, которые могут быть причиной аварии.

**Предшествующий анализ аварий.** Если анализ и исследование риска расширить в направлении более формального (количественного) описания исследуемой системы и включить в рассмотрение последовательности событий, с помощью которых осуществляется переход аварии в катастрофу, а также мероприятия устранения причин и следствий катастрофы, как и собственное возможные следствия катастрофы, то такое исследование можно обозначить термином "предшествующий анализ аварий".

Следующим шагом анализа риска является определение того, какие мероприятия, если они вообще возможны, можно применить, чтобы

предотвратить наступление аварии. Возможные решения, которые должны быть рассмотрены на этом этапе, представлены на рис. 2.8 в виде дерева решений. Защитные мероприятия по снижению риска можно подать мероприятиями, которые предотвращают наступлению соответствующих аварий, и мероприятиями, которые устраняют возможность тяжелых последствий аварий. К первым принадлежат операции по внесению изменений по оснащению, технологии, функции и цели производственной деятельности предприятия; ко вторым - операции по установлению систем защиты, систем аварийного оповещения, противопожарных стен и т.п..

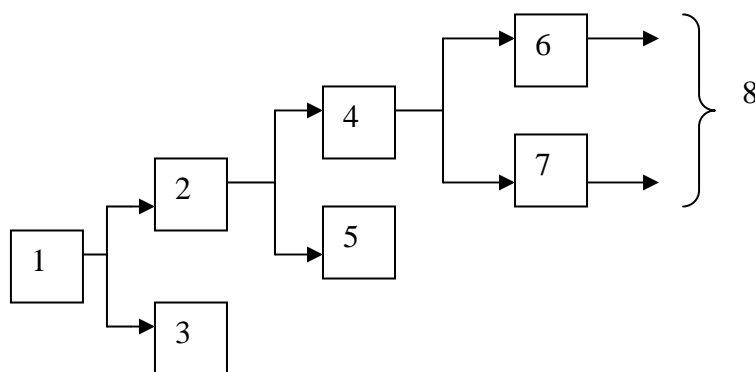


Рис.2.8. Дерево решений, используемое при проведении анализа аварий.

1- анализ возможных аварий; 2 – выявлена возможность наступления аварий, аварии классифицированы; 3 – возможность аварии не выявлена; 4 – решение применить защитные мероприятия; 5 – решение, что аварии и риск приемлемы; 6 – мероприятия, направленные на устранение возможности аварий; 7 – мероприятия, направленные на устранение тяжелых последствий аварий; 8 – решение применить и те и другие мероприятия.

Принятие решения о том, какие мероприятия и в каком соотношении применять в каждом конкретном случае, является одной из задач исследования риска.

Таким образом первый этап исследования риска - предшествующий анализ аварий - представляет собой первую попытку определения элементов технических средств системы и событий, которые могут привести к авариям



системы, причем эта попытка выполняется тогда, если система, которая анализируется, находится еще на стадии проектирования.

Подробный анализ событий, которые могут привести к аварии, обычно выполняется с помощью методологии, которая основывается на использовании деревьев ошибок, и лишь после того, как разрабатываемая система полностью определена: подробный анализ отказов оснащения, который ведется на основе использования таких методик, как анализ видов отказов и их последствий, также выполняется на более поздних стадиях проектирования.

Таким образом, оценка риска включает оценку вероятности события в сочетании с анализом последствий и позволяет представить количественное выражение опасности через величину риска. При оценке важным этапом является определение моделируемых событий. Для оценки вероятности существует два основных подхода:

- использование существующих сведений об авариях на заводах или отказах систем (анализ аварийности);
- анализ протекания аварии с целью определения необходимой вероятности.

#### *2.4.1. Определение последовательности негативных событий, дерева событий, дерева ошибок.*

Рассмотрим на примере работу по исследованию безопасности атомного реактора. На первом этапе исследования риска было выявлено, что основной причиной риска, создаваемого реактором, является возможность выброса в окружающую среду радиоактивных (токсичных) продуктов ядерного распада. Как вытекает из рис.2.9 этап исследования безопасности реактора начинается задачей по определению последовательности аварийных событий, которые могут привести к радиоактивному выбросу в окружающую

среду, то есть задачей определения разных путей, которые могут привести к радиоактивному выбросу.

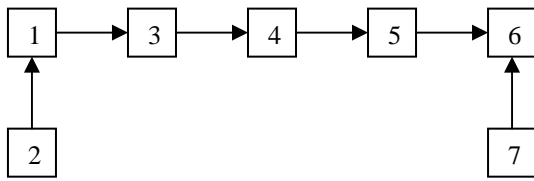


Рис.2.9. Семь основных задач при исследовании безопасности реактора: 1 -определение последовательности негативных событий; 2 – назначение уровней вероятностей событий; 3 – анализ возможности выброса продуктов ради активного распада из зоны реактора; 4 - анализ возможности распространения продуктов выброса в окружающую среду; 5 - анализ возможности влияния продуктов распада на здоровье людей и имущество; 6 – общая оценка риска; 7 – анализ других причин возможного риска.

Результаты первого этапа исследования безопасности реактора показывают, что критической подсистемой, отказ которой может привести к радиоактивному выбросу в окружающую среду, является система охлаждения реактора. Поэтому второй этап исследования риска начинается с просмотра возможных последовательностей событий, которые наступают после разрыва трубопровода (обеспечивает подачу охлаждающей жидкости (хладоагента) до зоны реактора и назад до холодильников) системы охлаждения – события, которые обозначено как инициирующее событие (рис.2.10) и которому присвоена вероятность наступления  $P_A$ .

Рассмотрим последовательность событий, которые приводят к аварийному событию, состоящему в отсутствии хладоагента в системе охлаждения типичной атомной электростанции. Круг аварийных событий начинается разрывом трубопровода, предназначенного для подачи хладоагента, вероятность наступления этого события  $P_A$ . Затем исследуются разные события в системе, которые могут наступить после разрыва трубопровода. В верхней части рис. 2.10 изображено основное дерево событий, в котором показаны все возможные альтернативы дальнейшего развития событий.

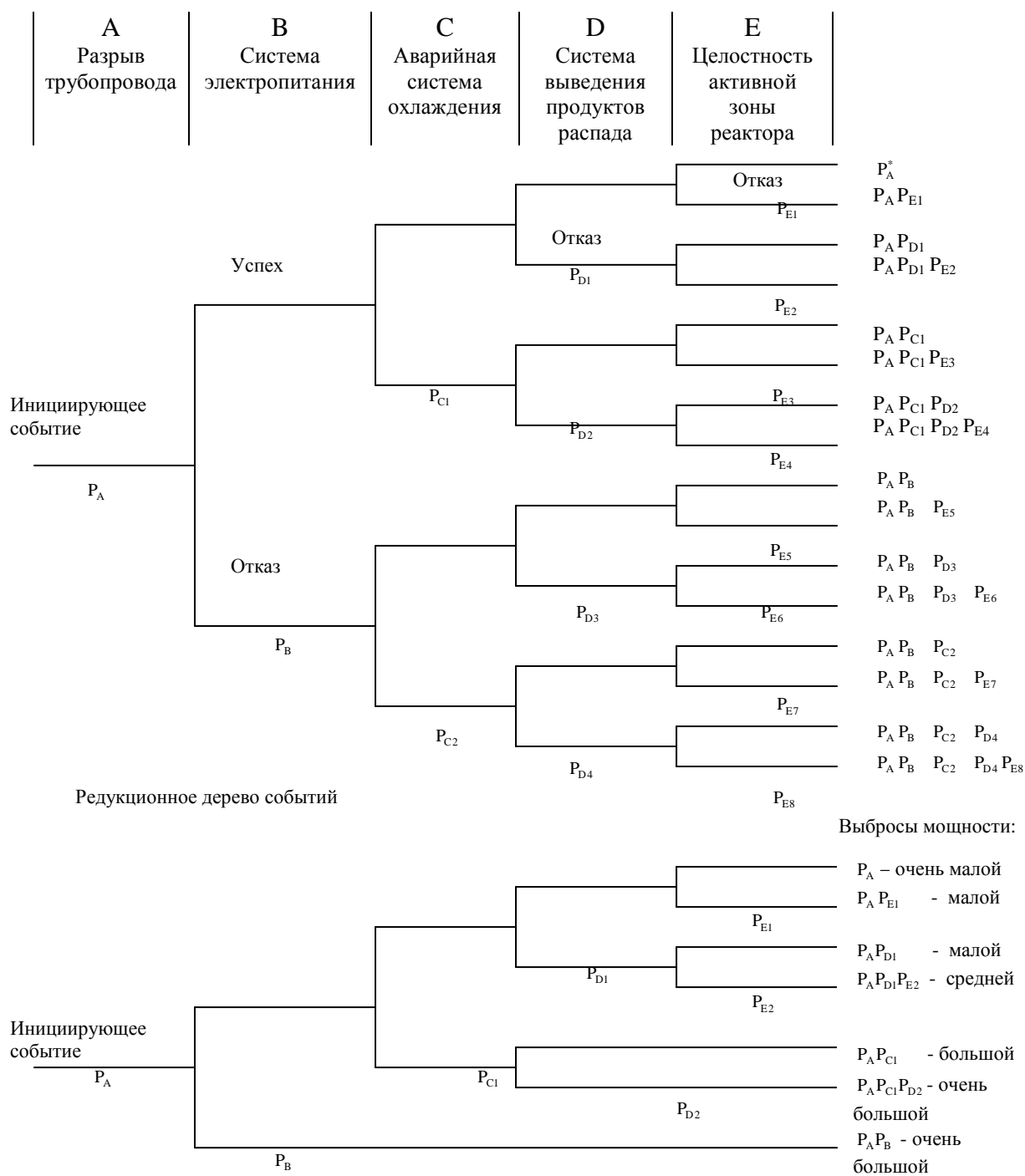


Рис.2.10 Редукция дерева событий. \* - указанная величина является аппроксимацией более сложного выражения, а именно  $P_A \cdot (1 - P_B) \cdot (1 - P_{C1}) \cdot (1 - P_{D1}) \cdot (1 - P_{E1})$ . Возможность такой аппроксимации обусловлена тем, что все величины  $P$ , которые входят в приведенную формулу, очень малы.

Первый (начиная слева направо) узел дерева событий отображает разветвление возможного дальнейшего развития событий в зависимости от состояния системы электропитания. Если питание в системе есть, то далее рассматривается поведение следующей системы – аварийной системы охлаждения. Отказ аварийной системы охлаждения, сопутствующий отказу основной системы охлаждения, приводит к расплавлению ядерного топлива и радиоактивному выбросу в окружающую среду, мощность которого определяется состоянием активной зоны реактора. На практике, как правило, основное дерево событий может быть редуцировано на основе простого применения инженерной логики, что и иллюстрируется редуцированием дерева событий, которое изображено в нижней части рис. 2.10.

Наиболее важным вопросом в этом рассмотрении есть вопрос о работоспособности системы электропитания в условиях разрыва трубопровода основной системы охлаждения. Суть вопроса лежит в определении вероятности отсутствия электропитания  $P_B$  и определении того, как отсутствие электропитания может повлиять на функционирование остальной системы, что учитывается при построении дерева событий. В условиях отсутствия электропитания ни аварийное охлаждение реактора, ни любая другая из представленных на рис.2.10 функций не могут быть выполнены.

Поэтому нет необходимости рассматривать возможное дальнейшее разветвление процесса развития событий при отсутствии электропитания, что и приводит к редуцированному дереву событий. В этом случае состоится очень мощный выброс радиоактивных продуктов распада в окружающую среду, вероятность которого определяется произведением вероятностей  $P_A P_B$ . Если работоспособность системы электропитания как-то зависит от состояния трубопровода основной системы охлаждения, то вероятность  $P_B$ , которая входит в приведенное выше выражение, надо вычислять как условную вероятность отказа системы электропитания в случае разрыва трубопровода основной системы охлаждения с тем, чтобы вычислить

указанную выше зависимость. Следует ясно понимать, что дерево событий используется для определения последовательности аварийных событий, обусловленной сложными взаимосвязями между системами защиты разрабатываемой системы. Построение дерева события осуществляется на основе прямых логических соображений. Например, дерево событий в нашем случае строится на основе логических соображений, направленных на решение вопроса "Что будет, если произойдет разрыв трубопровода системы охлаждения?". Такие вероятности, как, например, вероятность отказа системы электропитания  $P_B$ , определяется на основе обратных логических соображений (отображенных на дереве ошибок), используемых для решения вопроса о том, что может привести к отказу системы электропитания. Это решение достигается построением дерева ошибок для подсистемы электропитания. Аварийная система охлаждения может пребывать как в работоспособном состоянии, так и в неработоспособном состоянии. Вероятность пребывания аварийной системы охлаждения в неработоспособном состоянии  $P_{C1}$  определяет дальнейшее развитие аварийных событий. Если аварийная система охлаждения неработоспособна, то дальнейшее развитие процесса определяется состоянием системы выведения продуктов распада из активной зоны реактора. Если система выведения продуктов распада работоспособна, то мощность радиоактивного выброса в окружающую среду будет меньше, чем тогда, когда эта система неработоспособна. В результате анализа всего построенного дерева событий получаем спектр возможных мощностей радиоактивных выбросов в окружающую среду, обусловленных разрывом трубопровода основной системы охлаждения реактора в зависимости от работоспособности или неработоспособности других систем реактора.

Процесс построения дерева ошибок (отказов) показан на рис.2.11. Отрицательное событие в системе изображается как главное событие и связывается с многочисленными базовыми событиями с указанием этих событий и логических операторов над ними. Безотказная работа или отказ

системы могут быть поданы как определенные комбинации главных событий, каждое из которых определяется как объединение с помощью оператора "ИЛИ" всех возможных в системе аварийных ситуаций, которые образуют некоторое дерево ошибок. Основное преимущество дерева ошибок в сравнении с другими методами, такими, как метод анализа видов отказов и их последствий, состоит в том, что исследование ограничивается только теми элементами системы и теми событиями, какие приводят к конкретному опасному отказу или аварии.

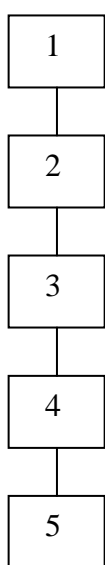


Рис.2.11 Основные принципы построения дерева ошибок: 1 – отказ или авария системы (главное событие); 2 – дерево ошибок представляется последовательностью событий, которые приводят к отказу или аварии системы; 3 – последовательности событий строятся с помощью операторов "И", "ИЛИ" и др.; 4 - все входные и выходные события, которые составляют дерево ошибок изображаются в виде прямоугольников, в середине которых описаны соответствующие события; 5 – последовательности событий наконец приводят к базовым событиям, частоты возникновения которых известны; базовые события изображаются в виде окружностей и являются границей анализа дерева ошибок.

Использование деревьев ошибок дает возможность определять такие показатели, как коэффициент неготовности и вероятность отказа технических систем, на основе экспериментальных данных про интенсивности отказов технических средств и ошибок человека, которые получают в результате специальных испытаний или обобщения опыта эксплуатации.

**Пример 2.1.** На рис.2.12 дано схематичное изображение последовательной системы, состоящей из насосного устройства и вентиля. Вероятность успешной работы насосного устройства и вентиля составляют соответственно 0,98 и 0,95. На рис.2.12 б) изображено дерево

решений для системы. Все его ветви, которые отвечают наступлению желаемого события, направлены кверху от соответствующего узла, а все ветви, которые отвечают негативным событиям, - вниз. Если насос находится в неработоспособном состоянии, то и вся система пребывает в неработоспособном состоянии независимо от состояния вентиля. Если насосное устройство работоспособно, то в следующей узловой точке дерева анализируется состояние вентиля.

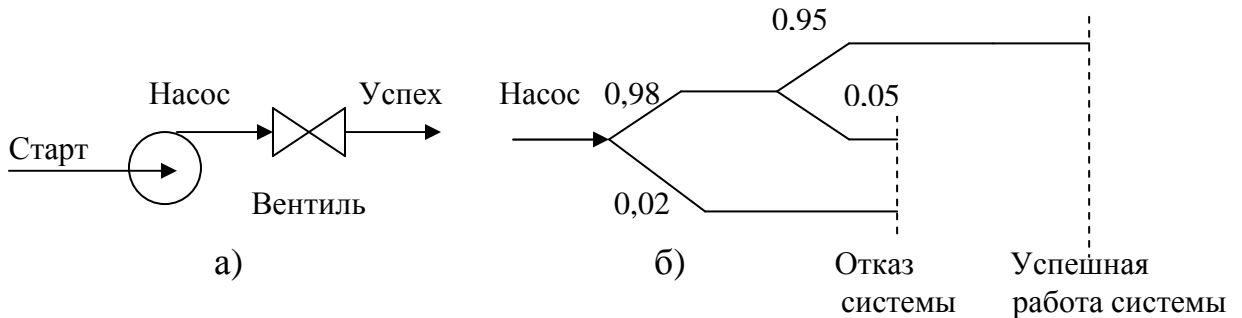


Рис. 2.12 Схема (а) и дерево решений (б) для двухкомпонентной системы.

Вероятность успешной работы системы (вероятность совместного появления двух независимых событий равна произведению их вероятностей) составляет:

$$0,98 \cdot 0,95 = 0,931.$$

Вероятность отказа системы равняется:

$$0,02 + 0,98 \cdot 0,05 = 0,069.$$

Эти два события образуют полную группу возможных состояний системы, так что сумма вероятностей наступления этих событий равна 1.

Эти же самые результаты можно получить с помощью таблиц вероятностей.

Для рассматриваемой системы имеем:

Состояние насосного устройства	Состояние вентиля	Вероятность успешной работы системы	Вероятность отказа системы
Работоспособный	Работоспособный	$0,98 \cdot 0,95$	$0,02 \cdot 0,95$
Неработоспособный	Работоспособный	$0,98 \cdot 0,05$	
Работоспособный	Неработоспособный		$0,02 \cdot 0,05$
Неработоспособный	Неработоспособный		
Итого:		0,931	0,069

Анализ дерева неполадок – алгоритм построения последовательностей событий, приводящих к основному событию, позволяющий вычислить вероятность основного события, исходя из вероятностей элементарных событий. При анализе "деревьев отказов" (АДО) выявляются комбинации отказов (неполадок) оборудования, инцидентов, ошибок персонала и нерасчетных внешних (техногенных, природных) воздействий, приводящих к главному событию (аварии). Метод используется для анализа возможных причин возникновения аварийной ситуации и расчета ее частоты (на основе знания частот исходных событий). При анализе дерева отказа (аварии) рекомендуется определять минимальные сочетания событий, определяющие возникновение или невозможность возникновения аварии (минимальное пропускное и отсечное сочетания, соответственно, см. пример 2.6).

Анализ "дерева событий" (АДС) - алгоритм построения последовательности событий, исходящих из основного события (аварийной ситуации). Используется для анализа развития аварийной ситуации. Дерево неполадок само по себе не является ни мерой риска, ни мерой опасности. Анализ дерева неполадок – алгоритм (набор формальных правил), приводящих «к основному событию» (событию в вершине дерева). Методология предсказания риска, обусловленного нарушением функционирования систем, включает в себя алгоритмы построения (возможных последовательностей событий, приводящих к нежелательному исходу), использующие булеву алгебру, и обеспечивает возможность вычисления вероятности каждого такого события. Такой анализ дерева неполадок помимо того, что он служит одним из алгоритмов оценки риска, является важным инструментом качественного описания типов неисправностей, т.е. путей, которые приводят к любому из промежуточных событий или основному событию. Промежуточное событие, рассматриваемое как «неисправность компоненты системы», может служить также и основным событием при вспомогательном анализе дерева неполадок.



Например, отказ электромотора может быть «неисправностью компоненты системы», являющейся промежуточной неисправностью и необходимой для наступления основного события. Однако, тот же отказ электромотора может рассматриваться и как основное событие в рамках анализа дерева неполадок этого аппарата. Глубина анализа дерева неполадок (т.е. длина рассматриваемых при таком анализе ветвей) неограниченна, однако на практике она определяется подходом и навыками исследователя.

Необходимо подчеркнуть, что нет «чистого риска». Анализ дерева неполадок предполагает, прежде всего, существование системы, все равно какой – действующей или проектируемой, а затем уже возможность представления схемы ее функционирования. События, приводящие к основному событию дерева неполадок, и само это основное событие – реализация опасностей. Поэтому анализ опасностей должен предшествовать анализу риска. Частота каждого сценария развития аварийной ситуации рассчитывается путем умножения частоты основного события на условную вероятность конечного события (например, аварии с разгерметизацией оборудования с горючим веществом в зависимости от условий могут развиваться как с воспламенением, так и без воспламенения вещества).

#### *2.4.2. Анализ возможных последствий.*

Для рассмотренного примера исследования безопасности реактора на заключительной фазе исследования риска необходимо:

1. Определить количество токсичных веществ или энергии, рассеяных в окружающую среду, для каждого возможного пути развития аварийных событий (задача 3, рис.2.9).
2. Проследить пути распространения смертельных токсинов, ударной волны, фронта пожара и т.п. (задача 4, рис. 2.9).

3. Выполнить оценку возможных убытков имуществу и вреда здоровью людей в результате возможных аварий (задача 5, рис.2.9).
4. Выполнить общую оценку использованной технологии (задача 6, рис.2.9); оценка строится на основе сравнения показателей риска, связанных с исследуемым объектом, с показателями риска, связанных с другими гражданскими объектами и явлениями (задача 7, рис.2.9).

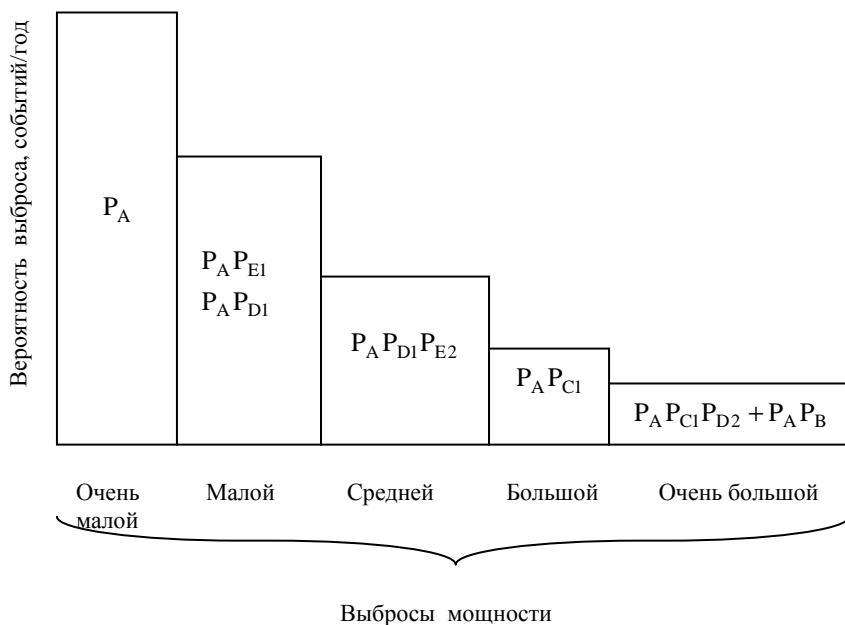


Рис.2.13. Гистограмма частот радиоактивных выбросов разной мощности в окружающую среду.

Результатом решения задачи 3 является в этом случае гистограмма распределения вероятностей радиоактивных выбросов в окружающую среду разной мощности (рис. 2.13).

*2.4.3. Коэффициенты готовности и неготовности для простых систем с независимыми базовыми событиями.*

Рассмотрим дерево ошибок, изображенное на рис.2.14 - а) - главное событие определено как одновременное появление базовых событий  $V_1, V_2, \dots, V_n$ . Коэффициент неготовности системы  $Q_s(t)$  (вероятность того,

что в момент времени  $t$  в системе будет иметь место главное событие; это может быть вероятность отказа системы или вероятностью наличия в системе в момент времени  $t$  системной аварии определенного вида) определяется как вероятность наличия в момент времени  $t$  всех базовых событий:

$$Q_s(t) = \begin{cases} P(B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n); \\ P(B_1) \cdot P(B_2) \cdot \dots \cdot P(B_n), \end{cases}$$

где символ  $\cap$  – означает пересечение событий  $B_1, B_2, \dots, B_n$ .

Для оператора ”И” с двумя входными событиями это выражение упрощается:

$$Q_s(t) = P(B_1) \cdot P(B_2).$$

На рис.2.14 б) - главное событие совершается в момент времени  $t$  тогда и только тогда, когда хотя бы одно из  $n$  базовых событий имеет место в момент времени  $t$ . Отсюда вытекает, что коэффициент готовности  $A_s$  и коэффициент неготовности системы  $Q_s(t)$  определяются выражениями:

$$A_s(t) = P(\bar{B}_1 \cap \bar{B}_2 \cap \dots \cap \bar{B}_n);$$

$$Q_s(t) = P(B_1 \cup B_2 \cup \dots \cup B_n).$$

Здесь символ  $\cup$  – означает объединение событий,  $\bar{B}_i$  – невыполнение события в момент времени  $t$ .

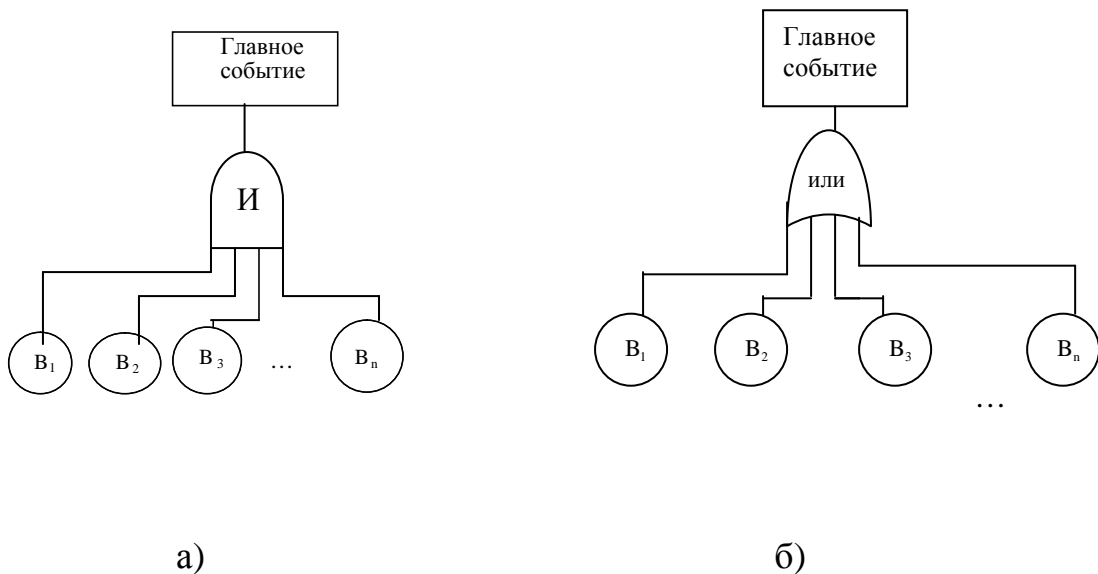


Рис. 2.14. Дерево ошибок, образованное оператором ”И” а) и ”ИЛИ” б).

Коэффициент готовности  $A_s$  - вероятность того, что в момент времени  $t$  система не будет находиться в состоянии, которая квалифицируется как главное событие. Это может быть вероятность успешного функционирования системы, если главное событие определено как объединение всех аварийных ситуаций системы с помощью оператора "ИЛИ". Это может быть также вероятность невозникновения аварии какого-нибудь конкретного вида, если главное событие представляет собой одиночную аварийную ситуацию. Коэффициенты готовности и неготовности системы дополняют друг друга таким образом, что выполняется равенство (сумма противоположных событий равна 1):

$$A_s(t) + Q_s(t) = 1.$$

Вероятность безотказной работы системы  $R_s(t)$  – вероятность того, что главное событие не возникнет в течении времени  $(0, t)$  и отличается от коэффициента готовности тем, что предполагает невозникновение главного события на протяжении продолжительного временного интервала, тогда как коэффициент готовности отбивает состояние системы в некоторый фиксированный момент времени. В соответствии с этим справедливо неравенство  $R_s(t) \leq A_s(t)$ . Вероятность отказа системы  $F_s(t)$  - вероятность того, что до окончания времени  $t$  возникает главное событие системы. Здесь также выполняется равенство  $R_s(t) + F_s(t) = 1$ . Вероятность отказа системы всегда больше или равна коэффициенту неготовности системы, т.е.  $F_s(t) \geq Q_s(t)$ .

Независимость событий  $B_1, B_2, \dots, B_n$  означает независимость запрета их. Выражение для коэффициента готовности можно переписать в виде:

$$A_s(t) = P(\bar{B}_1) \cdot P(\bar{B}_2) \cdot \dots \cdot P(\bar{B}_n) = [1 - P(B_1)] \cdot [1 - P(B_2)] \cdot \dots \cdot [1 - P(B_n)],$$

Коэффициент неготовности системы можно вычислить следующим образом:

$$Q_s(t) = P(B_1 \cup B_2 \cup \dots \cup B_n) = 1 - A_s(t) = 1 - [1 - P(B_1)] \cdot [1 - P(B_2)] \cdot \dots \cdot [1 - P(B_n)] \quad (2.3)$$

Для  $n = 2$  имеем:

$$Q_s(t) = \begin{cases} P(B_1 \cup B_2); \\ P(B_1) + P(B_2) - P(B_1) \cdot P(B_2). \end{cases}$$

Другими словами, вероятность того, что одно из двух событий имеет место, равна сумме вероятностей этих событий минус вероятность их совместного появления.

Для  $n = 3$  получаем

$$Q_s(t) = P(B_1 \cup B_2 \cup B_3) = P(B_1) + P(B_2) + P(B_3) - P(B_1) \cdot P(B_2) - P(B_2) \cdot P(B_3) - P(B_1) \cdot P(B_3) + P(B_1) \cdot P(B_2) \cdot P(B_3). \quad (2.4)$$

Дерево ошибок, изображенное на рис.2.15, воссоздает систему голосования, которая выдает на выход сигнал, если  $m$  или больше ее компонентов работают правильно. Соответственно этому на дереве ошибок сигнал на выходе оператора, который воссоздает возникновение главного события, возникает тогда, если более чем  $m$  компонентов генерируют неправильный сигнал управления. Широко распространенным объектом использования схем голосование "m из n" являются системы защиты, в которых желательно избегать ошибочных отсоединений при появлении неправильного сигнала управления от одного блока защиты.

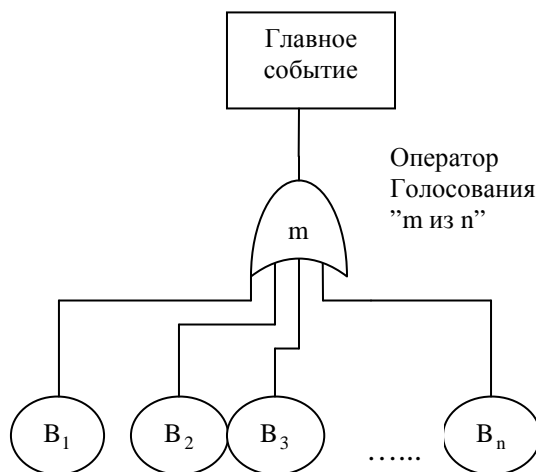


Рис. 2.15. Система голосования  $m$  из  $n$ .



Рис.2.16. Отключение системы "2 из 3"

В качестве примера рассмотрим схему голосования "2 из 3", используемую в отключаемых устройствах и изображенную на рис.2.16. Отключение схемы происходит, если 2 из 3 блоков защиты генерируют сигнал отключения.

Рассмотрим случай, если система, которую защищают, функционирует нормально и отключение не требуется. В рассматриваемой схеме сигнал ошибки на отключение генерируется только в том случае, если больше чем один блок защиты дают ошибочные сигналы. Дерево ошибок для рассматриваемой системы изображено на рис.2.17 (оно представляет собой отдельный случай дерева, показанного на рис.2.15).

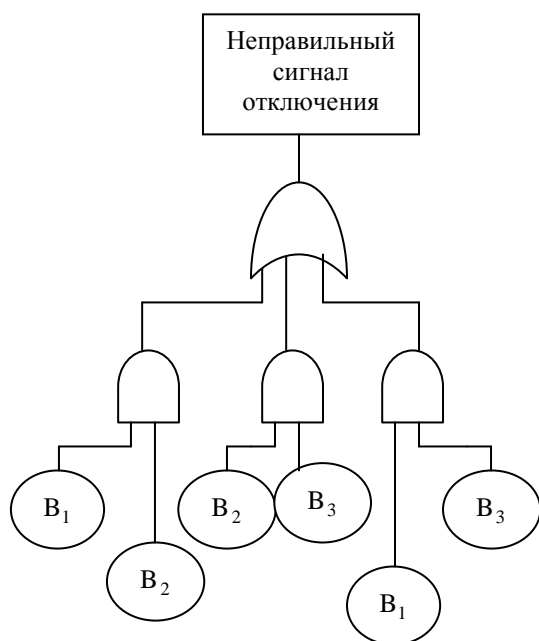


Рис. 2.17. Дерево ошибок для системы "2 из 3" ( $B_i$  – неправильный сигнал от блока защиты  $i$ ).

Оператор "m из n", подобный изображенного на рис.2.15, всегда можно заменить определенной комбинацией операторов "И" и "ИЛИ". Другой подход к аналитическому исследованию состоит в прямом применении биномиального распределения Бернулли.

Допустим, что все первичные события имеют вероятность  $Q$ :

$$P(B_1) = P(B_2) = \dots = P(B_n) = Q.$$

Соответственно биномиальному распределению для вероятности того, что в  $n$  опытах возникает точно  $m$  положительных результатов, если вероятность положительного результата равняется  $Q$ , имеем

$$P(m:n, Q) = \binom{n}{m} Q^m \cdot (1 - Q)^{n-m}. \quad (2.5)$$

Это выражение выведено в предположении, что один из возможных путей отыскания  $m$  положительных результатов состоит в получении  $m$  положительных результатов в первых  $m$  опытах, а потом  $n-m$  отказов в  $n-m$  следующих опытах. Вероятность получения такой последовательности результатов равна  $Q^m \cdot (1 - Q)^{n-m}$ . Общее число последовательностей, каждая из которых содержит точно  $m$  положительных, равняется числу сочетаний из  $n$  по  $m$ :

$$\binom{n}{m} = \frac{n!}{m!(n-m)!}.$$

Таким образом,  $P(m:n, Q)$  является суммой вероятностей для всех указанных последовательностей, что и доказывает выражение (2.5). Используя это выражение для анализа задач безотказности, следует иметь в виду, что в рассматриваемой схеме главное событие возникает в том случае, если есть более чем  $m-1$  из  $n$  базовых событий. Таким образом, необходимо взять сумму для всех  $k$  в выражении (2.5), чтобы получить главное событие

$$Q_s(t) = P(m \leq k \leq n) = \sum_{k=m}^n \binom{n}{k} Q^k \cdot (1 - Q)^{n-k}. \quad (2.6)$$

**Пример 2.2.** Система "2 из 3". Вычислить коэффициент неготовности для дерева ошибок с оператором "2 из 3", которое изображено на рис.2.18, и для дерева ошибок, в котором используется оператор "ИЛИ" (рис.2.19).

Решение. Коэффициент неготовности  $Q_{s,1}(t)$  для рис.2.18 вычисляется согласно последнего выражения:

$$Q_{s,1}(t) = \binom{3}{2} \cdot Q^2 \cdot (1-Q) + \binom{3}{3} \cdot Q^3 \cdot (1-Q)^0 = 3Q^2 - 2Q^3.$$

Коэффициент неготовности  $Q_{s,2}(t)$  для рис.2.19 можно найти из (2.3) или (2.4):

$$Q_{s,2}(t) = 1 - (1-Q)^3 = 3Q - 3Q^2 + Q^3.$$

Итак,

$$Q_{s,2} - Q_{s,1} = 3Q(1-Q)^2 > 0, \quad 0 < Q < 1.$$

Таким образом, приходим к выводу, что система защиты по схеме "2 из 3" имеет меньшую вероятность ошибочного отключения, чем система, построенная по схеме "ИЛИ".

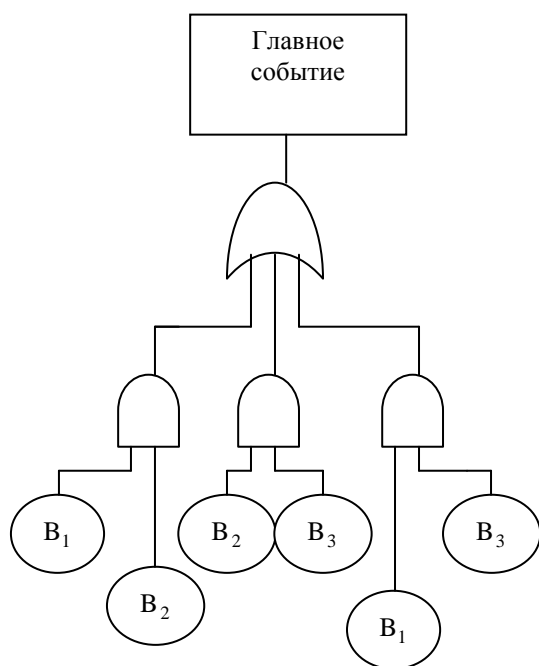


Рис.2.18. Дерево ошибок для системы "2 из 3" [ $P(B_i) = Q$ ].

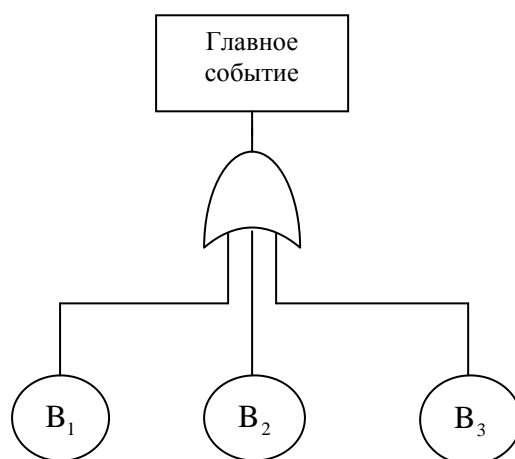


Рис.2.19. Дерево ошибок для системы с оператором "ИЛИ" [ $P(B_i) = Q$ ].

**Пример 2.3. Простые комбинации операторов.** Вычислить коэффициент неготовности для системы, изображенной деревом ошибок (рис.2.20), при обозначенных на дереве ошибок значений вероятностей базовых событий.



Решение. Применяя соотношение для  $Q_s(t)$  (оператор "ИЛИ") находим:

$$P(S_I) = 1 - (1 - 0,05)(1 - 0,07)(1 - 0,1) = 0,20485.$$

Для оператора II (оператор 2 из 3) согласно (2.6) имеем:

$$P(S_{II}) = \sum_{k=2}^3 \binom{3}{k} \cdot 0,09^k \cdot (1 - 0,09)^{3-k} = \binom{3}{2} \cdot 0,09^2 \cdot (1 - 0,09) + \binom{3}{3} \cdot 0,09^3 \cdot (1 - 0,09)^0 = 0,022842.$$

Применяя соотношение  $Q_s(t) = P(B_1) \cdot P(B_2) \cdot \dots \cdot P(B_n)$ , находим для оператора "И":

$$Q_s(t) = P(S_I) \cdot P(S_{II}) \cdot P(D) = 0,20485 \cdot 0,022842 \cdot 0,01 = 4,68 \cdot 10^{-5}.$$

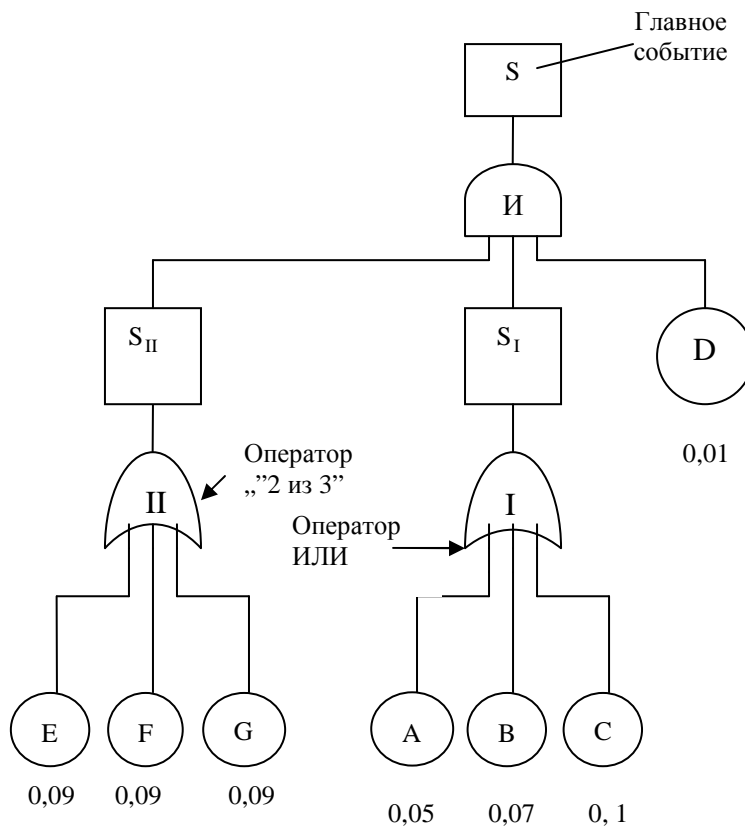


Рис.2.20. Простая комбинация операторов.

**Пример 2.4.** Система охлаждения и очистки попутного газа. Система изображена в виде упрощенного дерева ошибок на рис. 2.21.

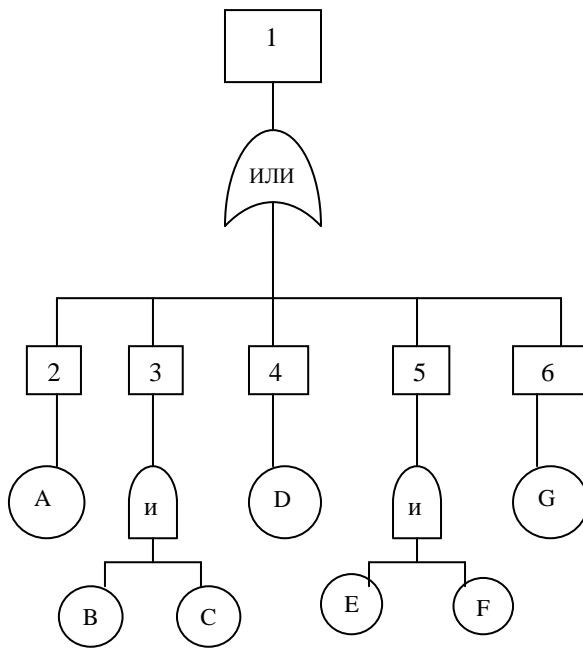


Рис 2.21. Дерево ошибок для системы охлаждения и очистки попутного газа: 1- отказ системы; 2-отказ компрессора; 3-отказ системы насосов охлаждающего устройства; 4 – отказ насоса подачи воды; 5- отказ системы насосов, которые обеспечивают циркуляцию паров в газоочистной колонне; 6 - отказ фильтра.

Система предназначена для выполнения следующих заданий:

- 1) снижение температуры с помощью водяного охлаждения;
- 2) насыщение газа водным паром;
- 3) удаление твердых частичек, которые помещаются в газе.

Как вытекает из дерева ошибок, для возникновения главного события необходим отказ компрессора (A) или обоих насосов охлаждающего устройства (B и C) или отказ подачи воды (D) или обоих насосов (E и F), которые обеспечивают циркуляцию пара в газоочистителе, или систему фильтрации (G). Выражение для главного события в рассмотренном дереве ошибок имеет вид:

$$S = A \cup (B \cap C) \cup D \cup (E \cap F) \cup G. \quad (2.7)$$

Вычислить коэффициент неготовности системы  $Q_s(t) = P(S)$ , используя следующие данные:  $P(A) = 0,9; P(B) = 0,8; P(C) = 0,7; P(D) = 0,6; P(E) = 0,5; P(F) = 0,4; P(G) = 0,3$ .

Решение. Вычисления будем выполнять последовательными шагами:

$$P(B \cap C) = 0,8 \cdot 0,7 = 0,56;$$

$$P(A \cup (B \cap C)) = 0,9 + 0,56 - 0,9 \cdot 0,56 = 0,956;$$

$$P(A \cup (B \cap C) \cup D) = 0,956 + 0,6 - 0,956 \cdot 0,6 = 0,9824;$$

$$P(E \cap F) = 0,5 \cdot 0,4 = 0,2;$$

$$P(A \cup (B \cap C) \cup D(E \cap F)) = 0,9824 + 0,2 - 0,9824 \cdot 0,2 = 0,98592;$$

$$Q_s(t) = P(S) = 0,98592 + 0,3 - 0,98592 \cdot 0,3 = 0,990144.$$

#### 2.4.4. Определение коэффициента готовности на основе структурной схемы расчета надежности

Структурная схема расчета надежности - это альтернативный способ представления событий и операторов, которые можно назвать деревьями безотказной работы; эти деревья математически дуальные деревьям отказов. На деревьях безотказной работы вершина дерева представляет собой безотказную работу системы, а события воссоздают не состояния отказов, а безотказную работу соответствующих компонентов. Рассмотрим более подробно систему охлаждения и очистки попутного газа. Структурная схема для расчета надежности этой системы представлена на рис.2.22.

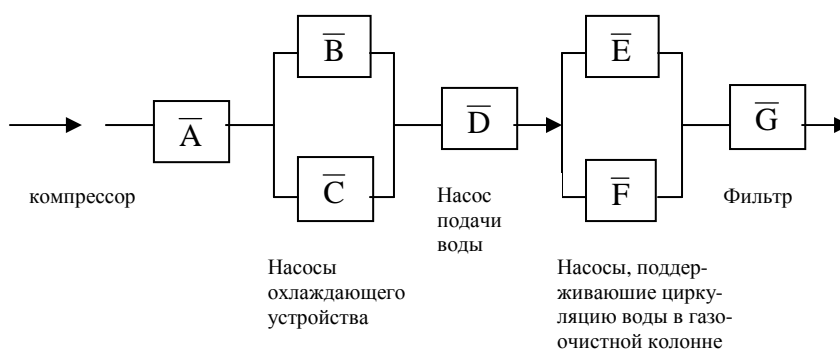


Рис.2.22. Блок-схема расчета надежности для системы охлаждения и очистки попутного газа.

Соответственно этой структурной схеме для того, чтобы система была в работоспособном состоянии, необходимо безотказная работа компрессора ( $\bar{A}$ ), одного из насосов охлаждающего устройства ( $\bar{B}$  или  $\bar{C}$ ), насоса пода-

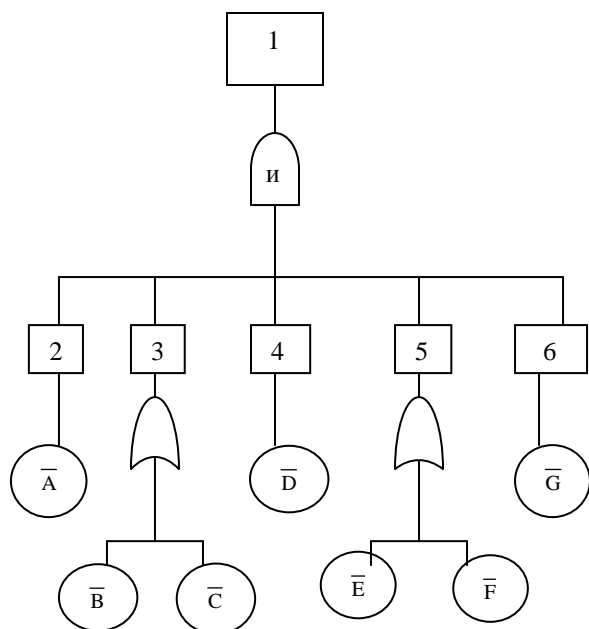


Рис. 2.23. Дерево безотказной работы для системы охлаждения и очистки попутного газа: 1- система работоспособна; 2- работоспособное состояние компрессора; 3- работоспособное состояние насосов охлаждающего устройства; 4- работоспособное состояние насосов подачи воды; 5 – работоспособное состояние системы насосов, которые поддерживают циркуляцию пара в газоочистной колонне; 6 – работоспособное состояние фильтра.

чи воды ( $\bar{D}$ ), одного из насосов, которые поддерживают циркуляцию воды в газоочистителе ( $\bar{E}$  или  $\bar{F}$ ) и в системе фильтрации ( $\bar{G}$ ).

На рис.2.23 показано дерево безотказной работы, эквивалентное структурной схеме 2.22 расчета надежности. Выражение для дерева безотказной работы в булевских операторах имеет вид:

$$\bar{S} = \bar{A} \cap (\bar{C} \cup \bar{B}) \cap \bar{D} \cap (\bar{F} \cup \bar{E}) \cap \bar{G}. \quad (2.8)$$

Здесь  $\bar{A}, \dots, \bar{G}$  – события, состоящие в том, что компоненты  $\bar{A}, \dots, \bar{G}$  находятся в работоспособном состоянии, а  $\bar{S}$  – событие, состоящее в том, что система находится в работоспособном состоянии. События  $\bar{A}, \dots, \bar{G}$  противоположны базовым событиям  $A, \dots, G$  использованных в дереве ошибок рис.2.21.

Поскольку система в момент времени  $t$  может находиться в одном из двух состояний – работоспособном и неработоспособном, событие  $\bar{S}$  в выражении (2.8) является дополнением события  $S$  (2.7).

Коэффициент готовности  $A_s(t)$  можно найти через вероятность  $P(\bar{S})$  таким образом. Из примера 2.4 имеем:

$$P(\bar{A}) = 0,1; P(\bar{B}) = 0,2; P(\bar{C}) = 0,3; P(\bar{D}) = 0,4; P(\bar{E}) = 0,5; P(\bar{F}) = 0,6; P(\bar{G}) = 0,7.$$

Тогда

$$A_s(t) = P(\bar{S}) = 0,1 \cdot [0,3 + 0,2 - 0,3 \cdot 0,2] \cdot 0,4 \cdot [0,6 + 0,5 - 0,6 \cdot 0,5] \cdot 0,7 = 0,009856.$$

Найденные значения коэффициента готовности и значения коэффициента неготовности из предыдущего примера отвечают равенству:

$$A_s(t) + Q_s(t) = 0,009856 + 0,990144 = 1.$$

Рассмотренные примеры показывают следующее:

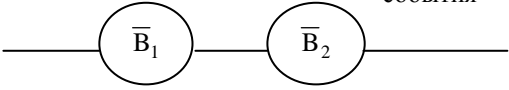
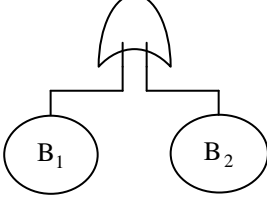
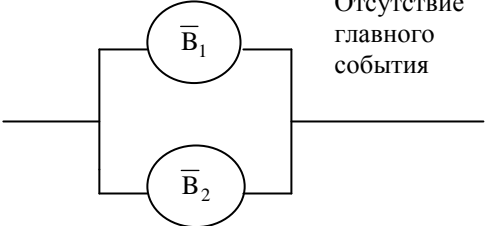
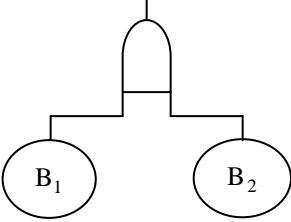
1. Параллельное соединение на структурной схеме расчета надежности отвечает оператору "И" в дереве ошибок, а последовательное - дереву ошибок, построенному на основе оператора "ИЛИ" (табл.2.4). Параллельное соединение компонентов в структуре образует параллельную систему, а последовательное - последовательную систему.

2. Если заменить базовые события  $B_1, \dots, B_n$  событиями что дополняют их, то методику определения коэффициента неготовности для дерева ошибок можно непосредственно применить для расчета коэффициента готовности соответственно дереву безотказной работы:

$$P(\bar{B}_1 \cap \bar{B}_2 \cap \dots \cap \bar{B}_n) = P(\bar{B}_1) \cdot P(\bar{B}_2) \cdot \dots \cdot P(\bar{B}_n);$$

$$P(\bar{B}_1 \cup \bar{B}_2 \cup \dots \cup \bar{B}_n) = 1 - [1 - P(\bar{B}_1)] \cdot [1 - P(\bar{B}_2)] \cdot \dots \cdot [1 - P(\bar{B}_n)]$$

Таблица 2.4.

Блок-схема расчет надежности	Дерево ошибок
<p data-bbox="373 277 743 309">Последовательная система</p> <p data-bbox="668 338 804 427">Отсутствие главного события</p>  <p data-bbox="352 566 756 611"><math>P(\bar{B}_1 \cap \bar{B}_2) = P(\bar{B}_1) \cdot P(\bar{B}_2)</math></p>	<p data-bbox="1129 309 1230 376">Главное событие</p>  <p data-bbox="879 656 1509 701"><math>P(B_1 \cup B_2) = P(B_1) + P(B_2) - P(B_1)P(B_2)</math></p>
<p data-bbox="400 725 711 757">Параллельная система</p> <p data-bbox="620 808 756 898">Отсутствие главного события</p>  <p data-bbox="272 1093 831 1137"><math>P(\bar{B}_1 \cup \bar{B}_2) = P(\bar{B}_1) + P(\bar{B}_2) - P(\bar{B}_1)P(\bar{B}_2)</math></p>	<p data-bbox="1129 757 1230 824">Главное событие</p>  <p data-bbox="1046 1122 1430 1167"><math>P(B_1 \cap B_2) = P(B_1)P(B_2)</math></p>

**Пример 2.5.** Анализ "деревьев отказов и событий".

Пример дерева событий для количественного анализа различных сценариев аварий на установке переработки нефти представлен на рис.2.24.

Цифры рядом с наименованием события показывают условную вероятность возникновения этого события. При этом вероятность возникновения инициирующего события (выброс нефти из резервуара) принята равной 1. Значение частоты возникновения отдельного события или сценария пересчитывается путем умножения частоты возникновения инициирующего события на условную вероятность развития аварии по конкретному сценарию. Вероятность разгерметизации дегидрататора  $P = 10^{-4}$  1/год.

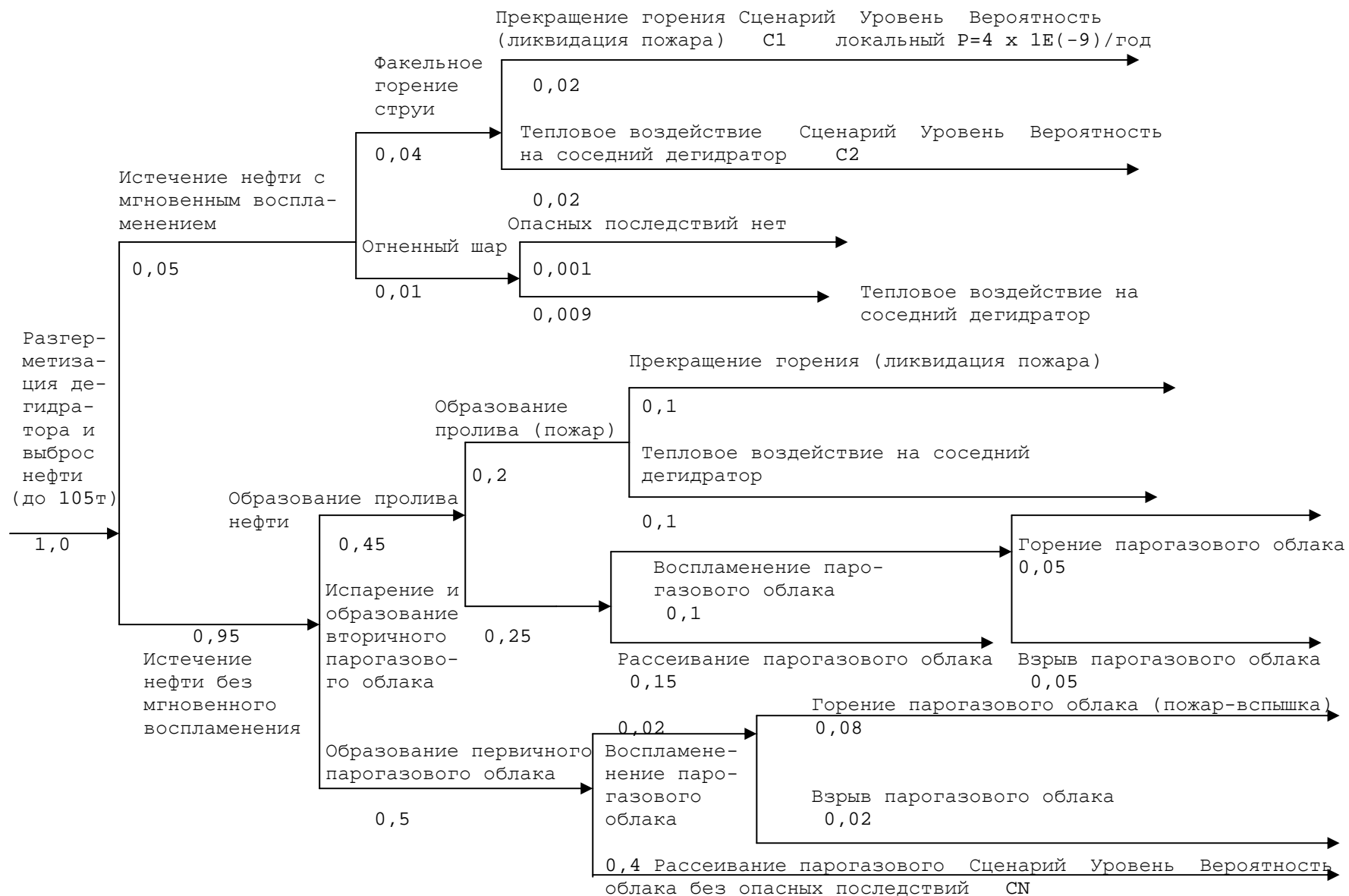


Рис. 2.24. "Дерево событий" при аварийной ситуации на установке первичной переработки нефти (разрушение дегидрататора)

Тогда вероятность развития аварийной ситуации по сценарию С1:

$$P_{C1} = 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ 1/год.}$$

**Пример 2.6.** Деревья отказов, используемых для анализа причин возникновения аварийных ситуаций на газораздаточной станции и при автоматизированной заправке емкости, приведены на рис.2.25 и 2.26. Структура дерева отказа включает одно головное событие (авария, инцидент), которое соединяется с набором соответствующих нижестоящих событий (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих причинные цепи (сценарии аварий).

Для связи между событиями в "узлах" деревьев используются знаки "И" и "ИЛИ". Логический знак "И" означает, что вышестоящее событие возникает при одновременном наступлении нижестоящих событий (соответствует перемножению их вероятностей для оценки вероятности вышестоящего события). Знак "ИЛИ" означает, что вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий.

Так, дерево, представленное на рис.2.26, имеет промежуточные события (прямоугольники), тогда как в нижней части дерева кругами с цифрами показаны постулируемые исходные события - предпосылки, наименования и нумерация которых приведены в табл.2.5.



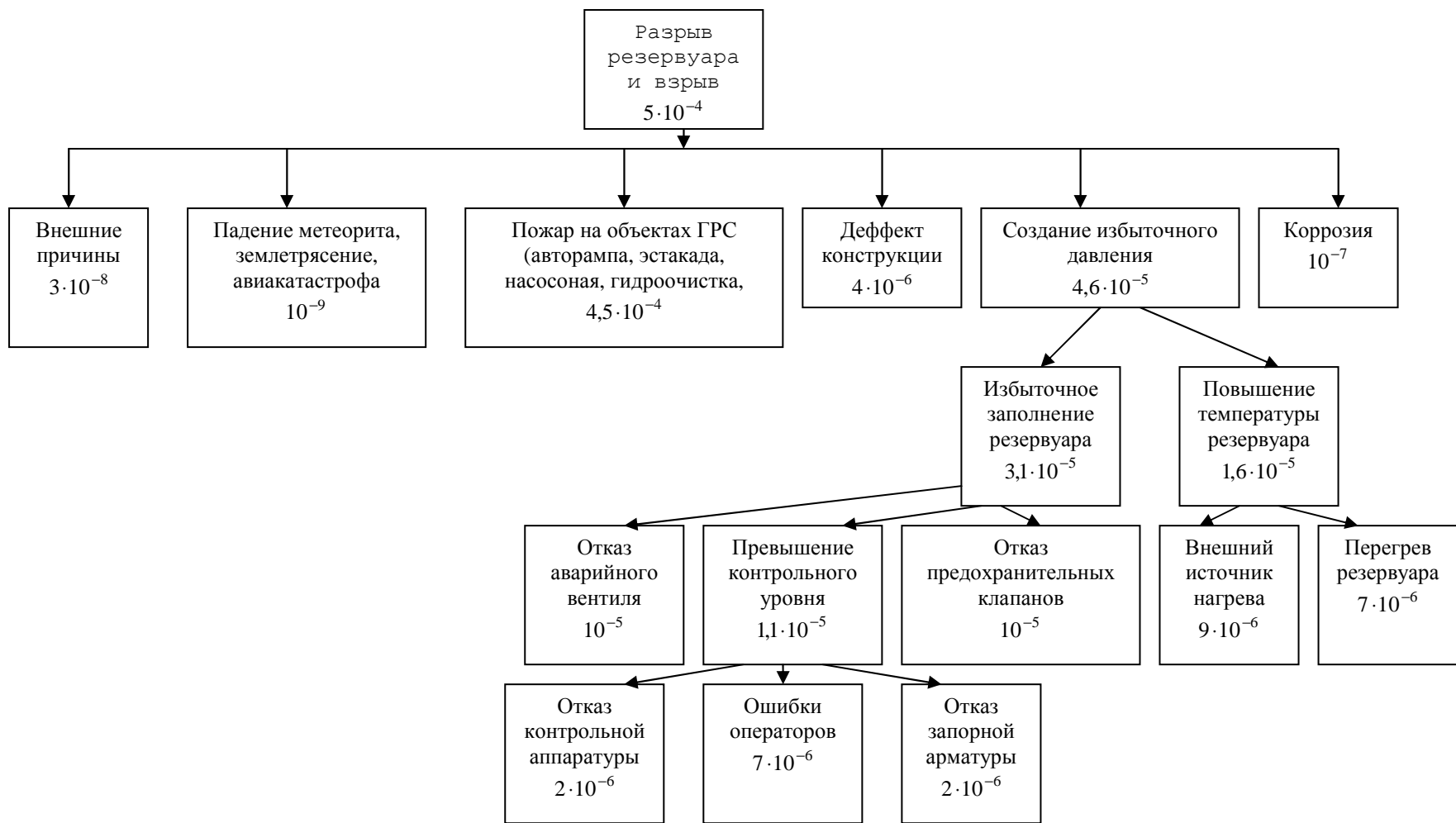


Рис. 2.25. Примечание. Значения величин вероятности проявления причин отказов даны условно.

”Дерево отказов” анализа причин аварийной ситуации и вероятности ее проявления на газораздаточной станции

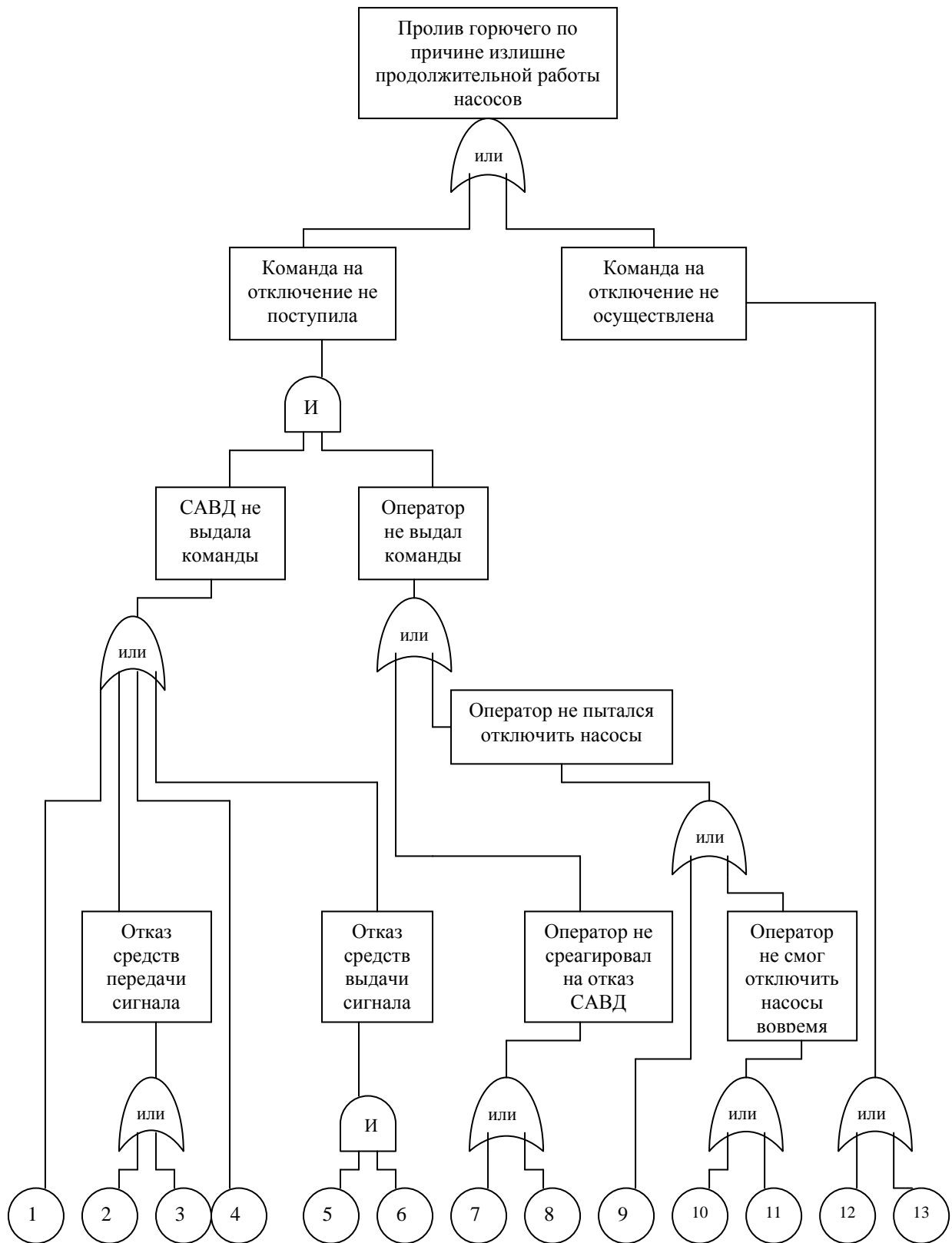


Рис.2.26. "Дерево отказа" заправочной операции.

Анализ дерева отказа позволяет выделить ветви прохождения сигнала к головному событию (в нашем случае на рис. 2.26 их три), а также

указать связанные с ними - минимальные пропускные сочетания, - минимальные отсечные сочетания.

Минимальные пропускные сочетания - это набор исходных событий, предпосылок (отмечены цифрами), обязательное (одновременное) возникновение которых достаточно для появления головного события (аварии). Для "дерева", изображенного на рис.2.26, такими событиями и (или) сочетаниями являются: {12}, {13}, {1•7}, {1•8}, {1•9}, {1•10}, {1•11}, {2•7}, {2•8}, {2•9}, {2•10}, {2•11}, {3•7}, {3•8}, {3•9}, {3•10}, {3•11}, {4•7}, {4•8}, {4•9}, {4•10}, {4•11}, {5•6•7}, {5•6•8}, {5•6•9}, {5•6•10}, {5•6•11}. Используются главным образом для выявления "слабых мест".

Табл.2.5. Исходные события дерева отказа (рис.2.26)

№ п/п	Наименование событий или состояний модели	Вероятность события $P_i$
1	Система автоматической выдачи дозы (САВД) оказалась отключенной (ошибка контроля исходного положения)	0,0005
2	Обрыв цепей передачи сигнала от датчиков объема дозы	0,00001
3	Ослабление сигнала выдачи дозы помехами (нерасчетное внешнее воздействие)	0,0001
4	Отказ усилителя - преобразователя сигнала выдачи дозы	0,0002
5	Отказ расходомера	0,0003
6	Отказ датчика уровня	0,0002
7	Оператор не заметил световой индикации о неисправности САВД (ошибка оператора)	0,005
8	Оператор не услышал звуковой сигнализации об отказе САВД (ошибка оператора)	0,001
9	Оператор не знал о необходимости отключения насоса по истечении заданного времени	0,001
10	Оператор не заметил индикации хронометра об истечении установленного времени заправки	0,004
11	Отказ хронометра	0,00001
12	Отказ автоматического выключателя электропривода насоса	0,00001
13	Обрыв цепей управления приводом насоса	0,00001

Минимальные отсечные сочетания - набор исходных событий - который гарантирует отсутствие головного события при условии не возникновения ни одного из составляющих этот набор событий:  $\{1 \bullet 2 \bullet 3 \bullet 4 \bullet 5 \bullet 12 \bullet 13\}, \{1 \bullet 2 \bullet 3 \bullet 4 \bullet 6 \bullet 12 \bullet 13\}, \{7 \bullet 8 \bullet 9 \bullet 10 \bullet 11 \bullet 12 \bullet 13\}$ .

Используются главным образом для определения наиболее эффективных мер предупреждения аварии.

Вычислим коэффициент неготовности системы при известных значениях вероятностей базовых событий, которые обозначим соответственно через  $P_1, P_2, \dots, P_{13}$ . Вычисления будем производить пошагово.

$$P(P_2 \cup P_3) = 1 - (1 - 0,00001)(1 - 0,00001) = 1,99999 \cdot 10^{-5}$$

$$P(P_5 \cap P_6) = 0,0003 \cdot 0,0002 = 6 \cdot 10^{-8};$$

$$P(P_1 \cup (P_2 \cup P_3) \cup P_4 \cup (P_5 \cap P_6)) = 1 - (1 - 0,0005) \cdot (1 - 1,99999 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - 0,0002) \cdot (1 - 6 \cdot 10^{-8}) = 8,09873 \cdot 10^{-4};$$

$$P(P_7 \cup P_8) = 1,4995 \cdot 10^{-3};$$

$$P(P_{10} \cup P_{11}) = 1 - (1 - 0,004)(1 - 0,00001) = 4,00996 \cdot 10^{-3};$$

$$P(P_9 \cup (P_{10} \cup P_{11})) = 1 - (1 - 0,001)(1 - 4,00996 \cdot 10^{-3}) = 5,00595 \cdot 10^{-3};$$

$$P(P_7 \cup P_8 \cup P_9 \cup (P_{10} \cup P_{11})) = 1 - (1 - 1,4995 \cdot 10^{-4})(1 - 5,00595 \cdot 10^{-3}) = 6,49745 \cdot 10^{-3};$$

$$S = P_1 \cup (P_2 \cup P_3) \cup P_4 \cup (P_5 \cap P_6) \cap P(P_7 \cup P_8 \cup P_9 \cup (P_{10} \cup P_{11}));$$

$$P(S) = 8,09873 \cdot 10^{-4} \cdot 6,49745 \cdot 10^{-3} = 5,26228 \cdot 10^{-6};$$

$$P(P_{12} \cup P_{13}) = 1 - (1 - 0,00001)(1 - 0,00001) = 2 \cdot 10^{-5};$$

Тогда коэффициент неготовности будет равен:

$$Q_s(t) = P(S) \cup P(P_{12} \cup P_{13}) = 1 - (1 - 5,26228 \cdot 10^{-6})(1 - 2 \cdot 10^{-5}) = 2,526 \cdot 10^{-5}.$$

Таким образом, ” дерево отказов” (ДО) предназначено как для качественной оценки аварий (так как с его помощью возможен показ различных сценариев развития аварийной ситуации), так и для определения степени риска. Кроме того, с помощью ДО представляется возможность определять:

- ” слабые узлы” и ”узкие места” с точки зрения безопасности;
- наиболее опасные пути развития аварий.

Метод ДО для определения степени риска основан на построении логико-вероятностной расчетной схемы, графическая интерпретация которой соответствует дереву, в вершине которого лежит нежелательное событие (головное). Вероятность такого события необходимо определять, зная вероятность базовых событий (события нижнего уровня, дальше которого детализация не производится). В качестве головного события обычно выбирается событие, имеющее наибольшую опасность для окружающей среды. Например, при проектировании и строительстве скважин таким событием является открытый фонтан. Между головным и базовыми событиями имеются промежуточные. Взаимосвязь между событиями устанавливается с помощью логических связей – ”И”, ”ИЛИ” и др. Метод ДО предполагает знание вероятностей базовых событий и логических связей между ними. Кроме того, необходимо знания зависимостей базовых событий. В случае зависимости базовых событий рассматривают комбинации первичных базовых событий, приводящих к головному. При независимости базовых событий применяется метод прямого аналитического решения, которое позволяет поэтапно анализировать дерево с помощью формул:

$$P_{\wedge} = \prod_{i=1}^n P_i,$$

$$P_{\vee} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i),$$

где  $n$  – число событий,  $P_i$  – вероятность наступления  $i$ -го события,  $P_{\wedge}, P_{\vee}$  – вероятности наступления событий для логических связей ”И” и ”ИЛИ”.

Деление (декомпозиция) событий при построении ДО происходит сверху вниз (от главного события к базовым событиям). Декомпозиция событий осуществляется исследователем с учетом имеющейся информации по отказам оборудования, ошибкам персонала, а также информации о природных явлениях (землетрясения, удары молнией и т.п.).

В процессе развития декомпозиции вначале рассматриваются достаточно крупные классы событий (первый уровень декомпозиции). Затем каждое из

событий первого уровня декомпозируется на другие события, в результате которых оно произошло (второй уровень). Процесс декомпозиции проводится до такого уровня, информация о вероятности наступлений событий которого или известна в результате обработки статистических данных, либо получена в результате обработки мнений экспертов.

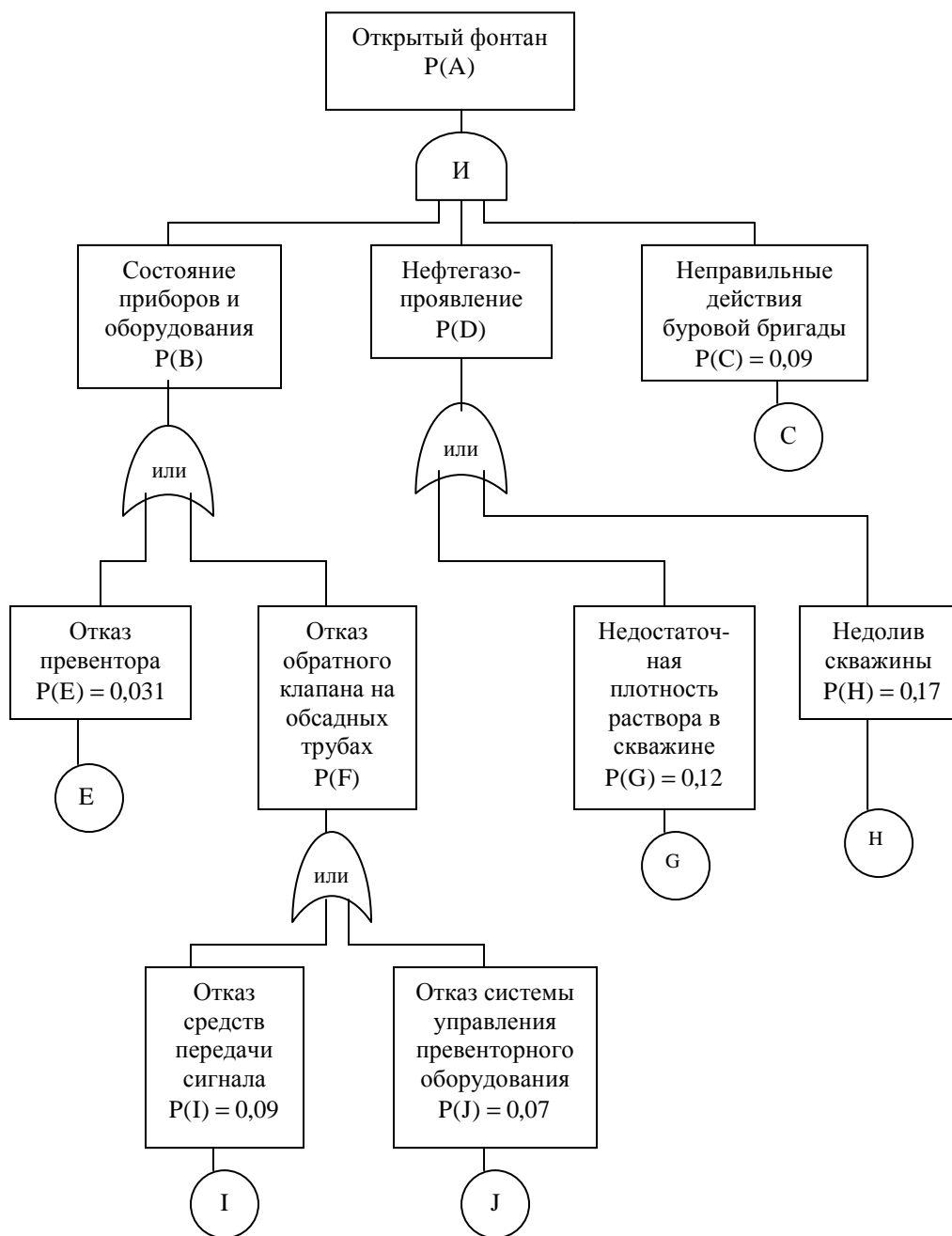


Рис.2.27. "Дерево отказов" при строительстве скважин

Таким образом, множество факторов, рассматриваемых при проведении идентификации безопасностей на этапах проектирования и строительства, образует множество событий (отказов) при построении дерева отказов.

Следовательно, событие в дереве отказов соответствует определенному фактору, влияющему на появление головного события.

Вся совокупность возможных комбинаций событий, приводящих к головному событию, достаточно сложна, поэтому приведем достаточно простую схему построения ДО, учитывая лишь некоторые из основных факторов, влияющих на возникновение открытого фонтана.

Рассмотрим первый уровень декомпозиции событий (рис.2.27). Идентификация опасности позволила установить, что головное событие – открытый фонтан может произойти при совместном появлении трех событий: события, характеризующего состояние оборудования; события, связанного с газонефтеводопроявлением; события, связанного с ошибками буровой бригады (первый уровень декомпозиции).

На втором уровне рассмотрим события, связанные с состоянием оборудования и нефтегазопроявлением. Состояние оборудования зависит от состояния превенторного оборудования, обратного клапана на обсадных трубах, действий буровой бригады. Газопроявления зависят от плотности раствора в скважине, недолива скважин.

При рассмотрении событий второго уровня, характеризующих состояние оборудования, заметим, что все эти события могут быть далее декомпозированы. Например, неисправность (или отказ превентора) может быть связана с негерметичностью плашек или с неисправностью системы управления превенторным оборудованием. Учитывая возможность получения вероятности наступления этих событий, назовем их базовыми, а процесс декомпозиции прекратим. Событие, состоящее в неправильных действиях буровой бригады, может быть принято за базовое. Будем также предполагать, что вероятность событий, связанные с газопроявлениями, а также вероятность отказа превентора известны. Следовательно, эти события отнесем к базовым. Вероятности наступления базовых событий получены в результате обработки статистических данных, обработки мнений экспертов.

Определим вероятность наступления головного события по известным вероятностям базовых событий и взаимосвязям между всеми событиями.

1. Двигаясь снизу вверх к вершине дерева, определим вероятность  $P(F)$  по известным вероятностям базовых событий

$$P(F) = P(I) + P(J) = 0,09 + 0,07 = 0,16.$$

2. Зная вероятность событий  $P(E)$  и  $P(F)$ , определим вероятность события  $B$ :

$$P(B) = P(E) + P(F) = 0,031 + 0,16 = 0,191.$$

3. По известным вероятностям событий  $P(G)$  и  $P(H)$  находим вероятность события  $D$ :

$$P(D) = P(G) + P(H) = 0,12 + 0,17 = 0,29.$$

4. По полученным вероятностям первого уровня, а также известной вероятности события  $C$  с учетом их соединения по схеме "И" вычислим вероятность головного события  $A$ :

$$P(A) = P(B) \cdot P(D) \cdot P(C) = 0,191 \cdot 0,29 \cdot 0,09 = 0,005.$$

Таким образом, показано, что риск наступления головного события – открытого фонтана составил 0,005, что соответствует возможности появления открытого фонтана на каждые 200 строящихся скважин.

Для расчета вероятности наступления головного события различных объектов необходима следующая исходная информация:

- набор факторов и событий, определяющих "аварийноопасность" рассматриваемого объекта;
- набор связей типа "И", "ИЛИ" между различными событиями, определяющих структуру "дерева отказа";
- вероятности «элементарных событий», определяемые из:
  - анализа статистических данных,
  - экспертных оценок,
  - оперативного контроля состояния системы;



- для расчета параметров истечения из трубопровода необходимы данные по характеристикам трубопровода, характеристикам жидкости, которая из него вытекает, и параметры трещины (порыва) в трубопроводе.

## **2.5. Методы оценки риска аварий методами теории надежности**

Оценка степени риска поражения людей и нанесения ущерба при авариях связаны с задачей прогнозирования показателей надежности и остаточного ресурса функционирующей системы. Наиболее важным вопросом является установление допустимых сроков дальнейшей эксплуатации индивидуального объекта при конкретном значении риска аварии.

Основное понятие надежности – отказ. Это – нарушение нормального функционирования рассматриваемого объекта, приводящее к уходу его рабочих характеристик за допустимые пределы. Могут быть отказы вследствие внезапных повреждений (поломок, пробоев и т.п.) и вследствие постепенных изменений, обычно вызываемых износом. Произойдет ли отказ и к каким последствиям он приведет – все это можно определить, лишь оценивая вероятность подобных событий. Поэтому для количественного выражения надежности служат вероятностные характеристики работы рассматриваемых устройств. Случайные события и величины обладают статистической устойчивостью, однородностью, имеют соответствующие законы распределения), т.е. могут повторяться при одинаковых условиях многократно. Как правило, аварии происходят в результате совпадения случайных или случайных и неопределенных событий, поэтому опасность возникновения аварии обычно оценивают вероятностными показателями.

Один из способов построения указанных характеристик состоит в изучении продолжительности  $T$  исправной работы, т.е. времени, протекающего от момента включения рассматриваемого устройства до возникновения первого отказа. Полагая, что в момент включения время  $t = 0$ , будем считать первый

отказ происходящим при  $t = T$ , рассматривая таким образом лишь положительные значения времени. Время  $T$  – случайная величина, подчиненная условию

$$0 < T \leq \infty.$$

Вероятность того, что при каком-либо значении текущего времени  $t$

$$T \geq t$$

называют вероятностью безотказной работы  $P(t)$  в течение времени  $t$  или функцией надежности ( $P(0) = 1, P(\infty) = 0$ ). Вероятность отказа за то же время, является функцией риска аварии (поражения людей и нанесения материального ущерба):

$$Q(t) = 1 - P(t).$$

Для оценки риска применяют некоторые модели теории надежности. Среди них модели высоконадежных систем, для которых аварийные ситуации представляют редкие события, а также модели стареющих систем, качество которых в процессе эксплуатации ухудшается вследствие ползучести, различных видов усталости, износа и других повреждений.

Прогнозирование аварийных ситуаций возможно на основе элементарной статистики и дискретного распределения Пуассона, часто применяемого к редким событиям и природным явлениям.

Общее выражение закона надежности имеет вид:

$$P(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(t) dt \right],$$

где величина  $\lambda(t) = - \frac{1}{P(t)} \cdot \frac{d}{dt} P(t)$  называется интенсивностью отказов,

равная вероятности того, что после безотказной работы до момента времени  $t$  авария произойдет в последующем малом отрезке времени.

Практика показывает, что после небольшого начального периода эксплуатации функция  $\lambda(t)$  длительный период достаточно стабильна, т.е.  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ . Влияние интенсивного старения за счет коррозионного износа, усталости и других факторов должно исключаться

регламентированием допустимого срока службы. В период нормального (спокойного) функционирования закон надежности принимает вид экспоненциального распределения:

$$P(t) = \exp(-\lambda t).$$

При функции надежности в виде  $P(t) = \exp(-\lambda t)$  частота отказов в системе однотипных объектов (поток случайных событий) соответствует дискретному распределению Пуассона:

$$P(m, \lambda \tau) = \frac{(\lambda \tau)^m}{m!} \cdot \exp(-\lambda \tau), \quad m = 0, 1, 2, \dots, \lambda \tau > 0.$$

Аварии на временном интервале  $\tau(t, t + \tau)$  произойдут  $m$  раз с вероятностью  $P(m, \lambda \tau)$ , а отсутствие аварийных ситуаций (отсутствие отказов) – с вероятностью:

$$P(0, \lambda \tau) = \exp(-\lambda \tau).$$

Вероятность того, что аварии произойдут  $n$  раз при  $n < m$  (т.е. менее  $m$  раз), определяется функцией распределения:

$$P_0(n < m) = \sum_{i=0}^{m-1} P(i, \lambda t) = 1 - \Phi(m, \lambda \tau),$$

$$\Phi(m, \lambda \tau) = P_0(n \geq m) = \sum_{i=m}^{\infty} P(i, \lambda \tau).$$

Вероятность возникновения хотя бы одной аварии представляет оценку риска аварии на объекте за период  $\tau$ :

$$Q = 1 - P(0, \lambda \tau) = 1 - \exp(-\lambda \tau).$$

Для оценки вероятности хотя бы одной аварии среди  $N$  объектов за время  $\tau$  указанное выражение примет вид:

$$Q = 1 - \exp(-N\lambda \tau).$$

Параметр потока аварий  $\lambda$  иногда называют "техническим риском" или вероятностью аварии в единицу времени. Во многих случаях он служит самостоятельным оценочным показателем опасности возникновения аварии и вычисляется с помощью выражения:

$$\lambda = \frac{n}{N \cdot \Delta\tau}$$

Угрозу жизни человека при аварии (опасность летального исхода) оценивают "индивидуальным риском":

$$\lambda_{\text{инд}} = \frac{n}{N \cdot \Delta\tau} \cdot \frac{m_{\text{гиб}}}{m_{\text{раб}}},$$

где  $n$  – число объектов, на которых произошла авария за период  $\Delta\tau$ ;  $N$  – число эксплуатируемых объектов за тот же период;  $m_{\text{гиб}}$  – среднее число погибших на одном объекте при аварии;  $m_{\text{раб}}$  – среднее число работающих на одном объекте.

**Пример 2.7.** Расчет аварийности атомных энергоблоков по многолетней статистике аварий. По состоянию на 1986 год (год аварии на Чернобыльской АЭС) в мире произошло 4 аварии (от 5-го до 7-го уровня тяжести по шкале МАГАТЭ): две в России и по одной в США и Англии. Если принять, что на тот момент в мире функционировало 370 ядерных энергоблоков со средней длительностью эксплуатации (условно) 11 лет, то параметр потока аварий составит:

$$\lambda = \frac{n}{N \cdot \Delta\tau} = \frac{4}{370 \cdot 11} = 0,98 \cdot 10^{-3} \approx 10^{-3} \text{ аварий/реакторо-лет,}$$

т.е. частота (повторяемость) аварии энергоблока составляет 1 раз в 1000 лет.

Однако в стране в то время действовало 40 ядерных энергоблоков, поэтому вероятность хотя бы одной аварии на этих блоках за время 1 год составляет:

$$Q(n \geq 1) = 1 - \exp(-N\lambda\tau) = 1 - \exp(-40 \cdot 0,001 \cdot 1) = 0,04,$$

т.е. 1 авария в 25 лет. Эту величину, несмотря на ее недопустимо высокое значение, можно считать заниженной, т.к. не все энергоблоки в использованной статистике были аналогичны Чернобыльским (наиболее опасным по конструкции).

**Пример 2.8.** На объекте за 20 лет произошло 4 аварии, т.е. среднее число аварий равно  $\lambda = 4/20 = 0,2 \text{ лет}^{-1}$ . Тогда за период  $\tau = 2$  года две аварии ( $m=2$ ) могут произойти с вероятностью:

$$P(2,0.2 \cdot 2) = \frac{(0.2 \cdot 2)^2}{2!} \exp(-0.2 \cdot 2) = 0,054,$$

а одна авария – с вероятностью  $P(1,0.4) = 0,227$ . Вероятность безаварийного функционирования объекта в течение двух лет равна  $P(0,0.4) = \exp(-0.4) = 0,67$ , а в течение одного года  $P(0,0.2) = \exp(-0.2) = 0,82$ , т.е. риск аварийных ситуаций за двухлетний период составит  $1 - 0,67 = 0,33$ , а за один год 0,18.

Табл.2.6. Надежность компонентов оборудования

№ п/п	Компоненты оборудования	Интенсивность потока отказов $\lambda, 10^{-3}$ лет (В.Маршал)	Интенсивность потока отказов $\lambda \cdot 10^6, \text{ч}^{-1}$ ГОСТ 12.1.004 -91	Вероятность отказа в течение года $(1 - e^{-\lambda \cdot \tau})$
	1	2	3	4
1	Арматура трубопроводов (петлевые компенсаторы, тройники и вводы)	350		0,295
2	Вентили	260		0,229
3	Вращающиеся части насосов или смесителей	60		0,058
4	Расширительные камеры	40		0,039
5	Переходные шланги под давлением, втулки Шланги гибкие	35	3,93 0,067	0,034 $5,867 \cdot 10^{-4}$
6	Емкости под давлением	17		0,017
7	Прокладки	4		$3,992 \cdot 10^{-3}$
8	Силовые линии	2		$1,998 \cdot 10^{-3}$
9	Трубопроводы		1,1	$9,59 \cdot 10^{-3}$
10	Манометры		1,3	0,011
11	Прокладки пластмассовые резиновые пробковые		0,05 0,04 0,02	$4,379 \cdot 10^{-4}$ $3,503 \cdot 10^{-4}$ $1,752 \cdot 10^{-4}$
12	Сильфоны		2,287	0,02
13	Соединения гидравлические		0,03	$2,628 \cdot 10^{-4}$
14	Соединения пневматические		0,04	$3,503 \cdot 10^{-4}$

Продолжение таблицы 2.6.

№ п/п	Компоненты оборудования	Интенсивность потока отказов $\lambda \cdot 10^{-3}$ лет (В.Маршал)	Интенсивность потока отказов $\lambda \cdot 10^6, \text{ч}^{-1}$ ГОСТ 12.1.004 -91	Вероятность отказа в течение года $1 - e^{-\lambda \cdot \tau}$
	1	2	3	4
15	Задвижки клапанов		5,1	0,044
16	Клапаны рычажные шариковые		4,6 4,6	0,0395 0,0395
17	Клапаны дренажные		0,224	$1,96 \cdot 10^{-3}$
18	Насосы с машинным приводом		8,74	0,074
19	Моторы гидравлические		4,3	0,037
20	Резервуары гидравлические		0,15	$1,313 \cdot 10^{-3}$
21	Регуляторы давления		4,25	0,037
22	Предохранительные мембраны		0,0112	$9,811 \cdot 10^{-5}$
23	Индикаторы взрывов автоматических систем подавления взрывов		0,25	$2,188 \cdot 10^{-3}$
24	Блоки управления автоматических систем подавления взрывов (на каждый канал)		0,12	$1,051 \cdot 10^{-3}$
25	Пламеотсекатели ПО (АСПВ)		0,39	$3,411 \cdot 10^{-3}$
26	Гидропушки ГП (АСПВ)		0,27	$2,362 \cdot 10^{-3}$
27	Оросители АС (АСПВ)		0,32	$2,799 \cdot 10^{-3}$
28	Кабели		0,047	$4,116 \cdot 10^{-4}$

Для математического ожидания  $M$ , дисперсии  $D$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma$  имеет место равенство  $M = D = \sigma^2 = \lambda \tau$ , т.е. имеется возможность экспериментальной проверки правдоподобия гипотезы применимости закона Пуассона к конкретному виду аварии по факту хотя бы приблизительного соблюдения равенства  $M = D$ . Таким образом, прогнозирование аварийных ситуаций возможно на основе статистики.

Такого рода данные представляют интерес при принятии решений о мерах по снижению степени риска аварий на объектах.

Табл. 2.7. Обобщенные статистические данные по оценке частот отказов оборудования

Тип отказа оборудования	Вероятность отказа	
	Масштабы выброса опасных веществ	
<b>Разгерметизация оборудования с полным разрушением</b>		
1. Разгерметизация резервуаров хранения (включая разрыв сварных швов и фланцев трубопроводов обвязки): полное разрушение частичное разрушение	$10^{-5}$ в год $10^{-4}$ в год	Полное содержимое резервуара Объем, вытекший через отверстие диаметром 25 мм за время перекрытия потока
2. Разгерметизация технологических трубопроводов протяженностью более 30 м	$5 \cdot 10^{-3}$ на 1 км трубопровода в год	Объем выброса, равный объему трубопровода, ограниченного арматурой, с учетом поступления из соседних блоков за время перекрытия потока
3. Разгерметизация магистральных трубопроводов	$(1-3) \cdot 10^{-4}$ на 1 км трубопровода в год	Объем выброса, равный объему трубопровода, ограниченного арматурой, с учетом профиля трассы и поступления вещества из соседних участков за время остановки и перекрытия потока
4. Отказ машинного оборудования (насосы компрессоры)	$5 \cdot 10^{-3}$ в год	Объем, вытекший через торцевые уплотнения или разрушенный узел за время перекрытия потока
5. Разрыв соединительных рукавов при сливе (наливе) железнодорожных или автомобильных цистерн	$10^{-3}$ на одну заправку, $10^{-2}$ на 1 шланг (рукав) в год	Объем, вытекший через сливное отверстие за время перекрытия потока
<b>Аварийные взрывы</b>		
6. Газо-паро-воздушные смеси: углеводородные газы	$2,1 \cdot 10^{-2}$ в год	
пары ЛВЖ	$7,6 \cdot 10^{-3}$ в год	
водород	$9,0 \cdot 10^{-3}$ в год	
7. Пыль органических продуктов	$2,7 \cdot 10^{-3}$ в год	
8. Конденсированные нестабильные ВВ	$6,0 \cdot 10^{-3}$ в год	
9. Взрывы в атмосфере	$2,2 \cdot 10^{-2}$ в год	
10. Аварийные взрывы, вызвавшие серьезные разрушения зданий, сооружений и промышленного оборудования	$2,4 \cdot 10^{-2}$ в год	
11. Взрывы в технологической аппаратуре	$2,8 \cdot 10^{-2}$ в год	
<b>Выбросы токсических веществ</b>		
12. Выбросы:		
хлора	$5,7 \cdot 10^{-3}$ в год	
аммиака	$3,7 \cdot 10^{-3}$ в год	
оксидов углерода и азота	$6,7 \cdot 10^{-4}$ в год	

Используемые статистические данные должны соответствовать типу анализируемого производства, оборудования объекта. Обобщенные среднестатистические данные частот отказов (разгерметизации) технологического оборудования и соответствующие им приближенные объемы выброса опасных веществ даны в табл.2.6, 2.7.

Значения вероятности аварий  $P(m, \lambda\tau) = \frac{(\lambda\tau)^m}{m!} \exp(-\lambda\tau)$  и риска возможной аварии приведены на рис.2.28.

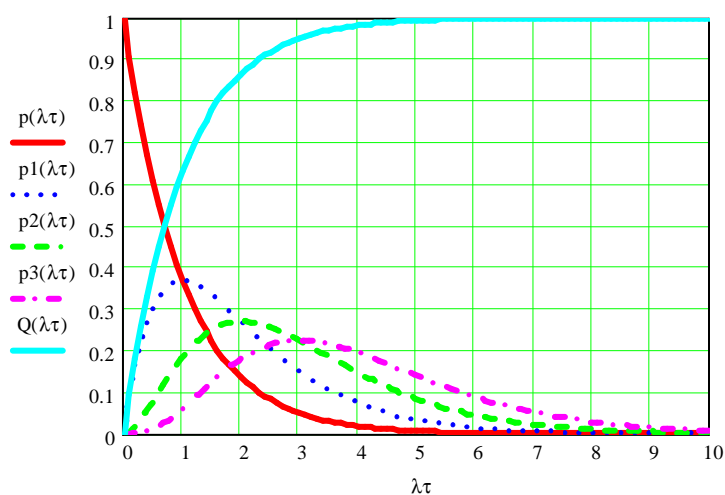


Рис.2.28. Вероятность аварий  $P(m, \lambda\tau)$  для  $m = 0,1,2,3$  и оценка риска  $Q$  аварийности в зависимости от параметра  $\lambda\tau$ .

Формулу Пуассона называют законом редких явлений. Если же преобладают отказы, вызываемые износом, то следует пользоваться нормальным распределением, часто называемым законом Гаусса. Это относится к тем случаям, в которых появление того или иного значения случайной величины зависит от большого числа случайных событий, каждое из которых оказывает на эту величину малое влияние, причем ни одно влияние не превалирует. На рис. 2.29 показано распределение Пуассона для нескольких значений  $\lambda\tau$ , из которого видно, что при больших значениях  $\lambda\tau$  ( $\lambda\tau \geq 10$ ) распределение приближается к нормальному распределению. Плотность вероятности нормального распределения равна:



$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}\right],$$

где  $\sigma$  – дисперсия,  $T$  – среднее время отказа.

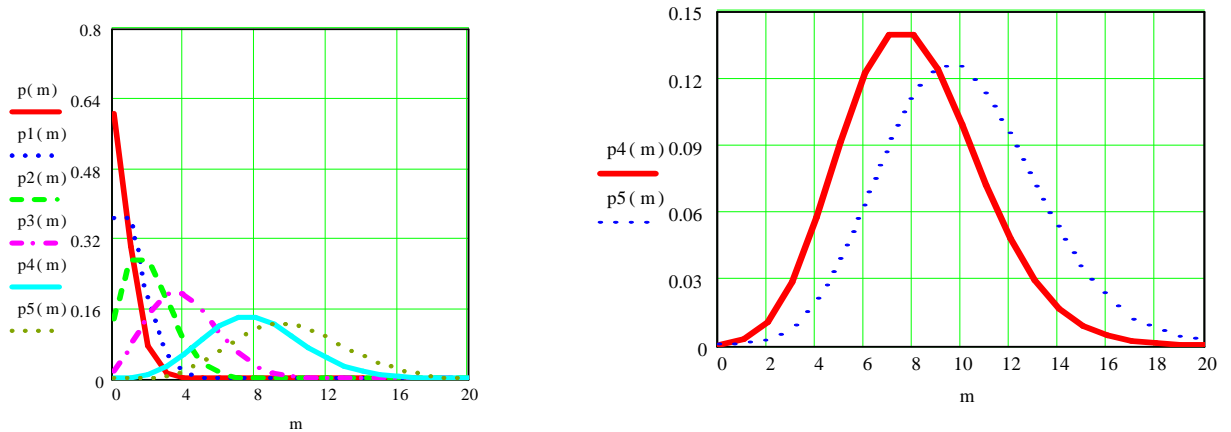


Рис.2.29. Распределение Пуассона для  $\lambda\tau = 0.5,1,2,4,8,10$ .

Вероятность безотказной работы при нормальном распределении ( $T \gg \sigma$ ) определяется по формуле:

$$P(t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{t-T}{\sigma}\right),$$

где  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – интеграл вероятности.

Вероятность отказа при нормальном распределении равна:

$$Q(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{t-T}{\sigma}\right).$$

Закон Пуассона широко используют на практике, применительно к различным областям техники и природным процессам, а также событиям (авариям), разбросанным на площадях. В этом случае параметр  $\lambda$  имеет смысл средней плотности, отнесенной не к временному интервалу, а к некоторой площади.

**Пример 2.9.** Хорошее согласие с распределением Пуассона дает пример реальной статистики падений самолетов-снарядов в южной части Лондона в период второй мировой войны /27/. Такое согласие установлено при подсчете

числа  $K$  попаданий, приходящихся на каждый из  $N=576$  одинаковых участков территории, каждый площадью  $S=0,25 \text{ км}^2$ . При общем числе снарядов  $T=537$  число участков  $N_k$ , на которое приходилось по  $K$  падений (среднее число  $\lambda S = T/N = 537/576 = 0,9323$ ), дано в табл. В сравнении со значениями вероятностей  $P(m,0,9323)$ , подсчитанных по формуле Пуассона.

Сравнение статистики падения самолетов-снарядов с соответствующим распределением Пуассона

Число падений $K$	0	1	2	3	4	5	$\geq 5$
Число участков $N_k$	299	211	93	35	7	-	1
$P(m,0,9323)$	0,3936	0,3670	0,1711	0,0532	0,0124	0,0023	-
$576 \cdot Q(m,0,9323)$	226,74	211,39	98,54	30,62	7,14	1,33	-

Оценку надежности производственных установок и различной аппаратуры, а также обслуживания персоналом можно провести с использованием биномиального распределения подсчетом вероятности как частоты  $r$  успешных событий (например, пусков и т.п.) при их общем числе  $n$ . Доверительный интервал для фактической вероятности  $P_T$  определяется уравнением:

$$\sum_{m=r}^n \binom{n}{m} \cdot P^m \cdot (1-P)^{n-m} = 1 - \alpha,$$

где  $\binom{n}{m} = \frac{n!}{m!(n-m)!}$  – биномиальные коэффициенты;  $P$  – нижняя граница

искомой надежности  $P_T$ ;  $\alpha$  – достоверность того, что фактическая вероятность  $P_T$  находится в интервале от 0 до 1.

**Пример 2.10.** Рассмотрим подход с привлечением модели, учитывающей некоторые физические процессы, полагая, что авария на взрывоопасном объекте возникает в результате накопления элементарных повреждений при достижении некоторого предельно-допустимого износа  $M$ .

Процесс накопления повреждений фиксируется функцией износа  $\eta(t)$ . Отказ наступает при условии  $\eta(t) \geq M$ , и числе элементарных повреждений  $r = M/y$ .

Для объектов с высокой однородностью начального качества (обеспечивается жестким контролем качества материалов и технологии производства, что обычно реализуется при изготовлении труб, сосудов, резервуаров и газгольдеров) расчет вероятности отказа (аварии) возможен с использованием модели монотонно стареющих систем, т.е. с накапливающимися повреждениями, на основе гамма-распределения времени  $T$  функционирования. Для целых значений  $r$  гамма-функция  $\Gamma(r) = (r-1)!$ ,  $\lambda$  – средняя скорость износа и функция распределения гамма-распределения имеет вид:

$$Q(\lambda t) = 1 - \sum_{k=0}^{r-1} \frac{(\lambda T)^k}{k!} \exp(-\lambda T) = 1 - \exp(-\lambda T) [1 + \lambda T + (\lambda T)^2 / 2! + \dots + (\lambda T)^{r-1} / (r-1)!]$$

При  $r = 1$  последнее выражение соответствует плотности экспоненциального распределения (мгновенный выход из строя при однократном повреждении).

**Пример 2.11.** Средняя скорость износа агрегата с взрывоопасным энергоносителем  $\lambda = 0,02 \text{ час}^{-1}$ . Предельное число элементарных повреждений  $r = 6$ . Агрегат функционирует 3 часа в сутки. Определим риск аварий в течении недели.

За указанный срок время работы агрегата  $T = 7 \cdot 3 = 21 \text{ час}$ ,  $\lambda T = 0,42$ .

Величина риска равна:

$$Q(0,42) = 1 - \exp(-0,42) (1 + 0,42 + 0,42^2 / 2 + 0,42^3 / 6 + 0,42^4 / 24 + 0,42^5 / 120) = 5,33 \cdot 10^{-6}$$

Подводя итоги, выделим. Вероятность безотказной работы системы равна:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^k P_i(t),$$

где  $k$  – число элементов системы;  $P_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента.

Вероятность отказа такой системы:

$$Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^k P_i(t), \text{ или } Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^k [1 - Q_i(t)],$$

где  $Q_i(t)$  – вероятность отказа  $i$ -го элемента.

В нормальный период работы, когда имеет место экспоненциальный закон надежности, имеем:

$$P_c(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^k \lambda_i t\right).$$

Величину  $\lambda_c = \sum_{i=1}^k \lambda_i$  называют интенсивностью отказов системы, состоящей из  $k$  элементов. Среднее время  $T$  такой системы

$$T_c = \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{T_i}\right)^{-1},$$

где  $T_i$  – среднее время работы  $T$   $i$ -го элемента.

Под аварийной ситуацией ( $S_j$ ) понимается сочетание условий или обстоятельств, появление которых может привести к возникновению фактора (факторов) риска ( $F_i$ ) – причины, движущей силы, способной привести к негативному воздействию на различных реципиентов. Каждая ситуация может привести как к одному фактору риска, так и к нескольким сразу, которые, в свою очередь, могут приводить к возникновению одного или нескольких видов риска ( $R^k$ ), в зависимости от характера наносимого ущерба.

Если  $P_j$  – вероятность возникновения  $j$ -й ситуации ( $S_j$ ),  $F_{ij}$  – вероятность возникновения  $i$ -го фактора риска в  $j$ -й ситуации,  $E_{ij}^k$  – вероятность  $k$ -го вида риска от  $i$ -го фактора риска в  $j$ -й ситуации, то вероятность того, что возникновение  $i$ -го фактора риска в  $j$ -й ситуации приведет к  $k$ -му виду риска определяется по соотношению:

$$R_{ij}^k = P_j \cdot F_{ij} \cdot E_{ij}^k$$

Вероятность  $E_{ij}^k$  оценивается исходя из зависимости «доза-эффект», либо на основе опытных данных с использованием таких констант, как  $ЛД_{50}$  (средняя смертельная кожно-резорбтивная токсодоза) и  $ЛК_{50}$  и т.п. Если из-за недостаточного количества данных построить такую зависимость не удастся, то можно использовать только вероятность возникновения аварии, умноженную на коэффициент, который отражает степень загрязнения окружающей среды, выраженный через индекс загрязнения атмосферы  $Y$ , рассчитанный по соотношению:

$$Y = \sum_{i=1}^L Y_i = \sum_{i=1}^L \left( \frac{C_i}{ПДК_i} \right)^{d_i},$$

где  $Y_i$  - единичный индекс загрязнения;  $C_i$  - концентрация вещества  $i$ ;  $ПДК_i$  - предельно допустимая концентрация вещества  $i$ ;  $d_i$  - безразмерная константа приведения степени вредности вещества диоксида серы.

В зависимости от класса опасности 1,2,3 или 4 значения  $d_i$  принимаются соответственно, равными 1.7, 1.3, 1.0 и 0.9;  $L$  - число вредных веществ, учитываемых в комплексном индексе загрязнения.

Вероятность возникновения  $k$ -го вида риска в  $j$ -й ситуации от всех факторов риска определяется по соотношению:

$$R_j^k = P_j \sum_{i=1}^N F_{ij} \cdot E_{ij}^k, \quad j=1, M, k=1, K,$$

где  $N$  - количество факторов риска;  $K$  - количество видов риска (экологический, социальный и экономический).

Вероятность того, что риск  $k$ -го вида обязательно возникнет при реализации хотя бы одной ситуации, определяется по соотношению:

$$R^k = 1 - \prod_{j=1}^M \left( 1 - P_j \sum_{i=1}^N F_{ij} \cdot E_{ij}^k \right) = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - R_j^k), \quad k=1, K.$$

Последнее соотношение характеризует вероятностную составляющую риска. Для экологического и экономического риска можно рассчитать и стоимостную составляющую риска - ущерб от  $j$ -й ситуации, выраженный в

денежном эквиваленте и объединенный с вероятностью возникновения этой ситуации.

Если  $C_j^k$  – величина ущерба  $k$ -го вида при возникновении  $j$ -й ситуации, то выражение для риска  $k$ -го вида в стоимостном выражении для данной ситуации запишется в виде:

$$U_j^k = R_j^k \cdot C_j^k, \quad j = 1, M, \quad k = 1, K.$$

Тогда интегральный показатель риска (суммарный риск  $k$ -го вида в стоимостном выражении) будет равен:

$$U^k = \sum_{j=1}^M U_j^k, \quad k = 1, K.$$

Общий риск всех видов в стоимостном выражении составит:

$$U = \sum_{k=1}^K U^k.$$

Для определения вероятностей возникновения аварийных ситуаций используются прежде всего соответствующие отраслевые банки статистических данных по характерным отказам и авариям. При отсутствии статистически значимой информации определение вероятности проводят с использованием причинно-следственных закономерностей (логик) возникновения аварийных ситуаций и развития аварий из совокупности промежуточных событий, т.е. на базе разработки соответствующих сценариев. Поскольку число таких сценариев может быть весьма значительным, а их реализации – взаимозависимыми, для интегрального определения вероятности аварии на сложных объектах необходимо использовать специальные методики построения «деревьев событий» или «деревьев отказов» /26/.

**Пример 2.12.** Житель деревни, насчитывающей 300 человек, живет в горной местности. За 50 лет 10 человек погибло от горных обвалов и 200 пострадало. Житель 40 часов в неделю работает в близлежащем городе и 4 недели в году выезжает на отдых, 2 недели проводит в командировке.

Индивидуальный риск погибнуть для жителя будет равен:

$$\frac{10 \cdot 46 \cdot 128}{50 \cdot 300 \cdot 52 \cdot 168} = 0,00045 = 4,5 \cdot 10^{-4},$$

где 46=52-4-2 (нед.) количество недель, проводимых жителем в деревне; 168 – число часов в неделю; 128=168-40 – число часов в неделю, когда житель подвержен опасности.

Индивидуальный риск стать жертвой несчастного случая любой степени тяжести будет равен:

$$\frac{(10 + 200) \cdot 46 \cdot 128}{50 \cdot 300 \cdot 52 \cdot 168} = 0,0095 = 9,5 \cdot 10^{-3}.$$

В вычислениях индивидуальный риск для каждого жителя одинаков с разными факторами занятости (риск поражающего действия события в определенной точке пространства равен  $10/50/300=6,7 \cdot 10^{-4}$ ). Вероятность нахождения человека в этой же точке пространства будет равна:

$$\frac{46}{52} \cdot \frac{128}{168} = 0,67.$$

Территориальный риск в k-й точке пространства для инициирующего события на выделенном источнике опасности равняется:

$$R_{t_{ijmf}}^k = P_{Bij} \cdot P_{um} \cdot P_{af} \cdot P_{ck},$$

где  $P_{Bij}$  - вероятность возникновения аварии на i-том источнике при реализации j-го инициирующего события;  $P_{um}$  – условная вероятность одного из возможных последствий аварии;  $P_{af}$  – условная вероятность реализации одного из возможных видов аварии (пожара, взрыва, рассеивания вредных примесей и др.);  $P_{ck}$  – условная вероятность смертельного результата в k-той точке пространства.

Если известна вероятность появления человека в k-той точке пространства  $P_n^k$ , то определяется индивидуальный риск гибели в этой точке человека, проживающего в рассмотренном регионе

$$R_i^k = R_t^k \cdot P_n^k,$$

где  $R_t^k$  – суммарный территориальный риск в  $k$ -той точке пространства.

Подытоживая индивидуальные риски по всей территории рассмотренного региона, определяется индивидуальный риск проживания в нем, обусловленный возможными авариями на объекте повышенной опасности.

Значение индивидуального риска  $R$  (1/год) определяется с помощью соотношения:

$$R = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot Q(A_i),$$

где  $n$  – число сценариев развития аварии;  $Q(A_i)$  – частота реализации в течение года  $i$ -го сценария, 1/год;  $Q_i$  – вероятность поражения человека на определенном расстоянии в результате реализации  $i$ -го сценария.

Вероятность поражения человека  $Q_{ij}$  на определенном расстоянии (в  $j$  – й зоне) в результате реализации  $i$  – го сценария определяется следующим образом:

$$Q_{ij} = 1 - \prod_{k=1}^h (1 - Q_k \cdot Q_{ijk}),$$

где  $h$  – число рассматриваемых поражающих факторов аварии;  $Q_k$  – вероятность реализации  $k$ -го поражающего фактора;  $Q_{ijk}$  – условная вероятность поражения  $k$  –ым поражающим фактором.

Величина индивидуального риска характеризует распределение риска в пространстве, но в некоторых случаях требуется оценить не только частоту появления опасных факторов, но и масштабы вероятных последствий. Для этого используется понятие социального риска. Например, одинаковые объекты на территории и за чертой города будут иметь одинаковое распределение индивидуального риска, но различные значения социального риска.

Социальный риск – вероятность (частота) возникновения событий, состоящих в поражении определенного числа людей и характеризует масштабы поражения.



Например, социальный риск для аварии с пожарами и взрывами на наружной технологической установке  $S$  (1/год) определяется по формуле:

$$S = \sum_{i=1}^n Q(A_i),$$

где  $n$  – число сценариев, для которых выполняется условие  $N_i \geq N_0$ ;  $N_i$  – количество летальных исходов в результате реализации  $i$  – го сценария (события);  $N_0$  – число летальных исходов, для которого оценивают величину социального риска.

Количество летальных исходов в результате реализации  $i$ -го сценария можно оценить по следующей формуле:

$$N_i = \sum_{j=1}^m Q_{ij} \cdot n_j,$$

где  $m$  – число рассматриваемых зон поражения;  $n_j$  – среднее число людей, находящихся в  $j$  – ой зоне.

Если статистические данные, необходимые для расчета частот тех или иных событий, отсутствуют, величины этих частот для различных сценариев аварии можно оценить по формуле:

$$Q(A_i) = Q_{AB} \cdot Q(A_i)_{ст},$$

где  $Q_{AB}$  – вероятность возникновения аварии;  $Q(A_i)_{ст}$  – статистическая вероятность развития аварии по  $i$ -й ветви дерева событий.

Для расчета величины индивидуального риска необходимо: определить вероятности возникновения инициирующих событий для возможных основных сценариев аварии; построить логические деревья событий при возникновении основных инициирующих аварийных ситуаций; определить статистические вероятности перехода аварии на различные ветви деревьев событий; определить условные вероятности поражения при реализации различных ветвей дерева событий.

Вероятности разгерметизации оборудования и вероятности перехода аварии на различные ветви дерева события можно определить по

статистическим данным или в результате экспертной оценки, условные вероятности поражения человека - по значениям пробит-функции.

В заключении отметим, что общепринятых значений уровня риска в мире пока нет. Разброс пороговых значений степени риска (изолиниями на карте выделяют зоны с разной степенью опасности и измеряют ее в заданной точке вероятностью поражения) объясняется различным отношением к риску (добровольного или принудительного), уровнем развития промышленной безопасности в стране, а также различиями в методологии анализа риска /44/.

В ряде стран пороговые (предельные) значения степени риска определены и законодательно установлены. Допустимый риск регламентируется специальным государственным или региональным органом, который занимается социальным планированием и, в частности, оптимизацией суммарных рисков в государстве и регионе. Так, в Голландии принято считать в качестве максимального приемлемого риска вероятность гибели человека в течении года  $10^{-6}$ , а пренебрежительно малым риском – аналогичную вероятность, равную  $10^{-8}$ . Под максимальным приемлемым риском понимается такое значение, которое нельзя превышать ни при каких обстоятельствах. И если СР превышает значения приемлемого максимального риска, то следует принимать немедленные меры по снижению СР. Под пренебрежимо малым риском понимается такой риск, которым можно пренебречь из-за его малости. Между этими двумя пороговыми значениями лежит область значений риска, которые следует понижать, отыскивая компромисс между социальной выгодой и финансовыми убытками. В Великобритании в качестве максимально приемлемого риска используется величина  $6 \cdot 10^{-6}$ .

Исходя из анализа зарубежного опыта и состояния системы безопасности предлагаются следующие уровни риска /32/:

более  $10^{-4}$  - зона недопустимого риска,

менее  $10^{-4}$  и более  $10^{-5}$  - зона жесткого контроля риска,

менее  $10^{-5}$  - зона приемлемого риска.

Национальным научно-исследовательским институтом охраны труда, на основе статистических данных уровня технической безопасности на предприятиях государства с рыночной экономикой, предложены следующие уровни риска для определения безопасности производства /34/:

незначительный риск –  $\leq 10^{-6}$ ;

допустимый риск –  $1,01 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-5}$ ;

терпимый риск –  $5,01 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$ ;

недопустимый риск –  $\geq 5,01 \cdot 10^{-4}$ .

Пороговый критерий для индивидуального риска выявлен зарубежными психологами, установившими, что большинство людей субъективно ощущают себя в полной безопасности, если вероятность гибели составляет  $10^{-6}$ , т.е. один шанс из миллиона. Значительная часть людей ощущает беспокойство или тревогу при вероятности их гибели  $10^{-5}$ .

Таким образом, величина индивидуального риска служит психологическим индикатором для человека и может являться уровнем приемлемого риска. Вышеизложенное относится к так называемому "вынужденному" индивидуальному риску, т.к. к условиям, когда человек лишен возможности лично воздействовать на ситуацию (изолирован от принятия решения, управления и т.д.). При "добровольном" индивидуальном риске психологический порог значительно выше, чем при "вынужденном". Например, водитель за рулем автомобиля, несмотря на риск гибели  $2,7 \cdot 10^{-4}$ , чувствует себя уверенней, чем когда летит в качестве авиапассажира с риском  $9 \cdot 10^{-6}$ .

Для выявления приемлемого риска некоторыми экспертами предлагается выделить несколько уровней риска: мировой, национальный и региональный, а при проектировании потенциально опасного объекта уровень риска сравнивать с минимальным из них.

## Часть 3. Количественные методы оценки последствий аварий

### 3.1. Классификация количественных методов оценки последствий чрезвычайных ситуаций

Методы математического моделирования и прогнозирования являются теоретической основой описания физико-химических явлений и процессов, протекающих в сложных технических системах каковыми являются крупные промышленные источники опасности. Классификация количественных методов оценки последствий ЧС техногенного характера представлена на рис.3.1.

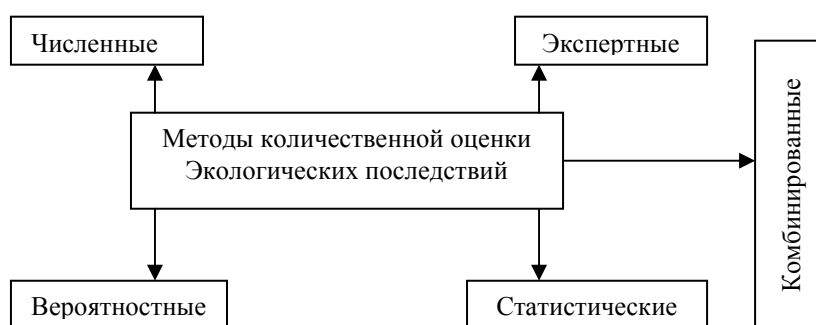


Рис.3.1. Методы количественной оценки последствий чрезвычайных техногенных ситуаций

Для количественной оценки последствий ЧС техногенного характера используются численные методы двух видов. Первая группа методов основана на моделировании физико-химических явлений и процессов, приводящих к аварийным ситуациям. Эти методы предназначены для оценки параметров процессов, которые используются в методиках оценки последствий аварий на различных объектах или с различным характером последствий. Некоторые из этих методов используются для прогнозирования концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе или водных объектах, определения токсодоз загрязняющих веществ.

Модели оценки параметров процессов в результате возникновения и развития аварийных ситуаций, требующие решения численными методами, будут рассмотрены ниже.

Другая группа методов используется для прогнозирования уровней загрязнения сред: воздушной, водной, растительной, почвы и т.п. и получения долгосрочных прогнозов, а также прогноза отдаленных последствий загрязнения и накопления негативных воздействий отдельными компонентами экосистемы.

Статистические методы используются для анализа и обработки информации по результатам многолетних наблюдений за состоянием технологического оборудования, систем управления, сбора информации по отказам на опасных промышленных объектах, определения потерь в результате аварий, а также для оперативного прогнозирования экологических последствий загрязнения сред в результате аварийных и залповых выбросов. Эти модели строятся на основе прошлых данных и не обязательно требуют знания действительных физических процессов. Главным ограничением статистических моделей является то, что условия их использования не могут отличаться от условий, в которых они были построены. Исходя из этого, статистические модели целесообразно больше применять для оперативного прогноза и управления, чем для целей долгосрочного прогнозирования. Использование статистических моделей для прогнозирования последствий аварийных ситуаций требует обработки большого объема информации, содержащей данные по значениям превышения концентраций загрязняющих веществ в результате залповых выбросов со значительными валовыми объемами превышающими на порядки эти значения при нормальном функционировании промышленных объектов.

Вероятностные методы используются для вероятностной оценки отказов технологического оборудования, вероятностей возникновения аварийных ситуаций по известным частотам отказов, вероятностной оценки риска в результате возникновения аварийных ситуаций на опасных промышленных

объектах, определения вероятностных параметров для процесса отказ-ремонт и вероятностных параметров полного цикла функционирования технической системы (вероятностные характеристики – показатель надежности-ненадежности, плотность отказов, частота отказов, коэффициент простоев и т.д.). Вероятностные методы применяются также при определении социального риска при авариях на потенциально опасных объектах. Удобной формой оценки опасности поражения людей является зонирование территории города по степени риска. Наиболее приемлемым критерием оценки степени риска поражения людей является вероятность поражения в заданной точке города, определяемая с учетом изменчивости параметров приземного слоя воздуха и количеством выброшенного СДЯВ в процессе аварии. С этой целью на карте города изолиниями выделяют зоны с разной степенью опасности поражения. Такая карта позволяет судить о степени риска поражения людей в каждой точке города.

В ряде стран западной Европы зонирование учитывается, как при организации защиты населения, так и при проведении градостроительных мероприятий по снижению степени риска. Так, в Голландии законодательно установлены уровни индивидуального риска (вероятности поражения): пренебрежимо малый ( $10^{-8}$ ) и максимально приемлемый ( $10^{-6}$ ). Пренебрежимо малым риском считается такой уровень, ниже которого нет необходимости проведения каких-либо мероприятий по снижению опасности поражения. Максимально приемлемый риск – уровень, который нельзя превосходить, каковы бы ни были расходы. Область значений, лежащих между этими двумя уровнями, допускает уменьшение риска на основе компромисса между социальной выгодой и финансовыми возможностями.

Для определения математического ожидания потерь среди населения вся территория города или только прилегающая к объекту территория, ограниченная расстоянием от объекта, в пределах которого возможно поражение людей при аварии на данном объекте, разбивается на ряд

участков. В центре каждого участка по методике /29,35/ определяется вероятность поражения людей.

Экспертные методы применяют при отсутствии достаточного объема статистической информации по отказам и авариям на промышленных объектах и тяжести их последствий. К ним относят методы экспертных оценок, методы ранжирования, методы шкалирования /36,37/.

### **3.2. Негативные факторы воздействия источников чрезвычайных ситуаций на человека и среду обитания**

Независимо от источника возникновения все чрезвычайные ситуации имеют практически одни и те же факторы негативного воздействия на человека и среду его обитания. Это воздействие ударной волны при взрыве газовоздушных (топливовоздушных) смесей, взрывчатых веществ, технологических установок и т.п.; термическое воздействие при пожарах зданий и сооружений, пожаров разлива, лесных пожарах и т.п.; токсическое воздействие химического оружия, выбросов опасных химических веществ (ОХВ), шлейфа пожара и т.п.; механическое воздействие при поражении осколками, при обрушении зданий и сооружений и т.п. Установлены некоторые фиксированные значения негативных факторов, соответствующие той или иной степени поражения человека, зданий и сооружений. Например, при избыточном давлении на фронте ударной волны, равным 70 кПа, возможны контузии людей, полное разрушение зданий, средняя степень разрушения линий электропередач, сильная степень разрушения наземных резервуаров и т.д. При концентрации токсиканта  $LC_{50}$  (мг/л) возможно летальное поражение 50% всех подвергшихся токсичному поражению людей. В случае термического воздействия пожара разлива или при образовании огненного шара с плотностью теплового потока  $37 \text{ кВт/м}^2$  произойдет разрушение расположенных рядом емкостей, а при длительности экспозиции 30 с получат смертельное поражение 90% подвергшихся облучению людей.

Такой подход для определения поражающего действия негативных факторов называют детерминированным.

Одна и та же мера воздействия (количество поглощенного токсиканта, доза радиации, количество теплоты, избыточное давление ударной волны и т.п.) может вызвать последствия различной тяжести у разных людей, т.е. эффект поражения носит вероятностный характер. Такой подход к определению поражающего действия негативных факторов носит название вероятностного. Величина вероятности поражения (эффект поражения)  $P_{\text{пор}}$  (измеряется в долях единицы или процентах) выражается функцией Гаусса (функцией ошибок), записываемой как

$$P_{\text{пор}} = f(P_r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{P_r-5} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (3.1)$$

Верхним пределом интеграла является так называемая пробит-функция  $P_r$ , отражающая связь между вероятностью поражения  $P_{\text{пор}}$  и дозой негативного воздействия  $D$ ,

$$Pr = a + b \cdot \ln D, \quad (3.2)$$

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

### *3.2.1. Термическое воздействие на человека и строительные конструкции*

Термическое воздействие на человека связано с перегревом и последующими биохимическими изменениями верхних слоев кожи. Человек ощущает сильную (едва переносимую) боль, когда температура верхнего слоя кожного покрова ( $\approx 0,1\text{мм}$ ) повышается до  $45^\circ\text{C}$ . Время достижения «порога боли»  $\tau, \text{с}$ , связано с плотностью теплового потока  $q, \text{кВт/м}^2$ , соотношением



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

При плотности теплового потока менее 1,7 кВт/м<sup>2</sup> боль не ощущается даже при длительном тепловом воздействии. Степень термического воздействия зависит от величины теплового потока и длительности теплового излучения.

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

Ожог 1 степени:  $Pr = -34.8 + 3.02 \cdot \ln \left( q^{\frac{4}{3}} \cdot \tau \right);$

Ожог 2 степени:  $Pr = -38.1 + 3.02 \cdot \ln \left( q^{\frac{4}{3}} \cdot \tau \right);$

Смертельное поражение:  $Pr = -31.4 + 2.56 \cdot \ln \left( q^{\frac{4}{3}} \cdot \tau \right).$

Термическое воздействие на легковоспламеняющиеся материалы, например вследствие пожара, может вызвать дальнейшее распространение аварии и переход ее стадию каскадного развития. Согласно имеющейся статистике, распространение и развитие пожаров в производственных помещениях происходит в основном по материалам, сырью и технологическому оборудованию (42%), а также по сгораемым строительным конструкциям (36%). Среди последних наибольшее распространение имеют древесина и пластические материалы.

Для каждого материала существует критическое значение плотности теплового потока  $q_{кр}$ , при котором воспламенение не происходит даже при длительном тепловом воздействии. При увеличении плотности теплового потока время до начала воспламенения материала уменьшается (табл.3.1).

**Таблица 3.1. Характеристики критических тепловых нагрузок ( $q_{кр}$ , кВт/м<sup>2</sup>) и зависимость времени воспламенения ( $\tau$ , с) от плотности теплового потока  $q$  для различных веществ и материалов**

Вещество, материал	$q_{кр}$	Плотность теплового потока $q$				
		20	50	100	150	200
Солома	7,0	70,0	10,0	2,9	1,4	0,91
Пенопласт	7,4	73,7	10,3	2,9	1,5	0,91
Хлопок-волокно	7,5	74,7	10,4	2,9	1,5	0,92
Х/б ткани	8,37	83,9	10,7	3,0	1,5	0,92
Торф кусковой	9,8	103,6	11,4	3,1	1,5	0,93
Картон серый	10,8	122,4	11,8	3,1	1,5	0,93
Картон белый	10,88	124,1	11,9	3,1	1,5	0,94
Темная древесина, ДСП	12,56	172,3	12,7	3,2	1,5	0,96
Бензин А-76	12,6	173,8	12,8	3,2	1,6	0,96
Древесина сосновая, шероховатая	12,8	181,5	12,9	3,3	1,6	0,96
Резина	7,0	70,0	10,2	3,4	1,6	0,97
Битумная кровля	7,0	70,3	10,2	3,4	1,6	0,97
Пластик слоистый	7,0	70,3	10,2	3,4	1,6	0,98
Фанера	7,0	70,3	10,2	3,4	1,6	0,99
Древесина крашеная	7,0	70,3	10,2	3,4	1,7	1,00
Древесина обугленная	7,0	70,3	10,2	3,4	1,7	1,02

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

$$\tau = \frac{A}{(q - q_{кр})^n},$$

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

При длительности теплового воздействия 30 с и плотности теплового потока 12 кВт/м<sup>2</sup> воспламеняются деревянные конструкции; при плотности 10,5 - обгорает краска на окрашенных металлических конструкциях, обугливаются деревянные конструкции; при 8,4 – вспучивается краска на металлических конструкциях, разлагаются деревянные конструкции. Плотность теплового потока 4,0 безопасна для объектов.

Особенно опасен нагрев резервуаров с нефтепродуктами, который может привести к взрыву сосуда. В зависимости от длительности облучения критическая плотность теплового потока для емкостей с нефтепродуктами с температурой воспламенения  $\leq 235^{\circ}\text{C}$  значительно меняется:

Длительность воздействия, мин	5	10	15	20	29	>30
Критическое значение плотности теплового потока $q_{кр}, \text{кВт}/\text{м}^2$	34,9	27,6	24,8	21,4	19,9	19,5

Опасность термического воздействия на строительные конструкции связана со значительным снижением их строительной прочности при превышении определенной температуры.

Степень устойчивости сооружения к тепловому воздействию зависит от предела огнестойкости конструкции, характеризуемого временем, по истечении которого происходит потеря несущей способности. Прочность материалов может быть охарактеризована так называемой критической температурой прогрева, которая для металлических сварных и жестко заземленных конструкций –  $300...350^{\circ}\text{C}$ .

Потеря несущей способности изгибаемых, свободно опирающихся элементов плит, балок и т.п. наступает вследствие прогрева растянутой арматуры до критической температуры  $470...500^{\circ}\text{C}$ . Предел огнестойкости предварительно напряженного железобетона такой же, как у конструкций с напряженной арматурой. Особенность напряженных конструкций – образование необратимых деформаций при их прогреве уже до  $250^{\circ}\text{C}$ , после чего их нормальная эксплуатация невозможна.

Ниже приведены значения критической температуры прогрева некоторых строительных материалов,  $^{\circ}\text{C}$ :

Полимерные материалы .....	150
Стекло .....	200
Алюминий .....	250
Сталь .....	500

### 3.2.2. Воздействие ударной волны на человека, здания и сооружения.

При взрыве резервуара, парогазовоздушного облака, взрывчатого вещества, технологической установки образуется ударная волна, характеризующаяся избыточным давлением  $\Delta P_{\phi}$ , кПа, и импульсом фазы сжатия  $I^+$ , кПа · с, негативно воздействующая на человека, здания, сооружения и т.п.

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

Установлены следующие значения избыточного давления, кПа, вызывающего поражения человека различной степени (см. таблицу).

Механическое воздействие на человека происходит при обрушении зданий и сооружений, падении деревьев и столбов, ударе тела о препятствие (землю) при отбрасывании ударной волной и образующимися при взрыве осколками.

Случаи поражения человека при обрушении зданий, падении деревьев имеют вероятностный характер и могут быть оценены только по усредненным статистическим данным. Вероятность поражения той или иной степени при ударной волне на человека можно также определить по формуле (3.1) с использованием соответствующих формул пробит-функции:

Степень поражения	Пробит-функция
Вероятность длительной потери управляемости у людей (состояние нокдауна)	$Pr = 5 - 5,74 \ln \left\{ \frac{4,2}{1 + \Delta P_{\phi} / P_0} + \frac{1,3}{I^+ / (P_0^{1/2} \cdot m^{1/3})} \right\}$ <p style="text-align: center;">m – масса тела, кг.</p>
Разрыв барабанных перепонок	$Pr = -12,6 + 1,524 \cdot \ln \Delta P_{\phi}$
Вероятность отброса людей волной давления (летальный исход)	$Pr = 5 - 2,44 \ln \left[ \frac{7380}{\Delta P_{\phi}} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{\Delta P_{\phi} \cdot I^+} \right]$ <p style="text-align: center;"><math>\Delta P_{\phi}</math>, Па – избыточное давление; <math>I^+</math>, Па · с -импульс фазы сжатия</p>

При оценке воздействия ударной волны на здания и сооружения принимают четыре степени разрушений:

- слабые разрушения – повреждение или разрушение крыш, оконных и дверных проемов. Ущерб – 10-15% от стоимости здания;
- средние разрушения – разрушения крыш, окон, перегородок, чердачных перекрытий, верхних этажей. Ущерб – 30-40%;
- сильные разрушения – разрушение несущих конструкций и перекрытий. Ущерб -50%. Ремонт нецелесообразен;
- полное разрушение – обрушение зданий и сооружений.

Зависимость степени разрушений от величины избыточного давления на фронте ударной волны представлена в табл.3.2.

Вероятность разрушения зданий и сооружений той или иной степени можно определить также по формуле (3.1) с использованием формул пробит-функций:

Разрушение	Пробит-функция
Среднее	$Pr = 5 - 0,26 \ln \left[ \left( 17500 / \Delta P_{\phi} \right)^{8,4} + \left( 290 / I^+ \right)^{9,3} \right]$
Сильное	$Pr = 5 - 0,22 \ln \left[ \left( 40000 / \Delta P_{\phi} \right)^{7,4} + \left( 460 / I^+ \right)^{11,3} \right]$

Таблица 3.2.

## Избыточное давление (кПа), соответствующее степени разрушения

Объект	Степень разрушения в зависимости от			
	ΔP, кПа			
	полное	сильное	среднее	слабое
Здания жилые:				
кирпичные многоэтажные	30...40	20...30	10...20	8...10
кирпичные малоэтажные	35...45	25...35	15...25	8...15
деревянные	20...30	12...20	8...12	6...8
Здания промышленные:				
с тяжелым металлическим или железобетонным каркасом	60...100	50...60	40...50	20...40
с легким металлическим каркасом или безкаркасные	60...80	40...50	30...50	20...30
Промышленные объекты:				
ТЭС	25...40	20...25	15...20	10...15
котельные	35...45	25...35	15...25	10...15
трубопроводы наземные	130	50	20	-
трубопроводы на эстакаде	40...50	30...40	20...30	-
трансформаторные подстанции	100	40-60	20...40	10...20
ЛЭП	120..200	80...120	50...70	20...40
водонапорные башни	70	40...60	20...40	10...20
Резервуары:				
стальные наземные	90	80	55	35
газгольдеры и емкости ГСМ и химических веществ	40	35	25	20
частично заглубленные для нефтепродуктов	100	75	40	20
подземные	200	150	75	40
Металлические и железобетонные мосты	250.300	200.300	150.200	100.150
Железнодорожные пути	400	250	175	125
Тепловозы массой до 50 т	90	70	50	40
Цистерны	80	70	50	30
Вагоны цельнометаллические	150	90	60	30
Вагоны товарные деревянные	40	35	30	15
Автомшины грузовые	70	50	35	10

## 3.2.3. Токсическое воздействие на человека и окружающую среду

Перечень производимых и используемых в стране химических веществ насчитывает 70 тыс. наименований. Большинство из них представляет определенную опасность для здоровья людей и экологии, однако к опасным химическим веществам относят только те вещества, прямое или

опосредованное воздействие которых на человека может вызвать или хроническое заболевания людей или их гибель.

Основные характеристики токсических свойств ОХВ – предельно допустимая концентрация ПДК, мг/м<sup>3</sup>, смертельная концентрация вещества в данной среде (воздухе, воде, продуктах), а также токсодоза (пороговая, поражающая, смертельная). Наиболее часто используют величины LC<sub>50</sub>, мг/л (средняя смертельная концентрация, вызывающая летальный исход у 50% пораженных), и LD<sub>50</sub>, мг·мин/л (средняя смертельная токсодоза, вызывающая летальный исход у 50% пораженных при продолжительности экспозиции для незащищенного населения 30 минут). По опасности воздействия на организм человека все ОХВ подразделяются на четыре класса (табл.3.3).

Таблица 3.3.

Показатель	Класс токсической опасности			
	1	2	3	4
Предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны (ПДК <sub>р.з.</sub> ), мг/м <sup>3</sup>	<0,1	0,1...1,0	1,1...10	>10
Средняя смертельная концентрация в воздухе, мг/м <sup>3</sup>	<500	500...5000	5001...50000	>50000
Средняя смертельная доза при попадании в желудок, мг/кг	<15	15...150	151...500	>500
Средняя смертельная доза при попадании на кожу, мг/кг	<100	100...500	501...2500	>2500

Введение такой классификации обусловлено тем, что в ряде случаев высокотоксичные соединения оказываются вследствие особенностей их физико-химических свойств относительно малоопасными и, наоборот, низкотоксичные становятся высокоопасными (например, аммиак). Вещества 1 и 2 классов способны образовывать опасные для жизни и здоровья людей концентрации даже при небольших утечках. Степень опасности химического вещества при авариях на химически опасном объекте в значительной мере зависит от его количества на аварийном объекте.

В наиболее общем случае острого токсического воздействия на человека эффект поражения  $P_{\text{пор}}$  представляют в виде формулы (3.1). В случае пребывания человека в атмосфере с постоянной концентрацией токсиканта (ОХВ) значение пробит-функции можно определить по соотношению:

$$Pr = a + b \cdot \ln(C_t^n \cdot \tau),$$

где  $n$  – показатель степени, определяемый экспериментально;  $\tau$  – время воздействия, мин.;  $c_t$  – концентрация токсиканта, связанная с концентрацией  $c$  (мг/л) следующим соотношением

$$C_t = \frac{C \cdot (273,15 + t)}{12,187 \cdot M},$$

где  $t$  – температура смеси,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $M$  – молекулярная масса токсиканта.

Таблица 3.4.

#### Значения коэффициентов $a$ , $b$ и $n$

Вещество	$a$	$b$	$n$
Акролеин	-9,931	2,049	1,000
Акрилонитрил	-29,420	3,008	1,430
Аммиак	-35,900	1,850	2,000
Бензол	-109,780	5,300	2,000
Бром	-9,040	0,920	2,000
Угарный газ	-37,980	3,700	1,000
Четыреххлористый углерод	-6,290	0,408	2,500
Хлор	-8,290	0,920	2,000
Формальдегид	-12,240	1,300	2,000
Соляная кислота	-16,850	2,000	2,000
Цианистоводородная кислота	-29,420	3,008	1,430
Фтористоводородная кислота	-35,870	3,354	1,000
Сероводород	-31,420	3,008	1,430
Бромистый метил	-56,810	5,270	1,000
Метилизоционат	-5,642	1,637	0,653
Диоксид азота	-13,790	1,400	2,000
Фосген	-19,270	3,686	1,000
Оксид пропилена	-7,415	0,509	2,000
Диоксид серы	-15,670	2,100	1,000
Толуол	-6,794	0,408	2,500

Приведенные в таблице 3.4 значения коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $n$  являются усредненными, поскольку результаты токсикологического воздействия существенно зависят от текущего состояния человека, его возраста, физических данных и т.п. Например, при оценке масштаба поражения хлором приведенные значения коэффициентов справедливы для взрослых и



подростков, а для детей и людей преклонного возраста пробит-функция имеет вид

$$Pr = -6,61 + 0,92 \ln(C_i^2 \cdot \tau)$$

при совместном действии многих токсикантов используют метод сложения (аддитивности) эффектов, что относительно справедливо только при однонаправленном действии ОХВ.

### **3.3. Анализ и обобщение моделей для использования в методиках расчета**

Для определения негативного воздействия поражающих факторов чрезвычайных ситуаций на человека, его имущество и окружающей природной среды (ОПС), необходимо знать пространственно-временное распределение тех или иных физико-химических, биологических, теплофизических и других параметров:

1) при воздействии ударной волны – избыточное давление ( $\Delta P_\phi = P - P_0 > 0$ ) на фронте ударной волны и импульс фазы сжатия;

2) при термическом воздействии – поле плотностей тепловых потоков излучения;

3) при токсическом воздействии – поле концентраций (токсодоз) токсиканта и т.д.

Под сценарием развития техногенной аварии понимается последовательность логически связанных между собой отдельных событий (истечение, выброс, испарение, рассеяние, дрейф паров, воспламенение, взрыв, воздействие на людей и соседнее оборудование и т. п.), в соответствии с которыми определяются поля физических параметров, вид и величина поражающих факторов, степень поражения людей, их имущества, ОПС.

В настоящее время разработано достаточно большое количество методик и руководящих материалов для оценки последствий аварий на опасных промышленных объектах /38-42,45,50,51,63/ и другие. Анализ некоторых из

них представлен в таблице 3.5. Проведенный анализ показал, что большинство из них предназначены для оценки материальных ущербов в результате аварий и оценки негативных воздействий на производственный персонал опасных промышленных объектов, а также для организации действий служб ГО И ЧС по локализации и ликвидации последствий аварий. Для оценки экологических ущербов в результате аварий могут быть использованы две методики: "Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте" /39/ и "Методика оценки последствий химических аварий" (ТОКСИ) /38/. Методики /50,51/ могут быть использованы для оценки некоторых параметров (масс взрывоопасных облаков, объемов разлившейся жидкости), которые могут использоваться в качестве исходных данных при расчетах по методикам /38,39/.

Проведенный анализ моделей оценки физико-химических параметров процессов при авариях на промышленных объектах представлен в виде обобщенной таблицы 3.6.

Основными результатами расчетов по моделям являются определение масс жидкостей, ГЖ, ЛВЖ в случае возникновения аварийных ситуаций (разгерметизацией, растеканий, разрушений и т.п.) на технологических установках и трубопроводах промышленных производств.

Эти параметры могут быть использованы как исходные данные (масса вытесненной жидкости, масса ГЖ, масса ЛВЖ и т.п.) для непосредственной оценки экологических последствий аварий с использованием соответствующих методик /38,39/. В этих же методиках могут быть использованы такие параметры, как концентрации паров в заданной точке пространства. Для косвенных оценок экологических ущербов может использоваться величина интенсивности испарения жидкости из пролива.

Другие параметры (интенсивность теплового излучения, размеры взрывоопасной зоны) могут быть использованы в методиках /38,41/ для

## Анализ методик оценки последствий аварий на объектах техногенной опасности Таблица 3.5

Наименование методики	Назначение	Исходные данные	Результаты	Использование (в том числе и других методиках)
<p>Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте (СДЯВ)</p>	<p>Методика для заблаговременного и оперативного прогнозирования масштабов заражения на случай выбросов СДЯВ в окружающую среду при авариях на химически опасных объектах и транспорте</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- общее количество СДЯВ на объекте и данные о размещении их запасов в технологических емкостях и трубопроводах;</li> <li>- количество СДЯВ, выброшенных в атмосферу, и характер их разлива на подстилающей поверхности («свободно», «в поддон» или «в обваловку»);</li> <li>- высота поддона или обваловки складских емкостей;</li> <li>- метеорологические условия: температура воздуха, скорость ветра на высоте 10 м (на высоте флюгера), степень вертикальной устойчивости воздуха.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- прогнозирование глубины зоны заражения СДЯВ;</li> <li>- площадь зоны заражения СДЯВ;</li> <li>- Время подхода зараженного воздуха к объекту и продолжительность поражающего действия СДЯВ.</li> </ul>	<p>Для оценки экологических последствий заражения воздушной среды</p>
<p>Методики оценки последствий химических аварий (ТОКСИ)</p>	<p>Для количественной оценки последствий химических аварий на промышленном объекте с выбросом опасных химических веществ в атмосферу</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- физико-химические и токсологические характеристики ОХВ;</li> <li>- количество и технологические параметры ОХВ;</li> <li>- вероятный сценарий выброса ОХВ в атмосферу;</li> <li>- параметры технологического аппарата, на котором произошла авария;</li> <li>- топографические характеристики территории вблизи аварийного объекта;</li> <li>- метеоусловия на момент аварии;</li> <li>- время экспозиции;</li> <li>- данные о персонале и населении, находящемся вблизи аварийного объекта.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- количество поступивших в атмосферу опасных химических веществ при различных авариях;</li> <li>- пространственно-временное поле концентраций ОХВ в атмосфере;</li> <li>- зоны химического заражения;</li> <li>- степень поражения людей в случае химической аварии</li> </ul>	<p>Для оценки экологических и социальных последствий: прогнозирование загрязнения атмосферного воздуха; поражения людей (токсодозы)</p>

Продолжение таблицы 3.5

<p>Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (ТВС)</p>	<p>Для оценки последствий аварий, на объектах по хранению, переработке и транспортировке сжиженных и сжатых углеводородных газов (СУГ, СЖУГ)</p>	<p>- масса топлива, находящегося в различных местах объекта (резервуарах, установках и т.д.); - класс окружающего пространства - план объекта и прилегающей территории с картограммой распределения людей;</p>	<p>Определение массы вещества в облаке ТВС для СУГ и СЖУГ, определение режима взрывного прекращения огненного шара, оценка параметров ударной волны, осколки оборудования.</p>	<p>Для оценки экономических последствий. В качестве исходных данных для методик СДЯВ, ТОКСИ (косвенных экологических последствий)</p>
<p>Методика оценки последствий аварий на пожаро-, взрывоопасных объектах (ПАПВО)</p>	<p>Для оценки последствий аварий, на объектах по хранению, переработке и транспортировке сжиженных и сжатых углеводородных газов (СУГ, СЖУГ), ЛВЖ, конденсированных взрывчатых веществ (КВВ).</p>	<p>- масса топлива, находящегося в различных местах объекта (резервуарах, установках и т.д.); - класс окружающего пространства - план объекта и прилегающей территории с картограммой распределения людей.</p>	<p>Определение массы вещества в облаке ТВС для СУГ и СЖУГ, ЛВЖ, КВВ, объем вытекаемой жидкости при разрушении емкостей определения режима взрывного прекращения огненного шара, определение индекса теплового излучения, оценка параметров ударной волны, осколки оборудования, количества погибших на открытой местности, в зданиях и сооружениях</p>	<p>Для оценки экономических и социальных последствий. В качестве исходных данных для методик СДЯВ, ТОКСИ (косвенных экологических последствий)</p>

**Анализ моделей физико-химических параметров процессов в аварийных ситуациях      Таблица 3.6**

N п/п	Наименование модели	Исходные данные	Результаты	Использование в методиках оценки последствий аварий
1	Оценка интенсивности теплового излучения от пожара, пролива и от огненного шара	-среднеповерхностная интенсивность теплового излучения; - площадь пролива; - удельная массовая скорость выгорания ЛВЖ (ГЖ); - параметры окружающего воздуха; - расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта; - масса ЛВЖ в огневом шаре.	- эффективный диаметр пролива и огненного шара, высота пламени; -интенсивность теплового облучения	Испарения жидкости из пролива, методика прогнозирования масштаба заражения сильно действующими ядовитыми веществами (СДЯВ), методика оценки последствий химических аварий (ТОКСИ)
2	Истечение жидкости из отверстия в резервуаре	- физико-химические параметры ЛВЖ - коэффициент истечения; -параметры технологического оборудования; - характеристики территории вблизи аварийного объекта (обвалование); - начальная высота столба жидкости в резервуаре.	- массовый расход жидкости; - количество жидкости, перелившейся через отверстие за время истечения.	СДЯВ, ТОКСИ
3	Определение избыточного давления в ударной волне при взрыве паровоздушного облака	- расстояние от эпицентра взрыва; - количество паров ЛВЖ в облаке; - удельная теплота сгорания топлива.	- избыточное давление в ударной волне; - импульс положительной фазы ударной волны.	Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (ТВС), методика оценки последствий аварий на пожаро-, взрывоопасных объектах (ПАПВО)

Продолжение таблицы 3.6

4	Метод оценки избыточного давления в ударной волне при взрыве резервуара с перегретой ЛВЖ (ГЖ) в очаге пожара	<ul style="list-style-type: none"> <li>- масса ЛВЖ (ГЖ), содержащейся в резервуаре;</li> <li>- физико-химические параметры жидкости;</li> <li>- параметры технологического аппарата;</li> <li>- расстояние от эпицентра взрыва</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- избыточное давление в ударной волне;</li> <li>- импульс положительной фазы ударной волны.</li> </ul>	ТВС, ПАПВО
5	Определение массы ЛВЖ или ГЖ аварийных разгерметизациях	<ul style="list-style-type: none"> <li>- физико-химические характеристики ЛВЖ (ГЖ), паров ЛВЖ (ГЖ)</li> <li>- технологические параметры оборудования.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- масса ЛВЖ при аварийных разгерметизациях</li> </ul>	СДЯВ, ТОКСИ
6	Испарение жидкости из пролива	<ul style="list-style-type: none"> <li>- молярная масса жидкости;</li> <li>- параметры воздушного потока;</li> <li>- давление насыщенных паров жидкости.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- интенсивность испарения жидкости</li> </ul>	СДЯВ, ТОКСИ
7	Образование паровоздушного облака	<ul style="list-style-type: none"> <li>- топографические характеристики территории;</li> <li>- интенсивность испарения;</li> <li>- площадь испарения;</li> <li>- скорость ветра.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- концентрация паров в заданной точке пространства</li> </ul>	СДЯВ, ТОКСИ, ТВС, ПАПВО
8	Определение максимальных размеров взрывоопасных зон	<ul style="list-style-type: none"> <li>- физико-химические параметры паров ЛВЖ;</li> <li>- площадь пролива;</li> <li>- нижний концентрационный предел.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- горизонтальный и вертикальный размер взрывоопасных зон</li> </ul>	ТВС, ПАПВО

оценки других видов ущербов (экономических, социальных) или косвенных оценок экологических ущербов.

### **3.4. Воздействие аварийных взрывов на городские и другие объекты**

Взрыв – это процесс скоротечного высвобождения потенциальной энергии, связанный с внезапным изменением состояния вещества и сопровождающийся скачком давления или ударной волной, способной привести или приводящей к возникновению техногенной ЧС.

По мере прохождения ударной волны давление в фиксированной точке изменяется. Период повышенного избыточного давления  $\Delta P_{\phi} = P - P_0 > 0$  называется фазой сжатия, а период пониженного давления – фазой разряжения. По мере распространения ударной волны ее интенсивность убывает, скорость продвижения фронта волны уменьшается, и на определенном расстоянии от эпицентра взрыва ударная волна переходит в звуковую.

Взрыв может происходить с горением (процесс окисления) или без него и несет потенциальную опасность поражения людей и обладает разрушающей способностью. Взрыв парогазовой смеси, при котором скорость распространения горения определяется скоростью распространения ударной волны называется **детонационным**, а взрыв парогазовой смеси, при котором скорость распространения горения определяется теплопроводностью среды называется **дефлаграционным**. Взрыв может быть физическим или химическим. В первую категорию – физические взрывы – попадают ядерные взрывы, а также такие события, как разрушение сосудов, содержащих сжатые или сжиженные газы. Химический взрыв представляет собой либо экзотермическую химическую реакцию в твердом или жидком веществе (взрыв конденсированного ВВ), либо газофазную реакцию, когда происходит окислительно-восстановительный процесс (объемный взрыв), как, например, между кислородом, содержащимся в воздухе, и воспламеняющимися

твердыми или жидкими веществами в мелкодисперсном виде, или между молекулами газа или пара, смешанными с воздухом. Газофазные взрывы могут быть ограниченными или неограниченными.

Потенциальными объектами аварий, связанных с взрывом, являются, как правило, хранилища и склады взрыво-, - и пожароопасных веществ. Сюда относятся нефтесклады и нефтебазы, склады ракетного топлива, склады артиллерийских боеприпасов, склады инженерных боеприпасов, склады взрывчатых веществ и т.п. Однако часто происходят взрывы, связанные с тяжелыми авариями и человеческими жертвами, также и на промышленных предприятиях. Взрываются котлы в котельных, газы, аппараты, продукция и полуфабрикаты на химических предприятиях, пары бензина и других компонентов на нефтеперегонных заводах, мучная пыль на мельничных комбинатах и зерновых элеваторах, сахарная пудра на сахаро-рафинадных заводах, древесная пыль и лакокрасочные пары на деревообрабатывающих комбинатах, газовые конденсаты при утечке из газопроводов и т. п. Особенно подвержены взрывам с тяжелыми последствиями шахты и рудники, где взрывается угольная пыль и газ.

При авариях, связанных с взрывами, происходят сильные разрушения и имеют место большие людские потери. Разрушения являются следствием бризантного действия продуктов взрыва и воздушной ударной волны. Характер и размеры зоны разрушений зависят от мощности взрыва и параметров ударной волны – избыточного давления на фронте волны и длительности действия давления. Разрушения от ударной волны вызываются как фазой сжатия, так и разрежения, причем для некоторых конструкций фаза разрежения может быть определяющей.

Аварии, связанные с взрывами, часто сопровождаются пожарами. Взрыв иногда может привести к незначительным разрушениям, но связанный с ним пожар может вызвать катастрофические последствия и последующие более мощные взрывы и более сильные разрушения. Причины пожаров, как правило, те же, что и взрывов. При этом взрыв может быть причиной или



следствием пожара, и наоборот, пожар может быть причиной или следствием взрыва.

По взрывной, взрывопожарной и пожарной опасности все промышленные производства подразделяются на шесть категорий: А, Б, В, Г, Д, Е. К категории **А** относятся нефтеперерабатывающие заводы, химические предприятия, склады нефтепродуктов и пр., как наиболее опасные; к категории **Б** - цеха приготовления и транспортировки угольной пыли, древесной муки, сахарной пудры, выбойные и размольные отделения мельниц и др.; к категории **В** – лесопильные, деревообрабатывающие, столярные, мебельные, лесотарные и т.п. предприятия. Производства категорий Г, Д и Е не представляют такой серьезной опасности, как производства категории А, Б и В.

Взрыв представляет собой кратковременный процесс весьма быстрого превращения вещества с выделением большого количества энергии в небольшом объеме. Указанные превращения возникают в результате химической реакции (конденсированные, жидкие и газообразные ВВ). К взрывным процессам, вызванным физическими причинами, можно отнести разрушения резервуаров со сжатым газом, паровых котлов, а также мощные электрические разряды.

При взрыве заряда конденсированного взрывчатого вещества (ВВ) в атмосфере возникают воздушные ударные волны, распространяющиеся с большой скоростью в виде области сжатия – разрежения со скачком на своем фронте давления, температуры, плотности и скорости частиц среды (массовой скорости). При взрывах компактного заряда ВВ произвольной формы на расстояниях, превышающих несколько его характерных размеров, эффективность действия ударной волны эквивалентна действию заряда сферической формы. Форма фронта волны также является сферической. Таким образом, форма заряда несущественно сказывается на параметрах воздушной ударной волны на расстояниях от конструкций, представляющий практический интерес. Кроме того, масса заряда ВВ на этих расстояниях

оказывается несущественной в сравнении с массой сферического объема воздуха (за фронтом ударной волны), вовлекаемого в движение. Эти обстоятельства привели к полезной абстракции, облегчающей постановку и решение задачи о расчете параметров ударных волн – схеме «точечного взрыва».

При точечном взрыве считается, что конечное количество энергии мгновенно выделяется в точке, т.е. масса продуктов детонации пренебрежимо мала. На не слишком больших расстояниях от центра взрыва давление в волне значительно выше атмосферного (сильная ударная волна), и атмосферным давлением пренебрегают. Задачу о точечном взрыве обычно формулируют для трех видов симметрии: сферической, цилиндрической и плоской. Цилиндрическая симметрия относится к зарядам, распределенным вдоль некоторой прямой, а плоская – к зарядам, расположенным в некоторой плоскости. Эффект действия ударных волн зависит как от вида симметрии, так и от расположения точки (линии, плоскости) взрыва относительно земной поверхности.

#### *3.4.1. Общие принципы количественной оценки взрывоопасности технологических блоков*

Методика расчета применяется при выборе основных направлений технических мероприятий по защите объектов и персонала от воздействия взрыва парогазовоздушных сред (в дальнейшем ПГВС), а также твердых и жидких химически нестабильных соединений, способных взрываться /50/.

1. Энергетический потенциал взрывоопасности  $E$  (кДж) блока, определяется полной энергией сгорания парогазовой фазы, находящейся в блоке, с учетом величины работы ее адиабатического расширения, а также величины энергии полного сгорания испарившейся жидкости с максимально возможной площади ее пролива. При этом считается а) при аварийной разгерметизации аппарата происходит его полное раскрытие (разрушение); б)

площадь пролива жидкости определяется, исходя из конструктивных решений зданий или площадки наружной установки; в) время испарения принимается не более одного часа:

$$E = E_1' + E_2' + E_1'' + E_2'' + E_3'' + E_4'',$$

где  $E_1'$  – сумма энергий адиабатического расширения А (кДж) и сгорания ПГФ находящейся в блоке, кДж:

$$E_1' = G_1' \cdot q' + A;$$

$$A = \frac{1}{k-1} \cdot P V' \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \cdot 10^3,$$

где  $G_1', q'$  – масса и удельная теплота сгорания ПГФ соответственно;  $P_0, P$  – соответственно атмосферное (0,1 МПа) и регламентированное абсолютное давления в блоке;  $V'$  – геометрический объем ПГФ;  $k$  – показатель адиабаты.

Для практического определения энергии адиабатического расширения ПГФ можно воспользоваться формулой:

$$A = \beta_1 \cdot P \cdot V' \cdot 10^3,$$

где значение коэффициента  $\beta_1$  принимается по таблице в зависимости от показателя адиабаты и давления в технологическом блоке (МПа).

$$G_1' = V_0' \cdot \rho_0',$$

где  $V_0' = \frac{P \cdot V'}{P_0 \cdot T_1} \cdot T$ ;  $T = T_1 \cdot \left( \frac{P_0}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}}$ ;  $\rho_0' = \rho \cdot \left( \frac{P_0}{P} \right)^{\frac{1}{k}}$ ;  $T_1$  – регламентированная

температура ПГФ;  $\rho$  – плотность ПГФ при нормальных условиях.

При избыточных значениях  $P < 0,07$  МПа и  $P \cdot V' < 0,02$  МПа · м<sup>3</sup> энергию адиабатического расширения ПГФ (А) ввиду малых ее значений в расчет можно не принимать.

$E_2'$  – энергия сгорания ПГФ, поступившей к разгерметизированному участку от смежных объектов (блоков), кДж:

$$E_2' = \sum_{i=1}^n G_i' \cdot q_i',$$

Для  $i$ -го потока  $G_i' = \rho_i' \cdot w_i' \cdot S_i' \cdot \tau_i$ ;  $w_i' = \sqrt{\frac{2kP_1 v_i'}{k+1}}$ ;  $\tau_i$  – время с момента разгерметизации до полного срабатывания отключающей аварийный блок арматуры;  $v_i'$  – удельный объем ПГФ (в реальных условиях);  $S_i'$  – площадь сечения, через которое возможно истечение ПГФ;  $w_i'$  – скорость истечения ПГФ в рассматриваемый блок из смежных блоков, при  $P \leq 0,07$  МПа :

$$w_i' = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot P_1 \cdot v_i' \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

$E_1''$  – энергия сгорания ПГФ, образующейся за счет энергии перегретой ЖФ рассматриваемого блока и поступившей от смежных объектов за время  $\tau_i$ , кДж:

$$E_1'' = G_1'' \cdot [1 - \exp(-c_i'' \cdot \theta_{k_i} / r)] \cdot q_i' + \sum_{i=1}^n G_i'' \cdot [1 - \exp(-c_i'' \cdot \theta_{k_i} / r_i)] \cdot q_i',$$

где  $c_i''$  – удельная теплоемкость ЖФ;  $\theta$  – разность температур ЖФ при регламентированном режиме и ее кипении при атмосферном давлении;  $r$  – удельная теплота парообразования горючей жидкости.

Количество ЖФ, поступившее от смежных блоков:

$$G_1'' = \rho_i'' w_i'' S_i'' \tau_i,$$

где  $S_i''$  – площадь сечения, через которое возможно истечение ПГФ или ЖФ при разгерметизации;  $\tau_i$  – время с момента разгерметизации до полного

срабатывания отключающей аварийный блок арматуры;  $w_i'' = \mu \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_i''}}$  ( $\mu$  –

безразмерный коэффициент, учитывающий гидродинамику потока в зависимости от реальных свойств жидкой фазы и гидравлических условий,

принимается в пределах 0,4 – 0,8);  $\Delta P$  – избыточное давление истечения ЖФ;

$E_2''$  – энергия сгорания ПГФ, образующейся из ЖФ за счет тепла экзотермических реакций не прекращающихся при разгерметизации:

$$E_2'' = \frac{q'}{r} \cdot \sum_{i=1}^n \Pi_{P_i} \tau_{P_i},$$

где  $\Pi_{P_i}$  – скорость теплопритока к ГЖ за счет суммарного теплового эффекта экзотермической реакции;  $\tau_{P_i}$  – время с момента разгерметизации до полного прекращения экзотермических процессов (принимается для каждого случая, исходя из конкретных регламентированных условий проведения процесса и времени срабатывания отсечной арматуры и средств ПАЗ, сек.);  $E_3''$  – энергия сгорания ПГФ, образующийся из ЖФ за счет теплопритока от внешних теплоносителей:

$$E_3'' = \frac{q'}{r} \sum_{i=1}^n \Pi_{T_i} \tau_{T_i},$$

где  $\tau_{T_i}$  – время с момента разгерметизации до полного прекращения подачи теплоносителя к аварийному блоку (прекращение теплообменного процесса);  $\Pi_{T_i}$  – скорость теплопритока к ЖФ от внешних теплоносителей, кДж/с, (может определяться с учетом конкретного теплообменного оборудования и основных закономерностей процессов теплообмена  $\Pi_{T_i} = K_i F_i \Delta t_i$  по разности теплосодержания теплоносителя на входе в теплообменный аппарат и выходе из него):

$$\Pi_{T_i} = W_{T_i} c_i (t_2' - t_1') \text{ или } \Pi_{T_i} = W_{T_i} r_{T_i},$$

где  $W_{T_i}, r_{T_i}$  – секундный расход и удельная теплота парообразования теплоносителя;  $E_4''$  – энергия сгорания ПГФ, образующейся из пролитой на твердую поверхность (пол, поддон, грунт и т.п.) ЖФ за счет теплоотдачи от окружающей среды (от твердой поверхности и воздуха к жидкости по ее поверхности):

$$E_4'' = G_{\Sigma}'' \cdot q', \text{ где } G_{\Sigma}'' = G_4'' + G_5''; G_4'' = 2 \cdot \frac{T_0 - T_k}{r} \cdot \frac{\varepsilon}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{F_{II}}{F_{ж}} \cdot F_{II} \cdot \sqrt{\tau},$$

где  $T_0$  – температура твердой поверхности, К;  $\varepsilon = \sqrt{\lambda \rho_T c_T}$ ;  $\varepsilon, \lambda, \rho_T, c_T$  – коэффициенты тепловой активности поверхности,

теплопроводности материала твердой поверхности, плотность материала и удельная теплоемкость материала твердой поверхности, соответственно;  $F_{\text{п}}$  - площадь контакта жидкости с твердой поверхностью разлива (площадь теплообмена между пролитой жидкостью и твердой поверхностью);  $F_{\text{ж}}$  - площадь поверхности зеркала жидкости;  $T_{\text{к}}$  - температура кипения горючей жидкости.

$$G_5'' = m_{\text{и}} F_{\text{ж}} \tau_{\text{и}}; \quad m_{\text{и}} = 10^{-6} \eta P_{\text{н}} \sqrt{M}, \text{ где } P_{\text{н}} = P_0 \exp \left[ \frac{r}{R} \left( \frac{1}{T_{\text{к}}} - \frac{1}{T} \right) \right],$$

где  $m_{\text{и}}$  - интенсивность испарения;  $\tau_{\text{и}}$  - время контакта жидкости с поверхностью пролива, принимаемое в расчет;  $P_{\text{н}}$  - давление насыщенного пара при расчетной температуре;  $M$  - молекулярная масса;  $R$  - газовая постоянная ПГФ.

Значение безразмерного коэффициента  $\eta$ , учитывающего влияние скорости и температуры воздушного потока над поверхностью (зеркало испарения) жидкости, принимается по таблице.3.7.

Таблица 3.7. Зависимость массы ПГФ пролитой жидкости от температуры ее кипения при  $\tau = 180$  с.

Значение температуры кипения жидкой фазы, $^{\circ}\text{C}$	Масса парогазовой фазы $G_{\Sigma}$ , кг (при $F_{\text{п}} = 50\text{м}^2$ )
Выше 60	<10
от 60 до 40	10-40
от 40 до 25	40-85
от 25 до 10	85-135
от 10 до -5	135-185
от -5 до -20	185-235
от -20 до -35	235-285
от -35 до -55	285-350
от -55 до -80	350-425
ниже -80	>425

Значение массы ПГФ пролитой жидкости от температуры ее кипения при  $\tau = 180$ сек. Ориентировочно  $G_{\Sigma}''$  может определяться по таблице 3.7 при  $F_n = 50\text{м}^2$ .

Для конкретных условий, когда площадь твердой поверхности пролива жидкости окажется больше или меньше  $50\text{ м}^2$  ( $F_n \neq 50$ ), производится пересчет массы испарившейся жидкости по формуле:

$$G_{\Sigma}'' = G_{\Sigma} \cdot \frac{F_n}{50} \cdot \frac{\tau}{180}$$

2. По значениям общих энергетических потенциалов взрывоопасности  $E$  определяются величины приведенной массы и относительного энергетического потенциала, характеризующих взрывоопасность технологических блоков.

2.1. Общая масса горючих паров (газов) взрывоопасного парогазового облака  $m$ , приведенная к единой удельной энергии сгорания ( $46000\text{ кДж/кг}$ ), равна:

$$m = \frac{E}{46000}$$

2.2. Относительный энергетический потенциал взрывоопасности  $Q_B$  технологического блока находится по формуле:

$$Q_B = \frac{\sqrt[3]{E}}{16,534}$$

По значениям относительных энергетических потенциалов  $Q_B$  и приведенной массе парогазовой среды  $m$  осуществляется категорирование технологических блоков (табл. 3.8).

Таблица 3.8.

Показатели категорий взрывоопасности технологических блоков

Категория взрывоопасности	$Q_B$	$m$ , кг
<b>I</b>	$>37$	$>5000$
<b>II</b>	$27-37$	$2000-5000$
<b>III</b>	$<27$	$<2000$

### 3.4.2. Расчет участвующей во взрыве массы вещества и радиусов зон разрушения

Расчет может применяться при выборе основных направлений технических мероприятий по защите объектов и персонала от воздействия взрыва парогазовых сред, а также твердых и жидких химически нестабильных соединений (перекисные соединения, ацетилениды, нитросоединения различных классов, продукты осмоления, трихлористый азот и др.), способных взрываться.

Отметим, что методика дает ориентировочные значения участвующей во взрыве массы вещества при следующих условиях и допущениях.

1. В расчетах принимаются общие приведенные массы парогазовых сред  $m$  и соответствующие им энергетические потенциалы  $E$ .
2. Масса твердых и жидких химически нестабильных соединений определяется по их содержанию в технологической системе, блоке, аппарате.
3. Масса парогазовых веществ, участвующих во взрыве, определяется произведением:

$$m' = z \cdot m,$$

где  $z$  – доля приведенной массы парогазовых веществ, участвующих во взрыве.

В общем случае для неорганизованных парогазовых облаков в **незамкнутом** пространстве с большой массой горючих веществ доля участия во взрыве может приниматься равной  $z = 0,1$ . В отдельных обоснованных случаях доля участия веществ во взрыве может быть снижена, но не менее чем до 0,02.

Для производственных помещений (зданий) и других **замкнутых** объемов значения  $z$  могут приниматься: для **водорода**  $z = 1,0$ , для **горючих газов**  $z = 0,5$ , для **паров ЛВЖ и горючих жидкостей**  $z = 0,3$ .

4. Источники воспламенения могут быть постоянные (печи, факелы, не взрывозащищенная электроаппаратура и т.п.) или случайные (временные



огневые работы, транспортные средства и т.п.), которые могут привести к взрыву парогазового облака при его распространении.

5. Для оценки уровня воздействия взрыва может применяться тротильный эквивалент взрыва парогазовой среды  $W_T$  (кг), определяемый по условиям адекватности характера и степени разрушения при взрывах парогазовых облаков, а также твердых и жидких химически нестабильных соединений, рассчитывается по формулам:

#### 5.1. Для парогазовых сред

$$W_T = \frac{0,4 \cdot q' \cdot z \cdot m}{0,9 \cdot q_T},$$

где 0,4 – доля энергии взрыва парогазовой среды, затрачиваемая непосредственно на формирование ударной волны; 0,9 – доля энергии взрыва тринитротолуола (ТНТ), затрачиваемая непосредственно на формирование ударной волны;  $q'$  – удельная теплота сгорания парогазовой среды, кДж/кг;  $q_T$  – удельная энергия взрыва ТНТ, кДж/кг.

#### 5.2. Для твердых и жидких химически нестабильных соединений:

$$W_T = \frac{q_k}{q_T} \cdot W_k,$$

где  $W_k$  – масса твердых и жидких химически нестабильных соединений;  $q_k$  – удельная энергия взрыва твердых и жидких химически нестабильных соединений.

5.3. Зоной разрушения считается площадь с границами, определяемыми радиусами  $R$ , центром которой является рассматриваемый технологический блок или наиболее вероятное место разгерметизации системы. Границы каждой зоны характеризуются значениями избыточных давлений по фронту ударной волны  $\Delta P$ . По результатам бомбардировок границы различных степеней разрушений зданий аппроксимированы уравнением (Великобритания):

$$R = K \cdot \frac{\sqrt[3]{W_T}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{W_T}\right)^2\right]^{\frac{1}{6}}},$$

где  $R$  – расстояние, м;  $K$  – безразмерный коэффициент, характеризующий воздействие взрыва на объект и равный: 3,8 – для полного разрушения зданий ( $\Delta P \geq 100$ кПа); 5,6 – 50% зданий полностью разрушено ( $\Delta P \approx 70$ кПа); 9,6 – здания непригодны для обитания ( $\Delta P = 28$ кПа); 28 – умеренные разрушения, повреждения внутренних мало-прочных перегородок ( $\Delta P = 14$ кПа) ; 56 – малые повреждения зданий, разбито 10% стекол ( $\leq 2$ кПа).

**Примечание.** При выполнении инженерных расчетов радиусы зон разрушения определяются выражением

$$R = K \cdot \frac{\sqrt[3]{W_T}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{W_T}\right)^2\right]^{\frac{1}{6}}}, \text{ если общая приведенная масса паров } m \leq 5000 \text{ кг.}$$

Если  $m \geq 5000$  кг, то:  $R = K \cdot \sqrt[3]{W_T}$

*3.4.3. Расчет избыточного давления и импульса волны давления при взрывах конденсированных ВВ, сгорании смесей горючих газов и паров с воздухом, ЛВЖ и горючих жидкостей, горючих пылей.*

Воздушная ударная волна взрыва вызывает разрушения или повреждения зданий городской постройки, промышленных зданий и сооружений, систем электро-, газо- и водоснабжения, транспортных средств. Степень разрушения определяется мощностью взрыва, расстоянием до центра взрыва, характеристиками объекта, а также условиями взаимодействия с ним ударной волны.

Различают четыре степени разрушений зданий и объектов: полное, сильное, среднее и слабое. При полном разрушении обрушивается большая часть стен,

колонн и перекрытий. Сильное разрушение характеризуется частичным разрушением стен (колонн) и перекрытий. Легкие элементы (двери, перегородки, крыши) разрушаются полностью или частично. Среднее разрушение определяется тем, что основные ограждающие и несущие конструкции получают деформации (прогибы), а разрушаются, в основном, второстепенные конструкции. Слабое разрушение соответствует повреждению или серьезным деформациям отдельных легких элементов ограждения (окна, двери, крыши домов). Полное разрушение на сетях коммунально-энергетического хозяйства характеризуется выходом из строя значительных участков трубопроводов, разрывом кабеля, обрушением опор воздушных линий электропередач.

Результат воздействия ударной волны на различные конструкции зависит от давления на фронте волны  $\Delta P$  и импульса  $I$ , а также от жесткостных, массовых и прочностных параметров конструкций.

При воздушном взрыве ударная сферическая волна достигает земной поверхности и отражается от нее. В ближней зоне при умеренной высоте взрыва давление в ударной волне очень велико. Поэтому наибольший интерес представляют данные об ударной волне в дальней зоне.

Взрывы большинства конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) протекают в режиме детонации, при котором взрывная волна распространяется с постоянной скоростью при данной плотности и форме заряда. Значения скоростей детонации находятся в пределах от 1,5 км/с до 8 км/с; при этом давления взрывов достигают 20..38 ГПа.

Взрывные волны, генерируемые взрывами паро-газовых и дисперсных сред вследствие малой плотности и других особенностей процессов горения характеризуются более низкими параметрами.

При скорости распространения пламени, не превышающей скорости звука, возникают дефлаграционное, или взрывное горение, при котором продукты сгорания нагреваются до температур 1500... 3000 °С и

генерируются ударные волны с максимальным давлением 20...100 кПа. В ударную волну переходит 40% энергии взрыва.

В определенных условиях дефлаграционное горение может перейти в детонационный процесс, при котором скорость распространения пламени достигает 1...5 км/с. Избыточное давление в пределах детонирующего облака может достигать 2 МПа.

Изменение избыточного давления во фронте ударной волны, образующейся при взрыве сосуда со сжатым газом, при высоких давлениях и температурах подобно изменению этой величины в волне, генерируемой при взрыве конденсированного ВВ. Однако следует учитывать, что при взрыве сосуда со сжатым газом только 40..60% энергии тратится на образование ударной волны, а остальное – на разрушение сосуда и разлет осколков.

Особое внимание заслуживают сосуды с перегретыми жидкостями, при аварийной разгерметизации которых может произойти взрыв. При нарушении герметичности сосуда с перегретой жидкостью, сопровождающемся падением давления, происходит интенсивное испарение жидкости с образованием и воспламенением паров в окружающей среде и формированием ударных волн.

#### *3.4.3.1. Взрывы конденсированных ВВ*

Как уже говорилось выше при взрыве заряда конденсированного взрывчатого вещества (ВВ) в атмосфере возникают воздушные ударные волны, распространяющиеся с большой скоростью в виде области сжатия – разрежения со скачком на своем фронте давления, температуры, плотности и скорости частиц среды (массовой скорости). При взрывах компактного заряда ВВ произвольной формы на расстояниях, превышающих несколько его характерных размеров, эффективность действия ударной волны эквивалентна действию заряда сферической формы. Форма фронта волны также является сферической. Таким образом, форма заряда несущественно

сказывается на параметрах воздушной ударной волны на расстояниях от конструкций, представляющий практический интерес. Кроме того, масса заряда ВВ на этих расстояниях оказывается несущественной в сравнении с массой сферического объема воздуха (за фронтом ударной волны), вовлекаемого в движение. Эти обстоятельства привели к полезной абстракции, облегчающей постановку и решение задачи о расчете параметров ударных волн – схеме «точечного взрыва».

Характер воздушной ударной волны при наземном взрыве (за пределами воронки) соответствует дальней зоне воздушного взрыва. Как при воздушном, так и при наземном взрывах обычно рассматривают воздушную ударную волну, распространяющуюся от эпицентра с вертикальным фронтом. При подземном взрыве воздушная ударная волна ослабляется грунтовой средой. С момента прихода фронта воздушной ударной волны в точку на земной поверхности давление резко повышается до максимального значения, а затем убывает до атмосферного и ниже его. Избыточное давление в волне и скоростной напор являются важнейшими характеристиками ударной волны, определяющими эффект ее воздействия на сооружение. Основными параметрами, определяющими интенсивность ударной волны, являются избыточное давление на фронте  $\Delta P$  и длительность фазы сжатия. Эти параметры зависят от массы  $M$  заряда определенного типа (т.е. энергии взрыва), высоты  $H$ , условий взрыва и расстояния  $R$  от эпицентра.

Экспериментально установлено, что основные параметры ударной волны подчиняются законам подобия, т.е. если известны параметры на фронте ударной волны (давление, плотность, скорость частиц) заряда массой  $M_1$  на расстоянии  $R_1$ , а также временные параметры, тогда те же параметры на фронте ударной волны взрыва заряда с массой  $M_2$  будут на расстоянии  $R_2$ , причем это расстояние и временные параметры определяются по формулам (закон подобия кубического корня)

$$R_2 = R_1 \sqrt[3]{M_2 / M_1}, \quad \tau_2 = \tau_1 \sqrt[3]{M_2 / M_1}.$$

Если ввести величину

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{M}},$$

где  $M$  – тротильный эквивалент, кг, то закон подобия можно сформулировать как равенство параметров на фронте волны на равных «приведенных» расстояниях  $\bar{R}, \text{м}/\text{кг}^{1/3}$ .

Для воздушных взрывов на высоте  $H$ , м, для соблюдения подобия необходимо иметь также равенство «приведенных» высот

$$\bar{H} = \frac{H}{\sqrt[3]{M}}.$$

Важной характеристикой ударной волны является ее удельный импульс  $I$ , кПа · сек, определяемый по формуле

$$I = \int_0^{\tau} \Delta P(t) dt = A \cdot M^{2/3} / R, \quad A \approx 0,4,$$

где  $\Delta P(t)$  – функция, характеризующая изменение избыточного давления за фронтом ударной волны во времени.

Параметры воздушной ударной волны определяют по формулам М.А.Садовского, в которых вид взрывчатого вещества учитывается тротильным эквивалентом по ударной волне.

Давление  $\Delta P$ , МПа, для свободно распространяющейся воздушной сферической ударной волны определяют по формуле /28/:

$$\Delta P = \frac{0,084}{\bar{R}} + \frac{0,27}{\bar{R}^2} + \frac{0,7}{\bar{R}^3}. \quad (3.3)$$

Избыточное максимальное давление на поверхности земли при воздушном взрыве зависит от высоты взрыва  $H$ , однако, при взрывах на небольшой высоте и на расстояниях  $R > H$  (дальняя зона), максимум давления приближенно можно оценить по вышеприведенной формуле.

Скоростной напор на фронте ударной волны  $P_{\text{ск}}$  определяют по формуле:

$$P_{\text{ск}} = \frac{\rho v^2}{2} = \frac{\Delta P \cdot \Delta P'}{(\gamma - 1)\Delta P' + 2\gamma},$$

где  $\Delta P' = \Delta P / P_0$  ( $P_0 = 0,101325$  МПа);  $\gamma$  – показатель адиабаты;

$$\rho = \rho_0 \frac{1 + \Delta P'(\gamma + 1)/(2\gamma)}{1 + \Delta P'(\gamma - 1)/(2\gamma)} \quad (\rho_0 = 1,2249 \text{ кг/м}^3); \quad v = \frac{C_0 \Delta P'}{\gamma \sqrt{1 + \Delta P'(\gamma + 1)/(2\gamma)}}; \quad (C_0 -$$

скорость звука в атмосфере,  $v$  – скорость движения поршня, которая принимается во внимание при получении соотношений между параметрами на фронте ударной волны, получаемых при рассмотрении прямого скачка уплотнений).

Скорость распространения фронта ударной волны  $D$  и температура  $T_\phi$  на фронте ударной волны определяются

$$D = C_0 \sqrt{1 + \Delta P'(\gamma + 1)/(2\gamma)}; \quad T_\phi = T_0 (1 + \Delta P') / (\rho / \rho_0),$$

где  $T_0 = 288,16$  К.

Из уравнения изэнтропы отношение  $\rho / \rho_0$  можно определить как:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}}.$$

При давлениях  $\Delta P < 10$  МПа для воздуха  $\gamma = 1,4$  вышеприведенные формулы принимают вид:

$$v = \frac{5}{7} \cdot \frac{C_0 \cdot \Delta P'}{\sqrt{1 + 6/7 \cdot \Delta P'}}; \quad D = C_0 \sqrt{1 + 6/7 \cdot \Delta P'}; \quad \rho = \rho_0 \cdot \frac{(6\Delta P' + 7)}{(\Delta P' + 7)};$$

$$P_{\text{ск}} = \frac{5}{2} \cdot \frac{\Delta P \cdot \Delta P'}{(\Delta P' + 7)}; \quad T_\phi = T_0 \cdot \frac{(1 + \Delta P')(\Delta P' + 7)}{(6\Delta P' + 7)}; \quad I = 0,4 \cdot \frac{\sqrt[3]{M^2}}{R}.$$

Для условий взрыва в воздухе заряда бризантного ВВ в диапазоне больших давлений за пределами заряда давление на фронте взрывной волны определяется по формуле /13/:

$$\Delta P = \frac{3(\gamma - 1)}{2} \cdot \rho_0 \cdot Q \cdot \left( \frac{r_0}{R} \right)^3,$$

где  $r_0$  – радиус заряда,  $Q$  – теплота взрыва,  $\rho_0$  – плотность ВВ.

Принимая средние параметры для тротила и, подставляя выражение для радиуса заряда, приведенного к сфере,  $r_0 = \sqrt[3]{3M/(4\pi\rho_0)}$ , запишем формулу для давления, Па:

$$\Delta P = \frac{6,7 \cdot 10^5}{\bar{R}^3}, \quad \bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{M}}, (R \geq r_0).$$

Удельный импульс  $I$ , Па·сек, в диапазоне высоких параметров можно определить, используя соотношение для потока импульса на границе заряда радиуса  $r_0$ :

$$I = \frac{32}{27} \cdot \frac{\sqrt{M \cdot E}}{(4\pi r_0^2)}, \quad E = M \cdot Q.$$

На расстоянии  $R$  от центра взрыва следует учесть массу вовлекаемого в движение воздуха с плотностью  $\rho_B$ . Заменяя  $Q$  на скорость детонации  $Q \cong D^2/16$ , получим

$$I = \frac{2 \cdot M \cdot D}{27\pi R^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho_B}{\rho_0} \cdot \left( \frac{R^3}{r_0^3} - 1 \right)}.$$

Подставив значения  $\rho_B/\rho_0 = 1/1250$ , для зарядов тротила

$$I = 170 \cdot \frac{M}{R^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{1,25 \cdot 10^3} \left( \frac{R^3}{r_0^3} - 1 \right)} \quad (r_0 < R < 15r_0).$$

Для ВВ с плотностью  $\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$

$$I = 170 \cdot \frac{M}{R^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{1,25 \cdot 10^3} (6,702 \cdot 10^3 \cdot \bar{R}^3 - 1)} \quad (0,053 \leq \bar{R} < 0,8).$$

Для оценки возможных последствий воздействия ударной волны на объект давление, рассчитываемое по формулам, приведенным выше, корректируется с помощью коэффициентов  $K_1, K_2, K_3$ :

$$\Delta P^* = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \Delta P,$$

где  $K_1$  – коэффициент ориентации объекта на центр возможного взрыва (неблагоприятной считается ориентация наибольшей стены по нормали к направлению распространения ударной волны, рекомендуется брать  $K_1 \cong 1,1$ , благоприятной – при расположении стен под углом  $\approx 45^\circ$  ( $K_1 \cong 0,8$ ), для промежуточных положений объекта принимают  $K_1 = 1$ );  $K_2$  – коэффициент экранировки, учитывающий возможное затенение объекта соседними



сооружениями застройки (при расположении объекта на открытой территории, а также, когда расстояние до ближайшего строения превышает 50...70 м, коэффициент  $K_2 = 1$ , при наличии экранирующих построек, расположенных на линии распространения ударной волны на расстояниях менее 50 м, принимают значение коэффициента  $K_2 = 0,7...0,9$  в зависимости от степени затемнения);  $K_3$  – коэффициент перфорации, отражающий влияние проемности ( $\alpha$  – отношение площади остекления к полной поверхности стеновых ограждений). Для промышленных и гражданских зданий с проемами значение  $K_3$  принимают по таблице:

$\alpha$	0...0,3	0,3...0,5	0,5...0,7	>0,7
$K_3$	1,1	1	0,9	0,85

а для других объектов берется  $K_3 = 1$ .

#### 3.4.3.2. Взрывы газопаровоздушных смесей в открытом пространстве

Взрывы ГПВС и пылевоздушных смесей образуют класс объемных взрывов. Если взрывы пыли происходят в замкнутом объеме (помещении), то взрывы ГПВС могут происходить как в помещениях, так и в неограниченном пространстве.

Взрывы ГПВС в помещениях (зданиях) возникают в результате утечки газа из элементов оборудования. Взрывы ГПВС могут также возникать в емкостях (резервуарах, газгольдерах, цистернах, грузовых отсеках танкеров) для хранения и транспортировки взрыво- и пожароопасных веществ. Взрывы смесей горючих газов с воздухом с тяжелыми последствиями происходят на шахтах.

Взрывы ГПВС в неограниченном пространстве могут возникать в результате разрушений газопроводов, разлива сжиженного горючего газа, его испарения с переходом в детонацию. Известно большое число аварийных

взрывов резервуаров с большим количеством сжиженного горючего газа, сопровождаемых образованием осколочного поля.

В.Маршалл /1/ классифицировал вещества по признаку их расположения в зонах диаграммы состояния. К **1-ой категории** относятся вещества с критической температурой ниже температуры среды (криогенные вещества – сжиженный природный газ (СПГ) содержащий, в основном, метан, азот, кислород).

Ко **2-ой категории** отнесены вещества с критической температурой, а точкой кипения ниже, чем в окружающей среде (сжиженный нефтяной газ, пропан, бутан, аммиак, хлор). Их особенностью является «мгновенное» испарение части жидкости при разгерметизации и охлаждение оставшейся доли до точки кипения при атмосферном давлении.

**3 категорию** составляют жидкости, у которых критическое давление выше атмосферного и точка кипения выше температуры окружающей среды (вещества, находящиеся в обычных условиях в жидком состоянии). Сюда попадают также некоторые вещества предыдущей категории, например, бутан – в холодную погоду и этиленоксид – в жаркую.

**4 категория** – вещества, содержащиеся при повышенных температурах (водяной пар в котлах, циклогексан и другие жидкости под давлением и при температуре, превышающей их точку кипения при атмосферном давлении).

При разлинии жидкостей 3-ей категории их испарение зависит от свойства летучести, температуры внешней среды и скорости ветра.

При полном разрушении емкостей с криогенными жидкостями, веществами второй категории происходит их выброс в атмосферу, вскипание с быстрым испарением и образованием облаков ГПВС.

Аварийное вскрытие емкостей с горючей или негорючей перегретыми жидкостями сопровождается взрывом и опасным действием осколков.

Воспламенение облака ГПВС происходит при наличии источника зажигания. При этом возможен переход дозвукового дефлаграционного режима с ускоряющимся пламенем к детонационному, сверхзвуковому.

Огненный шар без детонации возникает обычно при горении ГПВС, переобогащенной топливом, а также в некоторых случаях – состава, близкого стехиометрическому.

Переходу к детонации способствуют различные препятствия (строения, предметы, пересеченная местность) на пути распространения пламени, вызывающие турбулизацию.

Сферическая детонационная волна может возникнуть и непосредственно в ГПВС от слабого энергетического источника, например, от искры, если размер облака превышает некоторое критическое значение.

Детонационную волну в газах представляют как ударную волну, сопровождаемую волной горения. В отличие от дефлаграционного, данный процесс связан с разогревом газа ударной волной до температуры, обеспечивающей высокую скорость реакции и скорость распространения пламени со скоростью ударной волны. Учитывая высокую скорость детонации (тысячи метров в секунду) сформировавшееся при быстром испарении облако ГПВС в целях расчета считают неизменным за весь период распространения фронта волны до внешней границы облака, схематизируемого полусферой радиуса  $r_0$  с центром на поверхности грунта, совмещенного с источником инициирования. Давление на фронте детонационной волны в газовых смесях может достигать 2 МПа, а при взаимодействии с конструкциями в помещениях вследствие многократных отражений – доходить до 10 МПа.

Параметры детонационной волны в процессе распространения в пределах облака существенно не меняются. При выходе за пределы границы облака расширяющиеся продукты детонации (ПД) возбуждают воздушную ударную волну.

Для расчета поражающего действия взрывов ГПВС определяют параметры детонационной волны расширяющихся ПД и воздушной ударной волны.

Начальный радиус  $r_0$ , м, полусферического облака ГПВС в зависимости от его объема  $V_0, \text{м}^3$ , определяют по формуле

$$r_0 = \sqrt[3]{3V_0 / (2\pi)}.$$

Поскольку 1 кмоль  $\mu_r$  идеального газа занимает объем  $V_a = 22,4 \text{м}^3$ , для газовой смеси стехиометрического состава с объемной концентрацией  $C_{ст}$  и молекулярной массой  $\mu_r$  горючей компоненты массы  $C_B$  можно записать приближенную формулу для определения объема облака:

$$V_0 = V_a \nu C_B / (\mu_r C_{ст}).$$

Значение коэффициента  $\nu$  принимают в зависимости от способа хранения продукта:  $\nu = 1$  - для газов при атмосферном давлении;  $\nu = 0,5$  - для газов, сжиженных под давлением;  $0,1$  - для газов, сжиженных охлаждением;  $0,02 \dots 0,07$  - при растекании ЛВЖ..

При взрыве детонационная волна распространяется со скоростью  $D$ , м/с:

$$D = \sqrt{2(\gamma^2 - 1)Q_m},$$

где  $Q_m$  - теплота взрыва, Дж/кг.

Время полной детонации облака  $t_B$ , с, равно

$$t_B = r_0 / D.$$

Максимум избыточного давления на фронте детонационной волны (химический пик)

$$\Delta P_1 = 4(\gamma - 1)Q_m \rho_{ст} - P_0.$$

Через весьма малый интервал времени давление в детонационной волне (избыточное давление детонационной волны) уменьшается в два раза (точка Жуге)

$$\Delta P_2 = 2(\gamma - 1)Q_m \rho_{ст} - P_0 = \rho_{ст} \frac{D^2}{(\gamma + 1)} - P_0.$$

Характеристики распространенных газо- и паровоздушных смесей приведены в табл. 3.9.

Табл.3.9. Характеристики газопаровоздушных смесей

Горючий компонент	D, м/с	$\rho_{стx}$ , кг/м <sup>3</sup>	$Q_{m,стx}$ , МДж/кг	$Q_{V,стx}$ , МДж/м <sup>3</sup>	$\gamma_{стx}$	$\mu_T$	$C_{стx}$ , об.%	$\Delta P_2$ , МПа
Газовоздушные смеси								
Аммиак $CH_3$	1630	1,180	2,370	2,791	1,248	17	19,72	1,29
Ацетилен $C_2H_2$	1990	1,278	3,387	4,329	1,259	26	7,75	2,14
Бутан $C_4H_{10}$	1840	1,328	2,776	3,684	1,270	58	3,13	1,88
Бутилен $C_4H_8$	1840	1,329	2,892	3,843	1,260	56	3,38	1,89
Винилхлорид $C_2H_3Cl$	1710	1,400	2,483	3,980	1,260	63	7,75	1,71
Водород $H_2$	1770	0,933	3,425	3,195	1,248	2	29,59	1,20
Дивинил $C_4H_6$	1870	1,330	2,962	3,967	1,260	54	3,68	1,96
Метан $CH_4$	1750	1,232	2,763	3,404	1,256	16	9,45	1,57
Окись углерода CO	1840	1,280	2,930	3,750	1,256	28	29,59	1,82
Пропан $C_3H_8$	1850	1,315	2,801	3,676	1,257	44	4,03	1,89
Пропилен $C_3H_6$	1840	1,314	2,922	3,839	1,259	42	4,46	1,87
Этан $C_2H_6$	1800	1,250	2,797	3,496	1,257	30	5,66	1,69
Этилен $C_2H_4$	1880	1,285	3,010	3,869	1,259	28	6,54	1,91
Паровоздушные смеси								
Ацетон $C_3H_6O$	1910	1,210	3,112	3,766	1,259	42	4,99	1,85
Бензин авиационный	-	1,350	2,973	3,770	-	94	2,10	-
Бензол $C_6H_6$	1860	1,350	2,937	3,966	1,261	78	2,84	1,96
Гексан $C_6H_{14}$	1820	1,340	2,797	3,748	1,261	86	2,16	1,86
Дихлорэтан $C_2H_4Cl_2$	1610	1,490	2,164	3,224	1,265	99	6,54	1,60
Диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$	1830	1,360	2,840	3,862	1,261	74	3,38	1,91
Ксилол $C_6H_{10}$	1820	1,355	2,830	3,834	1,259	106	1,96	1,89
Метанол $CH_4O$	1800	1,300	2,843	3,696	1,253	32	12,30	1,77
Пентан $C_5H_{12}$	1810	1,340	2,797	3,748	1,258	72	2,56	1,84
Толуол $C_7H_8$	1830	1,350	2,843	3,838	1,260	92	2,23	1,90
Циклогексан $C_6H_{12}$	1770	1,340	2,797	3,748	1,248	84	2,28	1,77
Этанол $C_2H_6O$	1770	1,340	2,804	3,757	1,256	46	6,54	1,76

В таблице 3.9 приняты следующие обозначения:  $\Delta P_2$  – избыточное давление детонационной волны (эффективное давление),  $\gamma_{стx}$  – показатель адиабаты

продуктов детонации,  $\rho_{\text{стх}}$  – плотность,  $Q_{\text{м,стх}}, Q_{\text{в,стх}}$  – теплота взрыва единицы массы и единицы объема смеси, ”стх” – стехиометрический состав.

Параметры ударной волны на расстояниях, превышающих начальный размер облака  $R \geq r_0$ , м, определяются по формулам, аппроксимирующим численное решение задачи о детонации пропано-воздушной смеси. Решение получено интегрированием системы нестационарных уравнений газовой динамики в сферических координатах в переменных Лагранжа. Используются достаточно реалистичные уравнения состояния исходной смеси, продуктов детонации, и соотношения для скорости реагирования смеси в зоне реакции.

Полученные универсальные зависимости максимума эффективного избыточного давления  $\Delta P_m$ , Па, и удельного импульса  $I$ , Па·с, в ударных волнах от расстояния  $R$  до центра взрыва в энергетических координатах удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными для горючих смесей углеводородов с воздухом или кислородом, независимо от состава смеси /28/:

$$\Delta P_m = P_0 \cdot \bar{P}, \quad \lg \bar{P} = 0,65 - 2,18 \lg \bar{R} + 0,52 (\lg \bar{R})^2, \quad \bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{m_T}},$$

$$I = \bar{I} \cdot \sqrt[3]{m_T}, \quad \lg \bar{I} = 2,11 - 0,971 \lg \bar{R} + 0,44 (\lg \bar{R})^2.$$

Здесь  $m_T$  – тротильный эквивалент наземного взрыва полусферического облака ГПВС, кг,  $m_T = 2 \cdot m \cdot \frac{Q_m}{Q_T}$ ,  $m = \rho_{\text{ст}} V_0$ , где  $m$  – масса горючего облака, кг;  $Q_T$  – теплота взрыва тротила (принимается  $4,184 \cdot 10^6$  Дж / кг);  $\rho_{\text{ст}}$  – плотность;  $P_0$  – атмосферное давление, Па.

Для сшивания параметров на границе облака величина  $r_0$  заменяется на близкое значение  $R_0$ , определяемое из условия непрерывности функции  $\Delta P_m(R)$  в точке  $R=R_0$ :

$$R_0 = 10^\alpha \sqrt[3]{m_T}, \quad \alpha = k_1 - \sqrt{k_1^2 - A}, \quad k_1 = 1,09 / 0,52, \quad A = 1,25 - \frac{\lg(\Delta P_2 / P_0)}{0,52}.$$

Значение импульса при  $R \leq R_0$  принимается равным  $I(R_0)$  из  $I = \bar{I} \cdot \sqrt[3]{m_T}$ .

Эффективное время  $\theta$ , с, действия фазы сжатия ударной волны с давлением, аппроксимируемым треугольником  $\Delta P(t) = \Delta P_m (1 - t/\theta)$ , определяется по формуле

$$\theta = \frac{2I}{\Delta P_m}$$

**Пример 3.1.** Взрыв облака парогазовоздушной смеси, образованного при разрушении резервуара с 1000т сжиженного пропана.

Исходные данные:

$$V_a := 22.4 \quad v := 0.5 \quad C_g := 10^6 \quad \mu_g := 44 \quad \gamma := 1.257 \quad C_{ctx} := 0.0403$$

$$\rho_{ctx} := 1.315 \quad P_0 := 1.013 \cdot 10^5 \quad Q_m := 2.801 \cdot 10^6 \quad Q_t := 4.184 \cdot 10^6$$

Объем облака, начальный радиус  $r_0$ , м, полусферического облака:

$$V_0 := \frac{V_a \cdot v \cdot C_g}{(\mu_g \cdot C_{ctx})} \quad V_0 = 6.316 \times 10^6 \quad \text{м}^3 \quad r_0 := \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_0}{2 \cdot \pi}} \quad r_0 = 144.478$$

**Параметры детонационной волны.**

Скорость распространения волны D:

$$D := \sqrt{2 \cdot (\gamma^2 - 1) \cdot Q_m} \quad D = 1.803 \times 10^3$$

Избыточное давление детонационной волны:

$$\Delta P_2 := \frac{\rho_{ctx} \cdot D^2}{(\gamma + 1)} - P_0 \quad \Delta P_2 = 1.792 \times 10^6$$

Масса газового облака, кг:

$$m := \rho_{ctx} \cdot V_0 \quad m = 8.306 \times 10^6$$

Тропиловый эквивалент наземного взрыва полусферического облака, кг:

$$m_t := 2 \cdot m \cdot \frac{Q_m}{Q_t} \quad m_t = 1.112 \times 10^7$$

Параметры ударной волны при  $R > r_0$ :

$$k_1 := \frac{1.09}{0.52} \quad k_1 = 2.096 \quad A := 1.25 - \frac{\ln\left(\frac{\Delta P_2}{P_0}\right)}{\ln(10) \cdot 0.52} \quad A = -1.149$$

$$\alpha := k_1 - \sqrt{k_1^2 - A} \quad \alpha = -0.258 \quad R_0 := 10^\alpha \cdot \sqrt[3]{m t} \quad R_0 = 123.153$$

Изменение давления взрыва ГПВС с расстоянием, Па:

$$r := 150..1000$$

$$RR(r) := \frac{r}{\sqrt[3]{m t}} \quad y(r) := \frac{\ln(RR(r))}{\ln(10)} \quad y_1(r) := 0.65 - 2.18 \cdot y(r) + 0.52 \cdot y(r)^2$$

$$P(r) := 10^{y_1(r)} \quad \Delta P_m(r) := P_0 \cdot P(r)$$

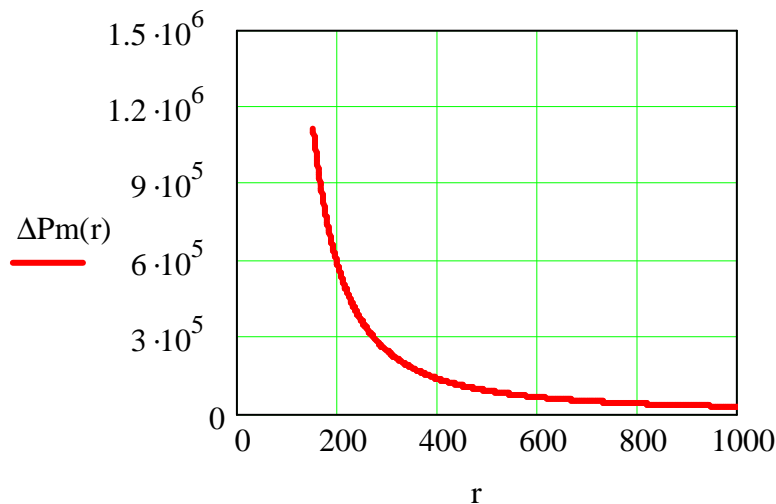


Рис.3.2. Зависимость избыточного давления (Па) от расстояния при взрыве облака ГПВС при разливе 1000т сжиженного пропана

Изменение импульса взрыва ГПВС с расстоянием, Па · с:

$$y_2(r) := 2.11 - 0.97 \cdot y(r) + 0.04 \cdot y(r)^2 \quad I(r) := 10^{y_2(r)} \quad \Pi(r) := I(r) \cdot \sqrt[3]{m t}$$



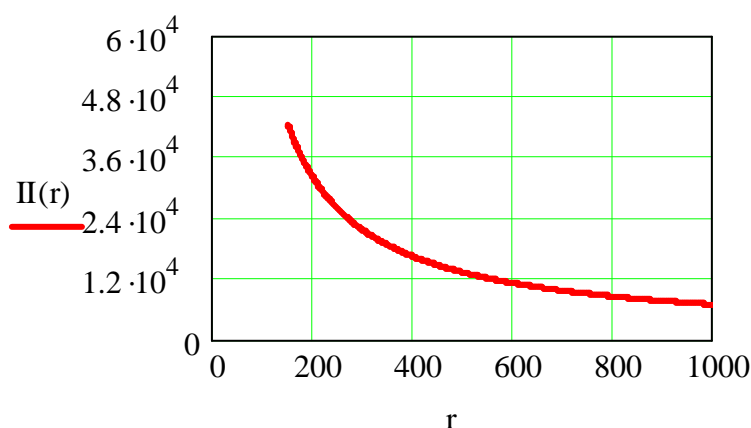


Рис.3.3. Зависимость удельного импульса давления (Па · с) от расстояния при взрыве облака ГПВС при разливе 1000т сжиженного пропана

Расчет избыточного давления и импульса волны давления при **сгорании** смесей горючих газов и паров с воздухом в открытом пространстве производят следующим образом /50/. Исходя из сценария аварии, определяется масса  $m$  (кг) горючих газов и (или) паров (см. ниже), вышедших в атмосферу из технологического аппарата. Величина избыточного давления  $\Delta P$ , кПа, развиваемого при сгорании газопаровоздушных смесей может определяться как:

$$\Delta P = P_0 \cdot \left( 0,8 \cdot \frac{m_{np}^{0,33}}{r} + 3 \cdot \frac{m_{np}^{0,66}}{r^2} + 5 \cdot \frac{m_{np}}{r^3} \right), \quad (3.5)$$

где  $P_0$  – атмосферное давление, кПа (101 кПа);  $r$  – расстояние от геометрического центра газопаровоздушного облака, м;  $m_{np}$  – приведенная масса газа или пара.

Приведенная масса газа или пара (кг) определяется по формуле:

$$m_{np} = \frac{Q_{cr}}{Q_0} \cdot m \cdot z,$$

где  $Q_0$  – константа, равная  $4,52 \cdot 10^6$  Дж/кг;  $Q_{cr}$  – удельная теплота сгорания газа или пара, Дж/кг;  $m$  – масса горючих газов или паров, поступивших в результате аварии в окружающее пространство;  $z$  – коэффициент участия

горючих газов и паров в горении, который принимается равным 0,1 для открытого и 0,3 для замкнутого пространства.

Избыточное давление взрыва  $\Delta P$ , кПа, для **индивидуальных горючих веществ**, состоящих из атомов С, Н, О, N, Cl, Br, I, F, определяется по формуле:

$$\Delta P = (P_{\max} - P_0) \cdot \frac{m \cdot Z \cdot 100}{V_{\text{СВ}} \cdot \rho_{\text{г}} \cdot c_{\text{ст}} \cdot K_{\text{Н}}} \quad \text{или} \quad \Delta P = \Delta P_{\text{м}} \cdot \frac{m \cdot Z \cdot 100}{V_{\text{СВ}} \cdot \rho_{\text{г}} \cdot c_{\text{ст}} \cdot K_{\text{Н}}}$$

где  $P_{\max}$  – максимальное давление взрыва стехиометрической газозвушной или парозвушной смеси в замкнутом объеме, определяемое экспериментально или по справочным данным в соответствии с требованиями п.1.4., при отсутствии данных допускается принимать  $P_{\max} = 900$ кПа;  $P_0$  – начальное давление, кПа (101 кПа);  $V_{\text{СВ}}$  – свободный объем помещения, м<sup>3</sup>, за вычетом объема, занимаемого технологическим оборудованием (допускается принимать 80% от полного объема);  $m$  – масса горючего газа (ГГ) или паров ЛВЖ и горючих жидкостей (ГЖ), вышедших в результате расчетной аварии в помещение, вычисляемая для ГГ по формуле

$$m = (V_{\text{а}} + V_{\text{т}}) \cdot \rho_{\text{г}},$$

а для паров ЛВЖ и ГЖ по формуле

$$m = m_{\text{п}} + m_{\text{откр.}} + m_{\text{сост.}} + m_{\text{пер.}}, \text{ кг};$$

$Z$  – коэффициент участия горючего во взрыве, который может быть рассчитан на основе характера распределения газов и паров в объеме помещения согласно приложению ( $Z=0,5$  – для горючих газов,  $Z=0,3$  – для паров горючих и ЛВЖ, а для свободного объема – 80% полного объема помещения);  $K_{\text{Н}}$  – коэффициент учета негерметичности помещения и неадиабатичности процесса горения, при отсутствии данных можно принимать равным 3);  $\rho_{\text{г}}$  – плотность газа или пара при расчетной температуре  $t_{\text{п}}$ , кг / м<sup>3</sup>, вычисляемая по формуле:

$$\rho_{\text{г}} = \frac{M}{V_0(1 + 0,00367 \cdot t_{\text{п}})},$$

где  $M$  – молекулярная масса, кг/кмоль;  $V_0$  – мольный объем равный 22,413 м<sup>3</sup>/кмоль;  $t_p$  – расчетная температура, °С, в качестве расчетной температуры следует принимать максимально возможную температуру воздуха в данном помещении в соответствующей климатической зоне или максимально возможную температуру воздуха по технологическому регламенту с учетом возможного повышения температуры в аварийной ситуации. Если такого значения расчетной температуры  $t_p$  по каким-либо причинам определить не удастся, допускается принимать ее равной 61°С;  $c_{ст}$  – стехиометрическая концентрация ГГ или паров ЛВЖ и ГЖ, % (об.), вычисляемая по формуле:

$$c_{ст} = \frac{100}{1 + 4,84\beta},$$

где  $\beta = n_c + \frac{n_H - n_X}{4} - \frac{n_O}{2}$  – стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания;  $n_c, n_H, n_O, n_X$  – число атомов С, Н, О и галоидов в молекуле горючего.

Масса горючего газа, поступившего при аварии в производственное помещение, определяется как суммарная масса газа, вышедшего из аппарата и трубопровода по формуле

$$m = \rho_3 \left[ 0,01P_1V + qt_p + 0,01\pi P_2 \sum_{i=1}^n (r_i^2 l_i) \right],$$

где  $P_1$  – давление в аппарате, кПа;  $V$  – объем аппарата, м<sup>3</sup>;  $q$  – расход газа, определяемый в соответствии с технологическим регламентом в зависимости от давления в трубопроводе, его диаметра, температуры газовой среды, м<sup>3</sup>/с;  $t_p$  – расчетное время отключения аварийного участка трубопровода, с;  $P_2$  – максимальное давление в трубопроводе по технологическому регламенту, кПа;  $r_i$  – внутренний радиус  $i$  – го участка трубопровода, м;  $l_i$  – длина  $i$  – го участка трубопровода от аварийного аппарата до задвижек, м.

Расчет избыточного давления и импульса в ударной волне, образующейся при взрыве резервуара с перегретой ЛВЖ (ГЖ) в очаге пожара, проводится

по вышеприведенным формулам, при этом приведенная масса  $m_{пр}$  определяется соотношением

$$m_{пр} = E_{эфф} / H_0,$$

где  $E_{эфф}$  – эффективная энергия взрыва, определяемая по формуле

$$E_{эфф} = C_{эфф} m (T_{ж} - T_{кип}),$$

где  $C_{эфф}$  – константа, равная 500 Дж/(кг·К);  $m$  – масса ЛВЖ (ГЖ), содержащейся в резервуаре, кг;  $T_{ж}$  – температура жидкой фазы ЛВЖ (ГЖ), содержащейся в резервуаре, К;  $T_{кип}$  – нормальная температура кипения ЛВЖ (ГЖ), К;  $H_0$  – константа, равная  $4,6 \cdot 10^4$  кДж/кг.

При наличии в резервуаре предохранительного устройства (клапана или мембраны) величина  $T_{ж}$  определяется по формуле

$$T_{ж} = \frac{B}{A - \lg P_{пр}} - C + 273,15,$$

где  $P_{пр}$  – давление срабатывания предохранительного устройства или давление разрушения резервуара;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – константы уравнения зависимости давления насыщенных паров топлива от температуры (константы Антуана), определяемые по справочной литературе. Например, для бензина А-72 (зимний) они равны  $A=5,07020$ ,  $B=682,876$ ,  $C=222,066$ ; для бензина АИ – 93 (летний) –  $A=4,99831$ ,  $B=664,976$ ,  $C=221,066$ ; для АИ-93 (зимний)  $A=5,14031$ ,  $B=695,019$ ,  $C=223,220$ .

Расчет  $\Delta P$ , кПа, для индивидуальных веществ, кроме упомянутых выше, а также газоздушных смесей в помещениях от испарения выброса сжиженного газа при аварийном вскрытии емкости можно определить с учетом негерметичности помещений по формуле

$$\Delta P = \frac{m \cdot H_T \cdot P_0 \cdot Z}{V_{св} \rho_B c_p T_0 \cdot K_H}, \quad (3.6)$$

где  $H_T$  – теплота сгорания, Дж/кг;  $\rho_B$  – плотность воздуха до взрыва при начальной температуре  $T_0$ , кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – удельная теплоемкость воздуха,

Дж/(кг · К), допускается принимать равной  $1,01 \cdot 10^3$  Дж/(кг · К);  $T_0$  – начальная температура воздуха, К.

При взрывах гибридных смесей, содержащих газы или пары и пыль, давление  $\Delta P$  определяют суммой давлений  $\Delta P_1$  - для газа (пара) и  $\Delta P_2$  – для пыли, вычисляемых по формуле (3.6),  $\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2$ .

**Пример.3.2.** В емкости 21,5 м<sup>3</sup> находится бензин. Для оценки максимально возможных последствий принято, что в результате разгерметизации весь бензин вылился и произошел взрыв паров бензина. Требуется определить параметры воздушной ударной волны (избыточное давление и импульс фазы сжатия) на различных расстояниях от места аварии.

Исходные данные: Объем пролива  $V$ , м<sup>3</sup>; удельная теплота сгорания жидкости,  $q$ , кДж/кг; доля приведенной массы парогазовых веществ, участвующих во взрыве,  $z$  ( $z = 0.1$  для ЛВЖ и горючих жидкостей в открытом пространстве);  $m$  – масса парогазовой фазы (определяется по таблице 3.7); высота слоя жидкости, пролитой на естественный грунт,  $h$ , м; удельная энергия взрыва ТНТ,  $q_t$ , кДж/кг;  $K$  - безразмерный коэффициент, характеризующий воздействие взрыва на объект ( $K=3.8$  -1-я зона разрушения;  $K=5.6$  -2-я зона разрушения;  $K=9.6$  -3-я зона разрушения;  $K=28.0$  - 4-я зона разрушения;  $K=56.0$  -5-я зона разрушения).

Расчет взрыва ПГВС над проливом.

$$V := 21.5 \quad z := 0.1 \quad h := 0.05 \quad m := 5 \quad q_t := 4520 \quad q := 44000$$

1. Общий энергетический потенциал равен, кДж:

$$E := \frac{V}{50 \cdot h} \cdot m \cdot \frac{3600}{180} \cdot q \quad E = 3.784 \times 10^7$$

2. Относительный энергетический потенциал равен:

$$Q_b := \frac{\sqrt[3]{E}}{16.534} \quad Q_b = 20.305$$

3. Общая приведенная масса паров равна, кг:

$$m_p := \frac{E}{46000} \quad m_p = 822.609$$

4. Величина тротилового эквивалента равна, кг:

$$W_t := \frac{0.4 \cdot q}{0.9 \cdot q_t} \cdot z \cdot m_p \quad W_t = 355.898$$

5. Расчет радиусов зон разрушения, м:

$$R_0 := \frac{\sqrt[3]{W_t}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{W_t}\right)^2\right]^{\frac{1}{6}}} \quad R_0 = 3.408 \quad R := K \cdot R_0$$

1-я зона разрушения:

$$R_1 := 3.8 \cdot R_0 \quad R_1 = 12.951$$

2-я зона разрушения:

$$R_1 := 3.8 \cdot R_0 \quad R_1 = 12.951$$

3-я зона разрушения:

$$R_3 := 9.6 \cdot R_0 \quad R_3 = 32.717$$

4-я зона разрушения:

$$R_4 := 28.0 \cdot R_0 \quad R_4 = 95.426$$

5-я зона разрушения:

$$R_5 := 56.0 \cdot R_0 \quad R_5 = 190.851$$

Величина избыточного давления, кПа:

$$r := 10..200 \quad P_0 := 101 \quad \Delta P_m(r) := P_0 \cdot \left(0.8 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_p}}{r} + 3 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_p}}{r^2} + 5 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_p}}{r^3}\right)$$

Величина удельного импульса, Па · с:

$$I(r) := 123 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_p^2}}{r}$$

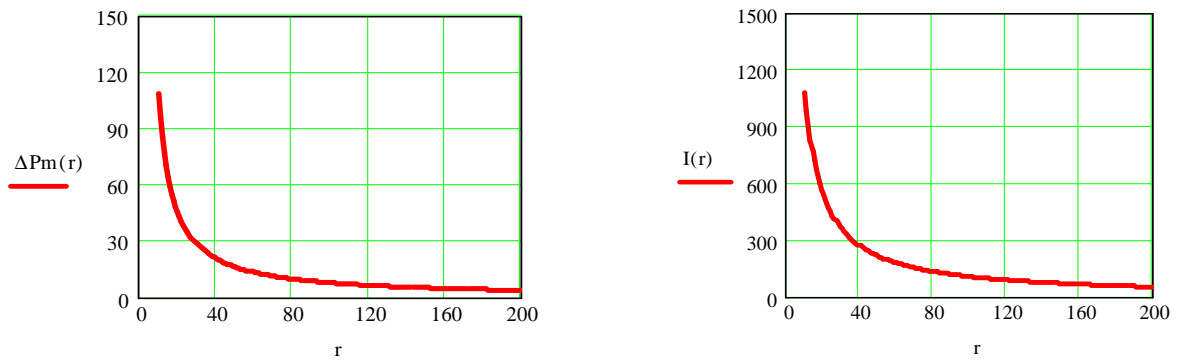


Рис.3.4. Зависимости избыточного давления  $\Delta P_m$  (кПа) и удельного импульса  $I$  (Па · с) от расстояния (м) при взрыве паров бензина

Ниже представлены графические зависимости вероятностей разрушений промышленных зданий, при которых здания подлежат сносу, и вероятности разрыва барабанных перепонок и отброса людей волной давления (все вероятности рассчитываются по формуле (3.1) и через пробит-функции раздела 3.2.2.):

$$V_2(r) := \left( \frac{40000}{\Delta P_m(r) \cdot 1000} \right)^{7.4} + \left( \frac{460}{I(r)} \right)^{11.3} \quad Pr_2(r) := 5 - 0.22 \cdot \ln(V_2(r))$$

$$P_{por2}(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr_2(r)-5} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

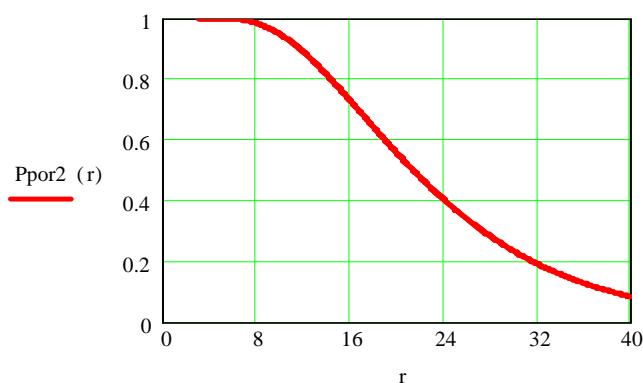


Рис.3.5. Вероятность сильного разрушения зданий и сооружений от расстояния  $r$  (м) при взрыве паров бензина

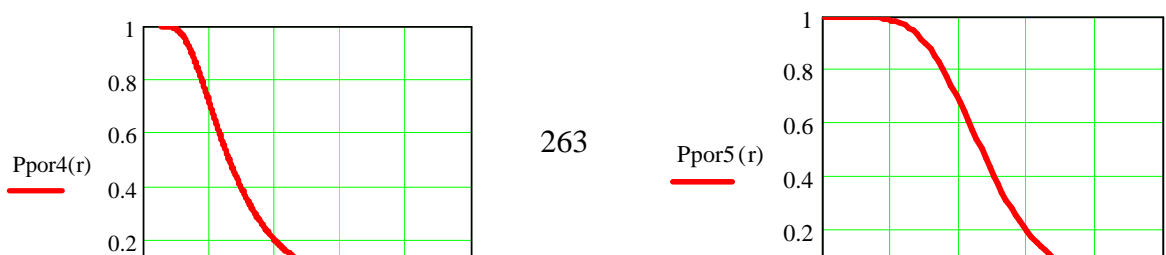


Рис.3.6. Вероятности разрыва барабанных перепонок и отброса людей волной давления б) в зависимости от расстояния

Территориальный риск и индивидуальный риск вычисляются по соотношениям:

$$Rt2(r) := Ppor2(r) \cdot Pck \cdot Plwg$$

$$Ri2(r) := Rt2(r) \cdot Pn$$

$Pck$  – вероятность возникновения аварии, равная  $2,52 \cdot 10^{-5}$  (см. пример 2.6);  $Plwg$  – вероятность взрыва паров ЛВЖ /66/ (см. табл.2.6), равная 0,00076;  $Pn$  – вероятность нахождения человека в данной точке пространства (см. пример 2.12).

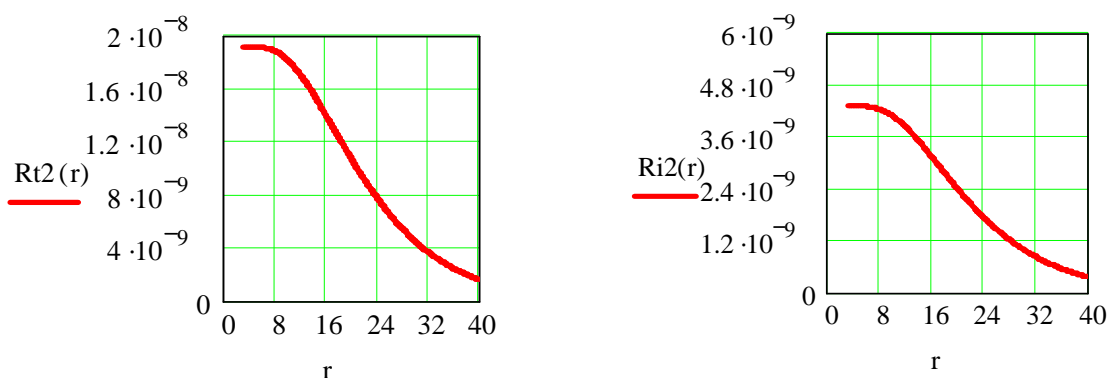


Рис.3.7. Зависимости территориального и индивидуального рисков от расстояния при взрыве паров бензина

### 3.4.3.3. Газо-паровоздушные смеси и пыли в ограниченном пространстве



При оценке последствий взрывов газо- и паровоздушных смесей соотношения между параметрами смесей описывают с помощью уравнений идеального газа

$$P = \rho R_{\Gamma} T,$$

где  $R_{\Gamma} = R / \mu$  - универсальная газовая постоянная, Дж/(кг · К);  
 $R = 8,314$  кДж/(кг · моль · К) – универсальная газовая постоянная;  
 $\mu$  – килограмм-моль газа – величина, численно равная его молекулярной массе;  $T$  – абсолютная температура, К.

При использовании этого уравнения для описания реальных газов следует иметь ввиду ограничение газообразного состояния среды: плотность  $\rho$  не должна превышать значения плотности насыщенных паров газа при данной температуре  $T$ . Газовая постоянная определяется разностью теплоемкостей газа при постоянном давлении и объеме  $R_{\Gamma} = C_p - C_v$ , т.е.

$$R_{\Gamma} = C_v (\gamma - 1), \quad \gamma = C_p / C_v.$$

Например, для кислорода – двухатомного газа  $\mu = 2 \cdot 16 = 32$  при  $\rho = 1,352$  кг/м<sup>3</sup>,  $\gamma = 1,4$ ,  $R_{\Gamma} = 8,314 / 32 = 0,26$  кДж/(кг · К), и теплоемкости газа при постоянном объеме

$$C_v = R_{\Gamma} / (\gamma - 1) = 0,26 / 0,4 = 0,65$$
 кДж/(кг · К).

При взрывах газовых смесей в оболочках (контейнерах) для продуктов детонации малой плотности скорость детонации равна /29/:

$$D = \sqrt{2(\gamma^2 - 1)Q_m}.$$

Учитывая, что вся энергия расходуется на разлет осколков, можно записать:

$$\frac{mV_0}{2} = C \cdot Q_m,$$

где  $C$  – масса заряда ВВ,  $Q_m$  – теплота взрыва,  $m$  – масса оболочки.

Тогда начальная скорость осколков в момент максимального разгона будет равна:

$$V_0 = \sqrt{2 \cdot \beta \cdot Q_m}, \quad \beta = \frac{C}{m}.$$

При взрыве емкости под внутренним давлением  $P$  инертного газа (смеси газов) с плотностью  $\rho$  скорость  $V_0$  может быть определена по вышеприведенной формуле при подстановке в нее вместо теплоты взрыва значения удельной энергии газа  $Q$ , сжатого избыточным давлением  $\Delta P = P - P_0$ :

$$Q = \frac{\Delta P}{[\rho(\gamma - 1)]}. \quad (3.6)$$

Если в емкости содержится взрывоопасный газ под давлением, начальную скорость  $V_0$  можно найти по формуле:

$$V_0 = \sqrt{2 \cdot \beta \cdot \left[ Q_m + \frac{\Delta P}{\rho(\gamma - 1)} \right]}.$$

Плотность определяется из уравнения изэнтропы:

$$\frac{P}{P_0} = \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma.$$

Троитиловый эквивалент взрыва заряда конденсированного ВВ оценивают по формуле:

$$q_{\text{тнт}} = \frac{Q_m \cdot C}{Q_{\text{тнт}}}.$$

В случае сжатого инертного газа величина  $Q_m$  в последнем выражении заменяется на  $Q$  по формуле (3.6), а для сжатого взрывоопасного газа вычисляется по формуле

$$Q = Q_m + \frac{\Delta P}{[\rho(\gamma - 1)]}.$$

**Пример 3.3.** Оценка параметров аварийного взрыва газгольдера со сжатым воздухом. В стальном сферическом газгольдере высокого давления объемом  $600 \text{ м}^3$  со сжатым воздухом, не имеющим средства сброса давления, в результате сверхнормативного поступления воздуха давление значительно превысило расчетное рабочее давление (0,8 МПа), вследствие

чего произошло взрывное разрушение оболочки. Параметры оболочки: радиус  $r = 5,25\text{ м}$ , толщина стенки  $d = 16\text{ мм}$ .

Напряжение в стенке сферической оболочки определяется по формуле:  $\sigma = \Delta P \cdot r / (2d)$ . Разрушающее давление можно вычислить, подставив значение нормативного сопротивления стали, равного 470 МПа. Ниже представлены результаты расчета в Mathcad.

Исходные данные:

$$r := 5.25 \quad d := 0.016 \quad \sigma := 470 \quad \rho_0 := 1.225 \quad P_0 := 0.1 \quad \gamma := 1.4 \quad N := 4 \\ g := 9.81 \quad Q_t := 4.24 \cdot 10^6$$

1. Разрушающее давление:

$$\Delta P := \frac{2 \cdot d \cdot \sigma}{r} \quad \Delta P = 2.865$$

Поверхность сферы и объем газгольдера:

$$S := 4 \cdot \pi \cdot r^2 \quad S = 346.361 \quad V := \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \quad V = 606.131$$

Масса оболочки при плотности металла  $\rho_1 = 7800$ :

$$\rho_1 := 7800 \quad m := S \cdot d \cdot \rho_1 \quad m = 4.323 \times 10^4$$

Давление в газгольдере, МПа:

$$P := \Delta P + P_0 \quad P = 2.965$$

Плотность воздуха в газгольдере находят из уравнения изэнтропы:

$$\rho := \rho_0 \cdot \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad \rho = 13.79$$

Полная масса газа, кг:

$$C := \rho \cdot V \quad C = 8.358 \times 10^3$$

Отношение масс сжатого воздуха и металла оболочки:

$$\beta := \frac{C}{m} \quad \beta = 0.193$$

Удельная энергия газа, Дж/кг:

$$Q := \frac{\Delta P \cdot 10^6}{\rho \cdot (\gamma - 1)} \quad Q = 5.194 \times 10^5$$

Начальная скорость осколков оболочки, м/сек:

$$V_0 := \sqrt{2 \cdot \beta \cdot Q} \quad V_0 = 448.168$$

Ориентировочно дальность полета осколков:

$$R_p := 2 \cdot V_0 \cdot \sqrt{\frac{H}{g}} \quad R_p = 572.356$$

Тропиловый эквивалент взрыва газгольдера, кг:

$$q := \frac{Q \cdot C}{Q_t} \quad q = 1.024 \times 10^3$$

Избыточное давление  $\Delta P_f$ , МПа, на фронте ударной волны на расстоянии R:

$$R := 5, 5.05 \dots 100 \quad RR(R) := \frac{R}{\sqrt[3]{q}} \quad \Delta P_f(R) := \frac{0.084}{RR(R)} + \frac{0.27}{RR(R)^2} + \frac{0.7}{RR(R)^3}$$

Величина удельного импульса, кПа\*с:

$$I(R) := \frac{0.4 \cdot \sqrt[3]{q^2}}{R}$$

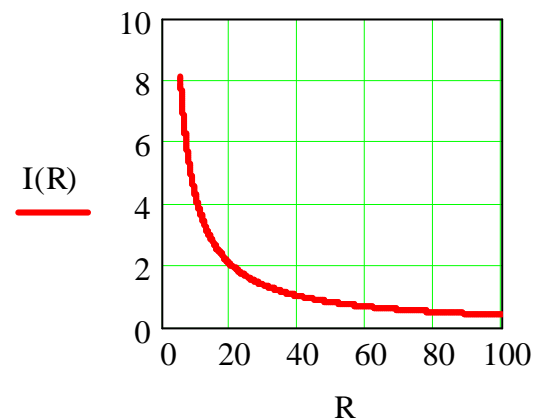
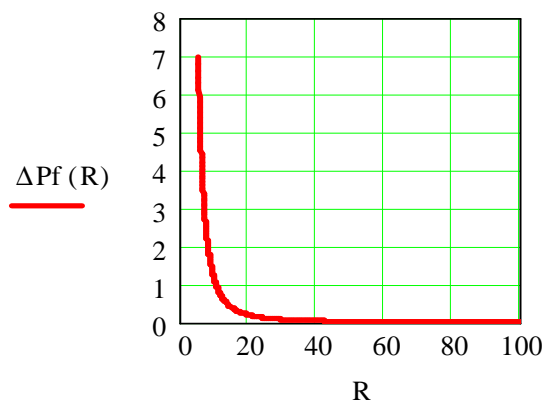


Рис.3.8. Избыточное давление на фронте волны (МПа) и величина удельного импульса кПа · с в зависимости от расстояния, м.

### *Расчет избыточного давления взрыва для горючих пылей.*

Взрывы пыли (пылевоздушных смесей – аэрозолей) представляют одну из основных опасностей химических производств. Взрывы пыли происходят в ограниченном пространстве – в помещениях зданий, внутри различного оборудования, в штольнях шахт.

Существует ряд производств, в ходе технологических процессов которых неизбежно образование больших количеств пыли, соединение которой с кислородом воздуха в определенных пропорциях создает взрывоопасную концентрацию. Возможны взрывы пыли в мукомольном производстве, на зерновых элеваторах (мучная пыль), при обращении с красителями, серой, сахаром, другими порошкообразными пищевыми продуктами, производстве пластмасс, лекарственных препаратов, на установках топлива (угольная пыль), в текстильном производстве. Пределы взрывоопасной концентрации устанавливаются опытным путем в зависимости от состава пыли или находятся по справочникам.

Степень запыленности помещений определяют специальными приборами. Приближенную оценку концентрации пыли  $C$  (г/м<sup>3</sup>) в воздухе можно определить по формуле

$$C = \frac{h \cdot f \cdot d}{V},$$

где  $h$  - толщина слоя пыли на поверхности, см;  $f$  - площадь поверхности помещения, покрытая пылью, см;  $d$  – насыпная плотность пыли, г/см<sup>3</sup>;  $V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>.

Взрыву больших объемов пылевоздушных смесей, как правило, предшествуют небольшие местные хлопки и локальные взрывы внутри оборудования и аппаратуры. При этом возникают слабые ударные волны, встряхивающие и поднимающие в воздух большие массы пыли, накопившейся на поверхности пола, стен и оборудования.

Взрывы пыли, в основном, происходят по дефлаграционному механизму (взрывное горение). Переход к детонации возможен в длинных штольнях шахт, на конвейерных линиях зернохранилищ большой протяженности за счет турбулизации пыли. Возникновение облаков аэрозолей из осевшей ранее пыли (аэрогеля), их воспламенение и взрыв возбуждаются слабым взрывом какой-либо газовой смеси, например, в шахтах – взрывом метана.

При взрыве пыли избыточное давление  $\Delta P$  в объеме  $V$  возрастает до своего максимального значения  $\Delta P_m$  постепенно за некоторый промежуток времени  $\tau$ . Это объясняется тем, что горение (при дефлаграционном взрыве) распространяется с дозвуковой скоростью. Давление  $\Delta P_m$  зависит от большого числа факторов: концентрации и размеров частиц пыли определенного типа, химической активности вещества, влажности, начального давления (в сосудах, аппаратах, трубопроводах), объема  $V$  и наличия отверстий или предохранительных (сбросных) конструкций.

В общем случае основными параметрами, определяющими разрушительное действие дефлаграционных взрывов аэрозолей, являются давление  $\Delta P_m$  и максимальная скорость нарастания давления

$$\dot{\Delta P}_m = \left( \frac{dP}{dt} \right)_m \text{ или длительность } \tau \text{ нарастания давления } \tau = K_t \frac{\Delta P_m}{\dot{P}_m}, K_t \approx 2,5.$$

Избыточное давление взрыва  $\Delta P_m$ , МПа, аэрозоля в помещениях зданий определяют по формуле /28/:

$$\Delta P_m = \frac{G \cdot Q \cdot P_0 \cdot Z}{V_{CB} \rho_B c_p T_0 \cdot K_n},$$

где  $G$  – общая масса дисперсного продукта, кг;  $Q$  – удельная теплота сгорания вещества;  $K_n \approx 3$  – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения; коэффициент  $Z$  участия взвешенной пыли во взрыве рассчитывается по формуле

$$Z = 0,5 \cdot F,$$

где  $F$  – массовая доля частиц пыли размером менее критического, с превышением которого аэрозоль становится взрывобезопасной, т.е. неспособной распространять пламя. В отсутствие возможности получения сведений для расчета величины  $Z$  допускается принимать  $Z \approx 0,5$  – доля участия дисперсного продукта во взрыве.

Величина  $G$  может быть подсчитана по плотности вещества  $\rho$  и объему помещения  $G = \rho V_{CB}$ . Тогда для давления получим оценку

$$\Delta P_m = \frac{Q \cdot P_0 \cdot Z}{\rho_{вс} T_0 \cdot K_n},$$

причем для герметичных помещений  $K_n = 1$  и в запас расчета  $Z=1$ .

Максимум скорости нарастания давления  $\dot{P}_m$ , МПа/с, (в момент времени  $t \approx \tau/2$ ) при взрывном горении пыли в замкнутом объеме с законом кубического корня из объема

$$\dot{P}_m = K_s \sqrt[3]{V},$$

в которой  $K_s$  – коэффициент взрывоопасности пыли, находящийся в диапазоне от 0 до 30 МПа · м<sup>1/3</sup> /с и более. Так, для угольной пыли  $K_s = 8,5$ ; алюминия 5,5; органических пигментов 2,9; декстрина 2,0.

В качестве расчетного варианта аварии для определения критериев пожарной опасности для горючих пылей следует выбирать наиболее неблагоприятный вариант аварии или период нормальной работы аппаратов, при котором в горении пылевоздушной смеси участвует наибольшее количество веществ или материалов, наиболее опасных в отношении последствий такого горения. Количество поступивших веществ, которые могут образовать горючие пылевоздушные смеси, определяется, исходя из предпосылки о том, что в момент расчетной аварии произошла плановая или внезапная разгерметизация одного из технологических аппаратов, за которой последовал аварийный выброс в окружающее пространство находившейся в аппарате пыли.

Расчетная масса взвешенной в объеме помещения пыли  $m$ , кг, образовавшейся в результате аварийной ситуации, определяется по формуле

$$m = m_{\text{вз}} + m_{\text{ав}},$$

где расчетная масса взвихрившейся пыли определяется как

$$m_{\text{вз}} = K_{\text{вз}} \cdot m_{\text{п}},$$

а расчетная масса пыли, поступившей в помещение в результате аварийной ситуации

$$m_{\text{ав}} = (m_{\text{ап}} + q \cdot T) \cdot K_{\text{п}},$$

где  $K_{\text{вз}}$  – доля отложившейся в помещении пыли, способной перейти во взвешенное состояние в результате аварийной ситуации. При отсутствии экспериментальных сведений о величине  $K_{\text{вз}}$  допускается полагать  $K_{\text{вз}} = 0,9$ ;  $m_{\text{п}}$  – масса отложившейся в помещении пыли к моменту аварии, кг;  $m_{\text{ап}}$  – масса горючей пыли, выбрасываемой в помещение из аппарата, кг;  $q$  – производительность, с которой продолжается поступление пылевидных веществ в аварийный аппарат по трубопроводам до момента их отключения, кг/сек;  $T$  – время отключения, сек (не более 120 сек при автоматическом отключении и 300 сек при ручном отключении);  $K_{\text{п}}$  – коэффициент пыления, представляющий отношение массы взвешенной в воздухе пыли ко всей массе пыли, поступившей из аппарата в помещение. При отсутствии экспериментальных сведений о величине  $K_{\text{п}}$  допускается для пылей с дисперсностью не менее 350 мкм -  $K_{\text{п}} = 0,5$ ; для пылей с дисперсностью менее 350 мкм -  $K_{\text{п}} = 1,0$ .

Масса отложившейся в помещении пыли к моменту аварии определяется по формуле:

$$m_{\text{п}} = \frac{K_{\text{г}}}{K_{\text{э}}} (m_1 + m_2),$$

где  $K_{\text{г}}$  – доля горючей пыли в общей массе отложенной пыли;  $K_{\text{э}}$  – коэффициент эффективности пылеуборки принимается при ручной



пылеуборке: сухой – 0,6; влажной – 0,7; при механизированной вакуумной уборке: пол ровный – 0,9; пол с выбоинами (до 5% площади) – 0,7;  $m_1$  – масса пыли, которая оседает на малодоступных для уборки местах помещения за период времени между генеральными уборками, кг;  $m_2$  – масса пыли, которая оседает на доступных для уборки местах в помещении за период времени между текущими уборками, кг.

Приведенная масса вычисляется по формуле:

$$m_{пр} = m \cdot z \cdot \frac{H_T}{H_0},$$

где  $H_T$  – теплота сгорания пыли, Дж/кг;  $H_0$  – константа равная  $4,6 \cdot 10^6$  Дж/кг;  $z$  – коэффициент участия пыли в горении, значение которого допускается принимать равным 0,1 (в отдельных обоснованных случаях величина  $z$  может быть снижена, но не менее чем до 0,02).

Избыточное давление в этом случае считается по формуле (3.3) или (3.5).

Величина импульса волны давления  $I$ , Па · сек, вычисляется по формуле:

$$I = 123 \cdot \frac{m_{пр}^{0,66}}{r}$$

**Пример.3.4.** Расчет показателей взрывоопасности пыли (замкнутое пространство).

Исходные данные:

1. Объем помещения  $V$ , достаточный для создания взрывоопасной концентрации пылевоздушной смеси,  $m^3$ .
2. Предел взрываемости  $\eta$  пылевоздушной смеси,  $г/м^3$ .
3. Удельная теплота сгорания пылевоздушной смеси  $q$ , кДж/кг.
4. Удельная энергия взрыва ТНТ,  $qt$ .
5. Коэффициент участия взвешенной пыли во взрыве,  $z$ .

$$V := 384 \quad \eta := 40 \quad q := 13961 \quad qt := 4520 \quad z := 0.3$$

Общий энергетический потенциал равен, кДж:

$$E := \frac{V \cdot q \cdot 0.8 \cdot \eta}{1000} \quad E = 1.716 \times 10^5$$

Относительный энергетический потенциал равен:

$$Q_b := \frac{\sqrt[3]{E}}{16.534} \quad Q_b = 3.361$$

Общая приведенная масса равна, кг:

$$m_p := \frac{E}{46000} \quad m_p = 3.729$$

Величина тротилового эквивалента равна, кг:

$$W_t := \frac{0.4 \cdot q}{0.9 \cdot q_t} \cdot z \cdot m_p \quad W_t = 1.536$$

Расчет радиусов зон разрушения, м. Радиус зоны разрушения в общем виде определяется выражением:

$$R_0 := \frac{\sqrt[3]{W_t}}{\left[ 1 + \left( \frac{3180}{W_t} \right)^2 \right]^{\frac{1}{6}}} \quad R_0 = 0.091$$

Радиусы зон разрушения определяются выражениями:

$$R := K \cdot R_0$$

1-я зона разрушения:

$$R_1 := 3.8 \cdot R_0 \quad R_1 = 0.344$$

2-я зона разрушения:

$$R_2 := 5.6 \cdot R_0 \quad R_2 = 0.507$$

3-я зона разрушения:

$$R_3 := 9.6 \cdot R_0 \quad R_3 = 0.869$$

4-я зона разрушения:

$$R_4 := 28.0 \cdot R_0 \quad R_4 = 2.535$$

5-я зона разрушения:

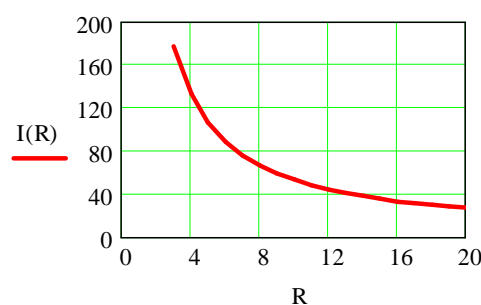
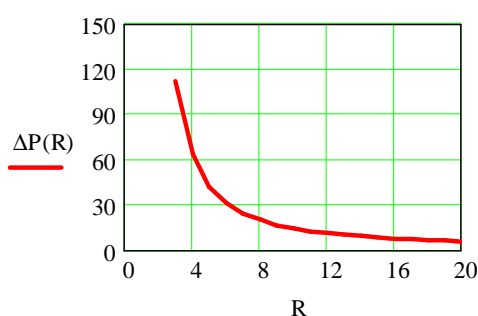
$$R5 := 56.0 \cdot R0 \quad R5 = 5.069$$

Величина избыточного давления, кПа:

$$R := 3,3.1 \dots 20 \quad RR(R) := \frac{R}{\sqrt[3]{Wt}} \quad \Delta P(R) := \left( \frac{0.084}{RR(R)} + \frac{0.27}{RR(R)^2} + \frac{0.7}{RR(R)^3} \right) \cdot 10^3$$

Величина удельного импульса, Па · с :

$$I(R) := \frac{0.4 \cdot \sqrt[3]{(Wt)^2}}{R} \cdot 10^3$$



■

Рис.3.9. Величины избыточного давления, кПа и удельного импульса Па · с в зависимости от расстояния при взрыве пыли в помещении объемом 384 м<sup>3</sup>.

**Пример.3.5.** Расчет показателей взрывоопасности пыли при разгерметизации аппарата (замкнутое пространство).

Исходные данные:

1. Доля отложившейся в помещении пыли K, способной перейти во взвешенное состояние; допускается полагать при отсутствии экспериментальных данных равным 0,9.
2. Доля горючей пыли в общей массе отложенной пыли K<sub>г</sub>.
3. Коэффициент эффективности пылеуборки K<sub>у</sub> равный 0,6 - сухая ручная, 0,7 - влажная ручная, 0,9 - механизированная вакуумная, 0,7 - пол с выбоинами.

4. Масса горючей пыли, выбрасываемой в окружающее пространство  $M_a$  при разгерметизации аппарата, кг; в момент расчетной аварии происходит аварийный выброс всей находившейся в аппарате пыли.

5. Производительность  $q$ , с которой продолжается поступление пылевидных веществ в аварийный аппарат по трубопроводам до момента их отключения, кг/сек.

6. Расчетное время отключения  $T$ , сек, 120 с - автоматическое отключение, 300 с - ручное отключение.

7. Коэффициент пыления  $K_p$ , представляющий отношение массы взвешенной пыли ко всей массе пыли, поступившей из аппарата в помещение; при отсутствии данных принимается равным **0,5** - для пылей с дисперсностью не менее 350 мкм, **1,0** - для пылей с дисперсностью менее 350 мкм.

8. Масса пыли  $M_1$ , которая оседает в малодоступных для уборки поверхностях помещения за период между текущими уборками, кг.

9. Масса пыли  $M_2$ , которая оседает на доступных для уборки местах помещения за период между текущими уборками, кг.

10. Коэффициент участия пыли в горении  $Z$ , значение которого допускается равным 0,1.

11. Теплота сгорания пыли  $H_t$ , кДж/кг.

12.  $H_{to}$  - константа, кДж/кг.

$$K := 0.9 \quad K_r := 0.4 \quad K_y := 0.7 \quad M_a := 10 \quad q := 0.5 \quad T := 300 \quad K_p := 0.5$$

$$M_1 := 5 \quad M_2 := 6 \quad Z := 0.1 \quad H_t := 13961 \quad H_{to} := 4.6 \cdot 10^3$$

Расчетная масса взвихрившейся пыли:

$$M_t := K \cdot \frac{K_r}{K_y} \cdot (M_1 + M_2) \quad M_t = 5.657$$

Расчетная масса пыли, поступившей в помещение в результате аварийной ситуации:

$$M_{av} := (M_a + q \cdot T) \cdot K_p \quad M_{av} = 80$$

Расчетная масса взвешенной в объеме помещения пыли, кг, образовавшейся в результате аварийной ситуации:

$$M := M_t + M_{av} \quad M = 85.657$$

Приведенная масса горючей пыли:

$$m_p := M \cdot Z \cdot \frac{H_t}{H_{to}} \quad m_p = 25.997$$

Расчет избыточного давления:

$$r := 10, 10.1 \dots 50 \quad P_0 := 101 \quad \Delta P(r) := P_0 \cdot \left( 0.8 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_p}}{r} + 3 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_p^2}}{r^2} + 5 \cdot \frac{m_p}{r^3} \right)$$

Величина импульса волны давления, Па · с :

$$I(r) := 123 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_p^2}}{r}$$

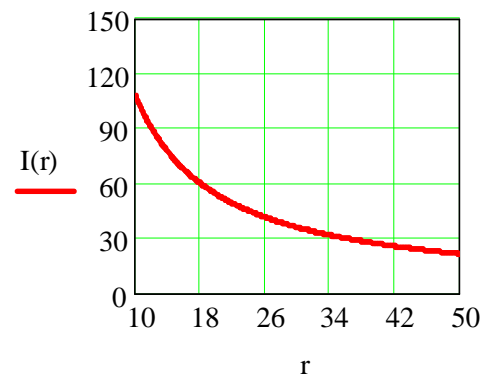
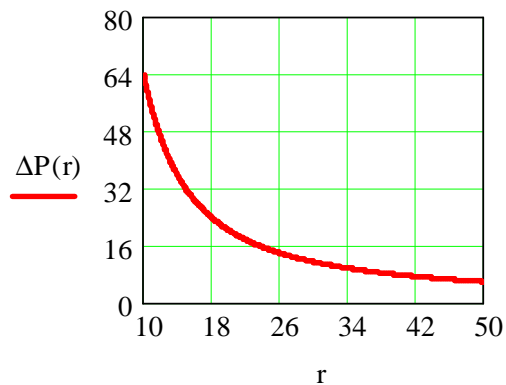


Рис. 3.10. Величины избыточного давления, кПа и удельного импульса Па · с в зависимости от расстояния при взрыве пыли при разгерметизации аппарата

### **3.5. Модели оценки физико-химических параметров последствий аварий на промышленных объектах**

Особенности возникновения и развития аварий на опасных промышленных объектах показал, что при моделировании физических процессов, протекающих при авариях, должны учитываться следующие явления:

- Истечение из отверстия в резервуаре;
- Растекание жидкости при квазимгновенном разрушении резервуара;
- Испарение жидкости из пролива;
- Образование паровоздушного облака;
- Взрыв паровоздушной смеси в резервуаре или производственном помещении;
- Факельное горение струи жидкости;
- Вскипание и выброс горячей жидкости при пожаре.

Кроме того, при моделировании развития аварий на опасных промышленных объектах необходимо оценивать:

- Массу горючих веществ, поступающих в окружающее пространство в результате возникновения аварийных ситуаций;
- Максимальные размеры взрывоопасных зон;
- Избыточное давление в ударной волне при взрыве паровоздушного облака;
- Избыточное давление в ударной волне при взрыве резервуара с перегретой легко воспламеняющейся жидкостью (ЛВЖ), горячей жидкостью (ГЖ) в очаге пожара;
- Интенсивности теплового излучения.

Ниже рассмотрены модели, параметры, оценки которых используются в методиках оценки последствий аварий.

#### *3.5.1. Истечение жидкости из отверстия резервуара*

Рассмотрим резервуар, находящийся в обваловании. Допущения:

- истечение через отверстие однофазное;
- резервуар имеет постоянную площадь сечения по высоте;
- диаметр резервуара много больше размеров отверстия;
- размеры отверстия много больше толщины стенки;
- поверхность жидкости внутри резервуара горизонтальна;
- температура жидкости остается постоянной в течение времени истечения.

Массовый расход жидкости  $G$  (кг/с) через отверстие во времени описывается соотношением:

$$G(t) = G_0 - \frac{\rho \cdot g \cdot \mu^2 \cdot S_{ot}^2}{S_p} \cdot t,$$

где  $G_0$  – массовый расход в начальный момент времени (кг/с), описываемый выражением:

$$G_0 = \mu \cdot \rho \cdot S_{ot} \cdot \sqrt{g(h_0 - h_{ot})},$$

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения;  
 $\mu$  – коэффициент истечения;  $S_{ot}$  – площадь отверстия, м<sup>2</sup>;  $h_{ot}$  – высота отверстия над поверхностью земли, м;  $S_p$  – площадь сечения резервуара, м<sup>2</sup>;  $h_0$  – начальная высота столба жидкости в резервуаре, м.

Зависимость высоты столба жидкости в резервуаре  $h$  (м) от времени описывается соотношением:

$$h(t) = h_0 - \frac{G_0}{\rho \cdot S_p} \cdot t + \frac{g \cdot \mu^2 \cdot S_{ot}^2}{2 \cdot S_p^2} \cdot t^2.$$

Условие перелива жидкости через обвалование может быть записано следующим образом:

$$h \geq H + \frac{L}{\mu},$$

где  $H$  – высота обвалования, м;  $L$  – расстояние от стенки резервуара до обвалования, м.

Количество жидкости  $m$  (кг), перелившейся через обвалование за полное время истечения, описывается выражением:

$$m = \int_0^{t_k} G(t)dt = G \cdot t_k - \frac{\rho \cdot g \cdot \mu^2 \cdot S_{ot}^2}{2 \cdot S_p} \cdot t_k^2,$$

где  $t_k$  – время, в течение которого жидкость переливается через обвалование, с, (т.е. время, в течение которого выполняется условие  $h \geq H + \frac{L}{\mu}$ ).

Величина  $t_k$  определяется выражением:

$$t_k = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a},$$

где параметры a,b,c описываются соотношениями:

$$a = \frac{g \cdot \mu^2 \cdot S_{ot}^2}{2 \cdot S_p^2}, \quad b = -\frac{G_0}{\rho \cdot S_p}, \quad c = h_0 - H - \frac{L}{\mu}.$$

#### **Перечень исходных данных, необходимых для расчета:**

- плотность жидкости; коэффициент истечения (зависит от формы отверстия, может быть принят равным 0,8); площадь отверстия; высота над поверхностью земли; площадь сечения резервуара; начальная высота столба жидкости в резервуаре; высота обвалования; расстояние от стенки резервуара до обвалования.

#### **Перечень выходных данных:**

- массовый расход жидкости через отверстие;
- количество жидкости, перелившейся через обвалование за полное время истечения;
- время, в течение которого жидкость переливается через обвалование.

#### **Область применения:**

$\rho = (0,5 - 5,0) \cdot 10^3$ , кг/м<sup>3</sup>;  $\mu = 0,6 - 1,0$ ;  $S_{ot} = 0,0001 - 1$ , м<sup>2</sup>;  
 $h_{ot} = 1 - 40$ , м;  $S_p = 1 - 1000$  м<sup>2</sup>;  $h_0 = 1 - 40$ , м;  $H = 1 - 40$ , м;  $L = 1 - 40$ , м.



### *3.5.2. Количественная оценка массы горючих веществ, поступающих в окружающее пространство в результате возникновения аварийных ситуаций*

Количество поступивших в замкнутое или свободное пространство веществ, которые могут образовать взрывоопасные паровоздушные смеси или проливы горючих жидкостей, определяется исходя из следующих предпосылок:

- а) происходит расчетная авария из резервуаров или трубопроводов;
- б) все содержимое резервуара (трубопроводов) или часть продукта (при соответствующем обосновании) поступает в замкнутое или свободное пространство. При этом в случае наличия на объекте нескольких резервуаров (с различными объемами) с одним и тем же веществом расчет следует проводить для варианта с разгерметизацией резервуара (цистерны), имеющего наибольшую емкость;
- в) при разгерметизации резервуара происходит одновременно утечка веществ их трубопроводов, питающих резервуар по прямому и обратному потоку течение времени, необходимого для отключения трубопроводов.

Расчетное время отключения трубопроводов определяется в каждом конкретном случае, исходя из реальной обстановки, и должно быть минимальным с учетом паспортных данных на запорные устройства и их надежности, характера технологического процесса и вида расчетной аварии. Под «временем отключения» следует понимать промежуток времени от начала возможного поступления горючего вещества из трубопровода (перфорация, разрыв, изменение номинального давления и т.п.) до полного прекращения поступления жидкости в окружающее пространство. Быстродействующие клапаны-отсекатели должны автоматически перекрывать подачу жидкости при нарушении электроснабжения;

- г) при расчетах принимается нулевая подвижность окружающего воздуха (безветрие);

д) в качестве расчетной температуры при аварийной ситуации с наземным расположением оборудования принимается максимально возможная температура воздуха в соответствующей климатической зоне, а при аварийной ситуации с подземным расположением оборудования принимается температура грунта, условно равная максимальной среднемесячной температуре окружающего воздуха в наиболее теплое время года (например, для Москвы эта температура составляет: для наземного оборудования  $37^{\circ}\text{C}$ , для подземного  $25^{\circ}\text{C}$ ).

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

Кроме того, в запас надежности идет неучет подвижности воздуха и уменьшение скорости испарения жидкости со временем вследствие ее охлаждения.

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

#### *3.5.2.1. Определение массы легковоспламеняющейся или горючей жидкости, поступившей при разгерметизации наземного резервуара (цистерны)*

Масса легковоспламеняющейся жидкости (ГЖ), поступившей в окружающее пространство при аварийной ситуации, вычисляется как:

$$m_a = \rho \cdot V_p,$$

где  $\rho$  – плотность ЛВЖ (ГЖ), кг/м<sup>3</sup>;  $V_p$  – номинальный объем резервуара (цистерны), м<sup>3</sup>, (или количество жидкости, вышедшей из резервуара при ином расчетном сценарии аварии).

### 3.5.2.2. Определение массы ЛВЖ (ГЖ), поступившей самотеком при разгерметизации трубопровода, выходящего из резервуара

Масса ЛВЖ (ГЖ), поступившей самотеком при разгерметизации трубопровода, выходящего из резервуара, определяется как

$$m_a = G_p \cdot t_{\text{расч}} + \frac{\pi \cdot d_T^2}{4} \cdot \left( \sum_{i=1}^n L_i \right) \cdot \rho,$$

где  $G_p$  – расход жидкости, истекающей из резервуара через разгерметизированный трубопровод и определяемый как

$$G_p = \frac{\pi \cdot d_T^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta P_p}, \Delta P_p = h_T \cdot \rho \cdot g \quad (\text{кг/сек}); \quad t_{\text{расч}} - \text{расчетное время}$$

отключения трубопроводов, связанных с местом разгерметизации, сек.;

$d_T$  – диаметр трубопроводов, м. (в случае различных диаметров трубопроводов, связанных с местом разгерметизации, объем выходящего топлива рассчитывается для каждого трубопровода в отдельности);

$L_i$  – длина  $i$ -го участка трубопровода от запорного устройства до места разгерметизации, м;  $n$  – число участков трубопроводов, связанных с местом разгерметизации;  $\Delta P_p$  – напор столба жидкости в резервуаре, Па;  $h_T$  – высота столба жидкости (от верхнего уровня жидкости в резервуаре до уровня места разгерметизации), м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

### 3.5.2.3. Определение массы ЛВЖ (ГЖ), поступившей в окружающее пространство при разгерметизации напорного трубопровода.

Напорный трубопровод – трубопровод, по которому насосом перекачивается ЛВЖ (ГЖ). При отсутствии обратного потока жидкости из резервуара по принципу «сифона» масса вышедшей жидкости вычисляется по формуле:

$$m_a = G_n \cdot t_{\text{расч}} + \frac{\pi \cdot d_T^2}{4} \cdot \left( \sum_{i=1}^n L_i \right) \cdot \rho,$$

где  $G_n$  – производительность насоса, кг/с.

При разгерметизации напорного трубопровода и при возможности возникновения обратного потока жидкости из резервуара по принципу «сифона» масса вышедшей жидкости вычисляется по формуле:

$$m_a = (G_p + G_n) \cdot t_{\text{расч}} + \frac{\pi \cdot d_T^2}{4} \cdot \left( \sum_{i=1}^n L_i \right) \cdot \rho.$$

При разгерметизации резервуаров (трубопроводов) для хранения сжиженных углеводородных газов (СУГ) под давлением возможно истечение паровой (при разгерметизации выше уровня жидкости) и жидкой (при разгерметизации ниже уровня жидкости) фаз. Поэтому следует различать массовые скорости истечения паровой и жидкой фаз СУГ.

Массовую скорость истечения паровой фазы СУГ, кг/(м<sup>2</sup> · с), вычисляют по формуле:

$$G_m = \sqrt{\left( \frac{P_c \cdot M}{R \cdot T_c} \right) \cdot P_c \cdot (0,167 \cdot P_R^5 + 0,534 \cdot P_R^{1,95})},$$

где  $P_c$  – критическое давление, Па (определяется по справочным данным);  $M$  – молекулярная масса, кг/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль · К);  $T_c$  – критическая температура, К (определяется по справочным данным);  $P_R = P/P_c$ ,  $P$  – давление в резервуаре (трубопроводе), Па.

Массовую скорость истечения жидкой фазы СУГ, кг/(м<sup>2</sup> · с), вычисляют по формуле:

$$G_1 = G_m \cdot \frac{\sqrt{(\rho_l / \rho_v) \cdot P_R}}{1,22 \cdot T_R^{3/2}},$$

где  $\rho_l, \rho_v$  – плотности жидкой и паровой фаз СУГ, кг/м<sup>3</sup> (определяются по справочным данным);  $T_R = T/T_c$ ,  $T$  – температура СУГ, находящегося в резервуаре (трубопроводе), К.

**Пример 3.6.** Рассчитать массовую скорость истечения паровой и жидкой фазы пропана.

**Исходные данные.** Температура окружающей среды равна 20 °С. Истечение происходит из резервуара хранения пропана под давлением при температуре окружающей среды.  $P_c = 4,19 \cdot 10^6$  Па;  $T_c = 369,8$  К; Давление пропана при температуре 20 °С равно  $P = 0,833 \cdot 10^6$  Па;  $\rho_l = 499$ ;  $\rho_v = 17,74$ ;  $M = 44,096 \cdot 10^{-3}$ . Площадь отверстия истечения  $F = 0,1$  м<sup>2</sup>.

Расчет:

Массовые скорости истечения паровой и жидкой фаз:

$$P_c := 4.19 \cdot 10^6 \quad T_c := 369.8 \quad P := 0.833 \cdot 10^6 \quad \rho_l := 499 \quad \rho_v := 17.74$$

$$M := 44.096 \cdot 10^{-3} \quad R := 8.31 \quad F := 0.1 \quad T := 293.15$$

$$Pr := \frac{P}{P_c} \quad Tr := \frac{T}{T_c} \quad Pr = 0.199 \quad Tr = 0.793$$

$$G_m := \sqrt{\left(\frac{P_c \cdot M}{R \cdot T_c}\right) \cdot P_c \cdot (0.167 \cdot Pr^5 + 0.534 \cdot Pr^{1.95})} \quad G_m = 2.404 \times 10^3$$

$$G_1 := G_m \cdot \frac{\sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_v} \cdot Pr}}{1.22 \cdot Tr^{\frac{3}{2}}} \quad G_1 = 6.601 \times 10^3$$

Массовая скорость истечения жидкой фазы через отверстие равна:

$$W_1 := G_1 \cdot F \quad W_1 = 660.095$$

Массовая скорость истечения паровой фазы через отверстие равна:

$$W_v := G_m \cdot F \quad W_v = 240.36$$

#### 3.5.2.4. Определение площади пролива легко воспламеняющейся жидкости

Площадь пролива ЛВЖ (ГЖ)  $F$ ,  $m^2$ , определяется:

- а) площадью обвалования или поддона, если предусмотрена локализация растекания пролива посредством этого устройства (но не более величины,  $F = k \cdot m_a$ , где  $k = 0,21 \text{ м}^2/\text{кг}$  для бензина и  $0,19 \text{ м}^2/\text{кг}$  для дизельного топлива);
- б) величиной  $F = k \cdot m_a$ , если локализация пролива поддоном не предусмотрена.

#### 3.5.2.5. Определение массы паров ЛВЖ, выходящих через "дыхательную" арматуру или разгерметизированную арматуру, соединяющую паровое пространство резервуара с атмосферой, при наполнении резервуара и при хранении ЛВЖ

В случае наполнения резервуара массу паров вычисляют по формуле:

$$m_p = \frac{\rho_n \cdot P_n}{P_0 \cdot V_{гр}}$$

где  $m_p$  – масса выходящих паров ЛВЖ, кг;  $\rho_n = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_p)}$ ;

$P_n$  – давление насыщенных паров топлива при расчетной температуре, кПа, определяемое по справочным данным (для бензина при подземном расположении оборудования  $P_n = 29,18$  - при наземном -  $P_n = 39,28$ , для дизельного топлива  $P_n = 0,05$  и  $P_n = 0,59$  соответственно);

$P_0$  – атмосферное давление, кПа (допускается принимать 101);

$V_{гр}$  – геометрический объем резервуара,  $m^3$ ;  $M$  – молекулярная масса топлива (кг/кмоль) (для бензина  $M = 95,3$  и для дизельного топлива  $M = 172,3$ );  $V_0$  – мольный объем, равный  $22,413 m^3 / \text{кмоль}$ ;  $t_p$  – расчетная температура,  $^{\circ}\text{C}$ .

При хранении ЛВЖ массу паров вычисляют по формуле:

$$m_p = G_n \cdot \tau_a,$$

где  $G_n$  – расход паров ЛВЖ, кг/сек., определяемый соотношением

$$G_n = F_p \cdot W; \quad \tau_a \text{ – время поступления паров из резервуара, сек.};$$

$F_p$  – максимальная площадь поверхности испарения ЛВЖ в резервуаре,  $m^2$ ;  $W$

– интенсивность испарения ЛВЖ,  $\text{кг}/(m^2 \text{сек})$ , определяемая соотношением

$$W = 10^{-6} \cdot \sqrt{M \cdot m}.$$

#### **Перечень исходных данных:**

- плотность ЛВЖ (ГЖ); объем резервуара; расчетное время отключения трубопроводов; диаметры и длины трубопроводов; высота столба жидкости; производительность насоса, подающего жидкость; давление насыщенных паров ЛВЖ (ГЖ); геометрический объем резервуара; молярная масса жидкости; расчетная температура; время поступления паров из резервуара; площадь поверхности испарения.

#### **Перечень выходных данных:**

- масса ЛВЖ (ГЖ), поступившей в окружающее пространство при аварийной ситуации;  
- масса паров жидкости, выходящих из резервуара при его наполнении и при хранении жидкости.

#### **Область применения:**

$$\rho = (0,5 - 5,0) \cdot 10^{-3} \text{ кг}/m^3; V_p = 1 - 50000 m^3; \tau = 1 - 600 \text{ сек};$$

$$d_T = (0,05 - 0,5) m; L_i = (1 - 100) m; h_T = (1 - 40) m; G_n = (0,001 - 1) m^3 / c;$$

$$P_n = (0,01 - 50) \text{ кПа};$$

$$V_{\text{ip}} = (1 - 50000)\text{м}^3; M = (30 - 300)\text{кг} / \text{кмоль}; t_p = (-10 - +40)^{\circ}\text{C}; \tau_a = (1 - 600)\text{сее.};$$

$$F = (1 - 10000)\text{м}^2.$$

### 3.5.3. Масса газа $m$ (кг), поступающая в окружающее пространство при аварии

Масса газа, поступающая в окружающее пространство при аварии, рассчитывается по формуле:

$$m = (V_a + V_T) \cdot \rho_r,$$

где  $V_a$  – объем газа, вышедшего из аппарата,  $\text{м}^3$ :

$$V_a = 0,01 \cdot P_1 \cdot V_1 \quad (P_1 - \text{давление в аппарате, кПа; } V_1 - \text{объем аппарата, } \text{м}^3);$$

$V_T$  – объем газа, вышедшего из трубопровода:

$V_T = V_{1T} + V_{2T}$  ( $V_{1T}$  – объем газа, вышедшего из трубопровода до отключения,  $\text{м}^3$ :  $V_{1T} = q \cdot t$ , где  $t$  – время,  $q$  – расход газа;

$$V_{2T} = 0,01 \cdot \pi \cdot P_2 \cdot (r_1^2 L_1 + r_2^2 L_2 + \dots + r_n^2 L_n),$$

где  $P_2$  – максимальное давление в трубопроводе по технологическому регламенту, кПа;  $r$  – внутренний радиус трубопровода, м;  $L$  – длина трубопровода от аварийного аппарата до задвижек.

При аварии аппарата с жидкостью часть жидкости может находиться в виде пара, вырывающегося при аварии в окружающее пространство с образованием первичного облака. Оставшаяся жидкость при аварии аппарата (резервуара) разливается внутри помещения с последующим испарением с зеркала разлива и образованием вторичного облака.

Масса пара в первичном облаке (кг) равна:

$$m_{\text{п1}} = \alpha \cdot \frac{\mu}{R} \cdot \frac{V_1 P_1 + V_T P_2}{T_{\text{ж}}},$$

где  $\alpha$  – объемная доля оборудования, заполненная газовой фазой;  $\mu$  – молекулярная масса жидкости, кг/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная газа, равная 8,31 Дж/(К · моль);  $T_{\text{ж}}$  – температура жидкости в аппарате, К.



Несколько источников поступления паров в окружающее пространство:

$$m = m_p + m_{\text{откр.}} + m_{\text{сост.}} + m_{\text{пер.}},$$

где  $m_p$  – масса жидкости, испарившейся с поверхности разлива, кг;  $m_{\text{откр.}}$  – масса жидкости, испарившейся из открытой емкости;  $m_{\text{сост.}}$  – масса жидкости, испарившейся с поверхностей, на которые нанесен применяемый состав, кг;  $m_{\text{пер.}}$  – масса жидкости, испарившейся в окружающее пространство в случае ее перегрева, кг.

При этом каждое слагаемое определяется по формуле:

$$m = W \cdot F_{\text{и}} \cdot t,$$

где  $W$  – интенсивность испарения,  $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ , определяемая по формуле  $W = 10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{\mu} \cdot P_{\text{н}}$ ,  $\eta$  – коэффициент, зависящий от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения,  $P_{\text{н}}$  – давление насыщенного пара, кПа;  $t$  – время испарения разлившейся жидкости, с, равное либо времени полного испарения, либо ограничиваемое временем 3600 с, в течение которых должны быть приняты меры по устранению аварии;  $F_{\text{и}}$  – площадь испарения,  $\text{м}^2$ , определяемая из расчета, что 1 л смесей и растворов, содержащих по массе 70% и менее растворителей, разливается по площади 0,5  $\text{м}^2$ , а 1 л остальных жидкостей – на 1  $\text{м}^2$  пола помещения.

### 3.5.3.1. Испарение жидкости из пролива

В основу модели испарения положена теория Стефановского потока. Основным выводом этой теории является положение о том, что при температурах окружающего воздуха, низких по сравнению с температурой кипения жидкости, процесс испарения лимитируется диффузией, а при высоких – теплоотдачей. Для рассматриваемого случая нефтепродуктов, среди которых одним из наиболее легколетучих компонентов является бензин, характерен первый режим испарения. При этом интенсивность испарения  $W$  ( $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$ ) определяется по справочным и экспериментальным

данным. Для ненагретых выше температуры окружающей среды ЛВЖ при отсутствии данных допускается рассчитывать  $W$  с удовлетворительной точностью с помощью выражения:

$$W = 10^{-6} \eta \sqrt{M} \cdot P_n,$$

где  $M$  – молекулярная масса, г/моль;  $P_n$  – давление насыщенного пара при расчетной температуре жидкости  $t_p$ , определяемое по справочным данным, кПа;  $\eta$  – коэффициент, принимаемый по таблице 3.10 в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения.

**Область применения:**

$\eta = 1,0 - 10,0$ ;  $P_n = (0,01 - 50)$ кПа;  $M = (30 - 300)$ кг / кмоль.

Масса перегретой жидкости  $m_{пер}$  определяется

$$m_{пер} = \min \left\{ 0,8m_n ; \frac{2c_p (T_s - T_{кип})}{L_{исп}} m_n \right\},$$

где  $L_{исп}$  – удельная теплота испарения жидкости при температуре перегрева жидкости  $T_s$ , Дж / кг;  $m_n$  – масса вышедшей перегретой жидкости, кг;  $T_{кип}$  – нормальная температура кипения жидкости, К;  $c_p$  – удельная теплоемкость жидкости при температуре перегрева жидкости, Дж / (кг · К);  $T_s$  – температура перегретой жидкости в соответствии с технологическим регламентом в технологическом аппарате или оборудовании, К.

Для сжиженных углеводородных газов (СУГ) при отсутствии данных допускается рассчитывать удельную массу испарившегося СУГ из пролива,  $m_{суг}$ , кг / м<sup>2</sup> :

$$m_{суг} = \frac{M}{L_{исп}} \cdot (T_0 - T_{уг}) \cdot \left\{ 2 \cdot \lambda_M \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi \cdot a}} + \frac{5,1 \cdot \sqrt{Re} \cdot \lambda_B \cdot t}{d} \right\},$$

где  $M$  – молекулярная масса СУГ, кг/моль;  $L_{исп}$  – мольная теплота испарения СУГ при начальной температуре СУГ, Дж/моль;  $T_0$  – начальная температура материала, на поверхность которого разливается СУГ, К;  $\lambda_M$  – коэффициент

теплопроводности материала, на поверхности которого разливается СУГ, Вт/(м·К);  $a = \frac{\lambda_M}{c_{\text{тб}} \rho_{\text{тб}}}$ , м<sup>2</sup>/сек, где  $c_{\text{тб}}$  – теплоемкость материала, на поверхности которого разливается СУГ, Дж/(кг·К);  $\rho_{\text{тб}}$  – плотность материала, на поверхность которого разливается СУГ;  $t$  – текущее время (сек), принимаемое равным времени полного испарения СУГ, ( $\leq 3600$ сек);  $Re = \frac{ud}{\nu_b}$ , где  $u$  – скорость воздушного потока, м/с;  $d = \sqrt{\frac{4F_n}{\pi}}$  – характерный размер пролива СУГ, м;  $\nu_b$  – кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_b$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К).

Таблица 3.10.

Скорость воздушного потока в помещении, м/с	Значение коэффициента $\eta$ при температуре $t, ^\circ\text{C}$ , воздуха помещения				
	10	15	20	30	35
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
1,0	10,0	8,7	7,7	5,6	4,6

Формула справедлива для  $T_{\text{уг}} \leq T_{\text{кип}}$ . Если  $T_{\text{уг}} \geq T_{\text{кип}}$ , то дополнительно рассчитывается масса по формуле:

$$m_{\text{пер}} = \min \left\{ 0,8 \cdot m_n ; \frac{2c_p (T_s - T_{\text{кип}})}{L_{\text{исп}}} \cdot m_n \right\}.$$

Расчет горизонтальных размеров зон, м, ограничивающих газо- и паровоздушные смеси с концентрацией горючего выше нижнего концентрационного предела распространения пламени  $C_{\text{нкр}}$ , % (об.), при аварийном поступлении горючих газов и паров ненагретых

легковоспламеняющихся жидкостей в открытое пространство, определяют по формулам (для случая, когда размеры зон достигают максимальных значений, а именно при неподвижной воздушной среде):

- для горючих газов (ГГ):

$$R_{\text{нкпр}} = 14,5632 \cdot \left( \frac{m_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}} \cdot C_{\text{нкпр}}} \right)^{0,333},$$

- для паров ненагретых легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ):

по горизонтали:

$$R_{\text{нкпр}} = 3,1501 \cdot \sqrt{K} \cdot \left( \frac{P_{\text{н}}}{C_{\text{нкпр}}} \right)^{0,813} \cdot \left( \frac{m_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} \cdot P_{\text{н}}} \right)^{0,333}; \rho_{\text{г,п}} = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_{\text{п}})},$$

по вертикали:

$$Z_{\text{нкпр}} = 0,12 \cdot \sqrt{K} \cdot \left( \frac{P_{\text{н}}}{C_{\text{нкпр}}} \right)^{0,813} \cdot \left( \frac{m_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} \cdot P_{\text{н}}} \right)^{0,333},$$

где  $m_{\text{г}}$  – масса поступивших в открытое пространство ГГ при аварийной ситуации, кг;  $\rho_{\text{г}}$  – плотность ГГ при расчетной температуре  $t_{\text{п}}$ , °С и атмосферном давлении, кг/м<sup>3</sup>;  $m_{\text{п}}$  – масса паров ЛВЖ, поступивших в открытое пространство за время полного испарения, но не более 3600 сек, кг;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность паров ЛВЖ при расчетной температуре и атмосферном давлении;  $P_{\text{н}}$  – давление насыщенных паров ЛВЖ при расчетной температуре, кПа;  $K$  – коэффициент, принимаемый равным  $K = T/3600$  для ЛВЖ;  $T$  – продолжительность поступления паров ЛВЖ в открытое пространство, сек;  $M$  – молярная масса, кг/кмоль;  $V_0$  – мольный объем, равный 22,413 м<sup>3</sup>/кмоль;

В качестве расчетной температуры следует принимать максимально возможную температуру воздуха в соответствующей климатической зоне или максимально возможную температуру воздуха по технологическому регламенту с учетом возможного повышения температуры в аварийной ситуации. Если такого значения расчетной температуры  $t_{\text{п}}$  по каким-либо

причинам определить не удастся, допускается принимать ее равной  $61\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Значения  $R_{\text{нкпр}}$ ,  $Z_{\text{нкпр}}$  должны быть приняты не менее 0,3 м.

Размер области поражения продуктами сгорания при пожаре-вспышке принимается равным:

$$R = E^{1/3} \cdot R_{\text{нкпр}},$$

где  $E$  - объемный коэффициент расширения продуктов сгорания (для предельных углеводородов  $E \approx 7$ ).

Горизонтальный размер взрывоопасной зоны по направлению ветра  $X_{\text{нкпр}}$ , образующийся при истечении СУГ из трубопровода, вычисляют по формуле:

$$X_{\text{нкпр}} = 40 \cdot \left( \frac{G}{U} \right)^{0,5},$$

где  $G$  – массовая скорость поступления горючего газа в окружающее пространство, кг/с;  $U$  – скорость ветра, м/с (формула справедлива при  $U \geq 1$ ).

**Пример 3.7.** Определить массу газообразного этилена, образующегося при испарении пролива сжиженного этилена в условиях аварийной разгерметизации резервуара. Определить размеры зоны, ограниченной нижним концентрационным пределом распространения пламени НКПР паров сжиженного этилена при его испарении с поверхности пролива.

**Данные для расчета.** Изотермический резервуар сжиженного этилена объемом  $V = 1000\text{ м}^3$  установлен в бетонном обваловании со свободной площадью  $F_{\text{об}} = 5184\text{ м}^2$  и высотой отбортовки  $H_{\text{об}} = 2,2\text{ м}$ . Степень заполнения резервуара  $\alpha = 0,95$ . Диаметр отводящего трубопровода  $d_t = 0,25\text{ м}$ . Длина участка трубопровода от резервуара до автоматической задвижки, вероятность отказа которой превышает  $10^{-6}$  в год,  $L = 1\text{ м}$ . Максимальный расход сжиженного этилена в режиме выдачи  $G = 3,1944$  кг/с. Плотность сжиженного этилена при температуре эксплуатации  $T_{\text{гi}} = 169,5\text{ К}$ ,  $\rho_{\text{гi}} = 568\text{ кг/м}^3$ . Плотность газообразного этилена при температуре эксплуатации  $\rho_{\text{г}} = 2,0204\text{ кг/моль}$ . Молекулярная масса

сжиженного этилена  $M = 28 \cdot 10^{-3}$  кг/моль. Мольная теплота испарения сжиженного этилена при температуре эксплуатации  $L_{isp} = 1,344 \cdot 10^4$  Дж/моль. Температура бетона равна максимально возможной температуре воздуха в соответствующей климатической зоне  $T_b = 309$  К. Коэффициент теплопроводности бетона  $\lambda = 1,5$  Вт/(м·К). Коэффициент температуропроводности бетона  $a = 8,4 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с. Минимальная скорость воздушного потока  $U = 0$  м/с, а максимальная для данной климатической зоны  $U = 5$  м/с. Кинематическая вязкость воздуха при расчетной температуре воздуха равна  $\nu_B = 1,64 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с. Коэффициент теплопроводности воздуха;  $t_t$  - текущее время, принимаемое равным времени полного испарения;  $L_{is}$  - удельная теплота испарения жидкости при температуре перегрева жидкости  $T_s$ , Дж/кг;  $T_{кр}$  - нормальная температура кипения жидкости, К;  $m_p$  - масса вышедшей перегретой жидкости, кг;  $C_p$  - удельная теплоемкость жидкости при температуре перегрева жидкости,  $T_s$ , Дж/(кг·К).

$$\begin{aligned}
 V &:= 10000 & F_{ob} &:= 5184 & N_{ob} &:= 2.2 & \alpha &:= 0.95 & dt &:= 0.25 & L &:= 1 & G &:= 3.194 \\
 \rho_{gi} &:= 568 & \rho_g &:= 2.0204 & M &:= 28.05 \cdot 10^{-3} & L_{isp} &:= 1.344 \cdot 10^4 & T_b &:= 309 \\
 T_{gi} &:= 169.5 & \lambda &:= 1.5 & a &:= 8.4 \cdot 10^{-8} & \nu_B &:= 1.64 \cdot 10^{-5} & \lambda_B &:= 2.74 \cdot 10^{-2} \\
 t &:= 120 & t_t &:= 3600 & I &:= 0
 \end{aligned}$$

При разрушении изотермического резервуара объем сжиженного этилена, м<sup>3</sup> составит:

$$V_g := \alpha \cdot V + \frac{G \cdot t}{\rho_{gi}} + \frac{\pi \cdot dt^2}{4} \cdot L \quad V_g = 9.50072 \times 10^3$$

Свободный объем обвалования:

$$V_{ob} := F_{ob} \cdot N_{ob} \quad V_{ob} = 1.14048 \times 10^4$$

Так как  $V_g < V_{ob}$ , то за площадь испарения примем

$$F_{isp} := F_{ob} \quad F_{isp} = 5.184 \times 10^3$$

$$U := \begin{cases} 0 & \text{if } I = 0 \\ 5 & \text{if } I = 1 \end{cases}$$

Характерный размер пролива, м:

$$d := \sqrt{\frac{4 \cdot F_{isp}}{\pi}} \quad d = 81.243$$

Тогда масса испарившегося этилена с площади пролива при скорости воздушного потока 0 м/с составит (если  $T_{gi} \leq T_{kip}$ ):

$$M_{sug} := F_{isp} \cdot \frac{M}{L_{isp}} \cdot (T_b - T_{gi}) \cdot \left( 2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{tt}{\pi \cdot a}} + \frac{5.1 \cdot \sqrt{\frac{U \cdot d}{v_B}} \cdot \lambda_B \cdot tt}{d} \right) \quad M_{sug} = 5.288 \times 10^5$$

Масса испарившегося этилена с площади пролива при скорости воздушного потока 5 м/с составит (если  $T_{gi} \leq T_{kip}$ ):

$$M_{sug} = 5.754 \times 10^5$$

При температуре СУГ  $T_{gi} > T_{kip}$  дополнительно рассчитывается масса перегретых СУГ:

$$m_{per} := \min \left[ 0.8 \cdot m_p, \frac{[2 \cdot C_p \cdot (T_s - T_{kip})]}{L_{is}} \cdot m_p \right]$$

$$M_{sug} := \begin{cases} M_{sug} & \text{if } T_{gi} \leq T_{kip} \\ ((M_{sug} + m_{per})) & \text{if } T_{gi} > T_{kip} \end{cases}$$

Масса пролитого сжиженного этилена при скорости воздушного потока 0 м/с составляет 528848 кг. Величина  $C_{нкпр} = 2,7\%$ (об.). Давление насыщенных паров при температуре кипения  $P_n = 101,3$ кПа. Молекулярная масса воздуха 29,5 г/моль. Плотность воздуха при температуре  $T_o = 273,15$ К составляет 1,29 кг/моль. Тогда плотность паров этилена при температуре кипения 169,5 К составляет:

$$C_{нкпр} := 2.7 \quad P_n := 101.3 \quad \rho_B := 1.29 \quad T_o := 273.15 \quad M_B := 29.5$$

$$\rho_p := \rho_B \cdot \frac{M \cdot 10^3 \cdot T_o}{M_B \cdot T_{gi}} \quad \rho_p = 1.977$$

Размеры взрывоопасной зоны по горизонтали и вертикали для паров этилена, м, ограничивающие область концентраций, превышающих НКПР, составят:

$$R_{nkpr} := 3.1501 \cdot \sqrt{K} \cdot \left( \frac{P_n}{C_{nkpr}} \right)^{0.813} \cdot \left( \frac{M_{sug}}{\rho_p \cdot P_n} \right)^{0.33} \quad R_{nkpr} = 807.935$$

$$Z_{nkpr} := 0.12 \cdot \sqrt{K} \cdot \left( \frac{P_n}{C_{nkpr}} \right)^{0.813} \cdot \left( \frac{M_{sug}}{\rho_p \cdot P_n} \right)^{0.33} \quad Z_{nkpr} = 30.778$$

Размер области поражения продуктами сгорания:

$$E := 7$$

$$R := E^{\frac{1}{3}} \cdot R_{nkpr} \quad R = 1.546 \times 10^3$$

### 3.5.3.2. Образование паровоздушного облака

В модели принимается, что паровоздушное облако представляет собой совокупность элементарных паровоздушных объемов, дрейфующих по ветру. Распределение концентраций горючего пара в каждом из этих объемов описывается Гауссовской моделью с дисперсиями, зависящими от пройденного облаком расстояния. Результирующее поле концентраций тяжелого пара представляет собой суперпозиции распределений концентраций элементарных объемов.

Концентрация  $C$  (кг/м<sup>3</sup>) тяжелого пара в точке с координатами  $x, y, z$  описывается выражением:

$$C(x, y, z) = \frac{Q_j}{(2\pi)^{3/2} \cdot \sigma_{yj}^2 \cdot \sigma_{zj}} \cdot \exp \left\{ - \left[ \frac{(x - x_j)^2}{2\sigma_{yj}^2} + \frac{y^2}{2\sigma_{yj}^2} + \frac{z^2}{2\sigma_{yj}^2} \right] \right\},$$

где  $Q_j$  – масса тяжелого пара в  $j$ -ом элементарном объеме (кг), описываемая соотношением:

$$Q_j = W_j \cdot F \cdot \tau_j,$$



$W_j$  – интенсивность испарения при образовании  $j$ -го объема, кг/(м<sup>2</sup>с);  $F$  – площадь испарения, м<sup>2</sup>;  $\tau_j$  – время образования  $j$ -го элементарного объема, с;  $x_j$  – координата центра  $j$ -го элементарного объема, м, вычисляемая по формуле:

$$x_j = u_d \cdot t_j,$$

где  $u_d$  – скорость дрейфа  $j$ -го элементарного объема (м/с), принимаемая равной скорости ветра;  $t_j$  – время существования  $j$ -го элементарного объема, с;  $\sigma_{yj}, \sigma_{zj}$  – дисперсии для распределения концентраций тяжелого газа в  $j$ -ом элементарном объеме в горизонтальном и вертикальном направлении, м, описываемые эмпирическими выражениями:

$$\begin{aligned}\sigma_{yj} &= 0,7 \cdot (x - x_j)^{0,7}, \\ \sigma_{zj} &= 0,44 \cdot (x - x_j)^{0,7}.\end{aligned}$$

Величины  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  зависят от класса устойчивости атмосферы по Паскуилу. Однако влияние класса устойчивости наиболее существенно при малых концентрациях горючего пара (например, в задачах, где изучается токсическое воздействие паров жидкости). При решении задач оценки поражающего действия взрыва паровоздушного облака и пожаровспышки представляют интерес части облака с концентрациями горючего пара выше нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР), который для практически всех нефтепродуктов составляет около 40 г/м<sup>3</sup>. При столь высоких концентрациях влияние класса устойчивости атмосферы относительно невелико. Выражения для дисперсий получают по известным экспериментальным данным и используют в описанной модели при сравнении с экспериментом, выполненном в совершенно других погодных условиях.

Для решения ряда практических задач представляет интерес знать горизонтальный размер взрывоопасной зоны (зоны, ограничивающей

паровоздушное облако по уровню НКПР)  $x_{\text{нкпр}}$ . Величина  $x_{\text{нкпр}}$  (м) может быть найдена по эмпирической формуле:

$$x_{\text{нкпр}} = 40 \cdot \left( \frac{G}{\rho \cdot u_d} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где  $G$  – массовая скорость поступления горючих паров в атмосферу (кг/с), описываемая соотношением:

$$G = W \cdot F.$$

Исходные данные:

- координаты точки, в которой рассчитывают концентрацию;
- интенсивность испарения жидкости;
- площадь испарения;
- время образования элементарного парового объема;
- скорость ветра;
- время начала испарения.

Выходные данные:

- концентрация паров в заданной точке пространства;
- размер взрывоопасной зоны по направлению ветра.

#### *3.5.4. Модели оценки интенсивности теплового излучения*

Интенсивность теплового излучения рассчитывают для двух случаев пожара (или для того из двух случаев, который может быть реализован в данной технологической установке):

- а) пожар проливов ЛВЖ, ГЖ или горение твердых горючих материалов (включая горение пыли);
- б) «огненный шар» - крупномасштабное диффузионное горение, реализуемое при разрыве резервуара с горючей жидкостью или газом под давлением с воспламенением содержимого резервуара.

Если возможна реализация обоих случаев, то при оценке значений критерия пожарной опасности учитывается наибольшая из двух величин интенсивности теплового излучения.

#### 3.5.4.1. Пожар пролива

При нарушении герметичности сосуда, содержащего сжиженный горючий газ или жидкость, жидкость (или ее часть) может заполнить поддон или обваловку, растечься по поверхности грунта или заполнить какую-либо естественную впадину.

Глубину заполнения поддона или обваловки  $h$ , м, можно найти как

$$h = \frac{m_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} F_{\text{под}}},$$

где  $m_{\text{ж}}$  – масса разлившейся жидкости;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность разлившейся жидкости;  $F_{\text{под}}$  – площадь поддона.

При авариях в системах, не имеющих защитных ограждений, происходит растекание жидкости по грунту и (или) заполнение естественных впадин. Обычно при растекании на грунт площадь разлива ограничена естественно и искусственно созданными границами (дороги, дренажные канавы и т.п.), а если такая информация отсутствует, то для приближенных расчетов принимают толщину разлившегося слоя равной  $h = 0,05$  м и определяют площадь разлива,  $\text{м}^2$ , по формуле

$$F_{\text{раз}} = \frac{m_{\text{ж}}}{h \cdot \rho_{\text{ж}}}.$$

По результатам экспериментов с жидким метаном и азотом компания «Газ де Франс» предлагает следующие значения  $h$  (табл.3.11).

При заполнении естественной впадины, имеющей форму сферического сегмента, глубину разлитого слоя жидкости  $h$  можно найти из выражения

$$V = \frac{1}{6} \cdot \pi h (3R_3^2 + h^2),$$

а текущую величину «смоченной» поверхности грунта по формуле

$$S = 2\pi R_3 h,$$

где  $R_3$  – радиус зеркала жидкости;  $R_c$  – радиус сферического сегмента.

Таблица 3.11

Толщина слоя разлившегося сжиженного газа,  $h$ , м.

Характер поверхности	$h \cdot 10^2$ , м
Бетонная	0,3
Водная	1,0
Гравий	5,0
Влажная песчаная	15,0
Сухая песчаная	20,0

Геометрические параметры пламени пожара разлития можно определить по формуле Томаса

$$\frac{L}{D} = a \cdot \left[ \frac{m_{\text{выг}}}{\rho_B \sqrt{g \cdot D}} \right]^{b \cdot W_B^c} \cdot W_B,$$

где  $L$  – высота пламени пожара разлития;  $D$  – диаметр зеркала разлива;  $\rho_B$  – плотность воздуха;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $W_B = \omega / \sqrt[3]{m_{\text{выг}} g \cdot D / \rho_{\text{п}}}$ ;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность пара;  $c$  – эмпирический коэффициент равный 0,21;  $\omega$  – скорость ветра;  $m_{\text{выг}}$  – массовая скорость выгорания.

Эмпирические коэффициенты в формуле Томаса ( $a = 55$ ;  $b = 0,67$ ;  $c = - 0,21$ ) получены по результатам экспериментов, выполненных для широкого диапазона изменения параметров

$$10^{-3} \leq L/D \leq 10; \quad 10^{-6} \leq m_{\text{выг}} / (\rho_B \sqrt{gD}) \leq 10^{-2}.$$

Скорость выгорания жидкостей определяют, как правило, экспериментально. Для экспертной оценки скорости выгорания, можно воспользоваться эмпирической формулой

$$m_{\text{выг}} = \frac{c \cdot \rho_{\text{ж}} Q_p^H}{L_{\text{исп}}},$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости;  $Q_p^H$  – низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг;  $L_{\text{исп}}$  – теплота испарения жидкости, Дж/кг;  $c = 1,25 \cdot 10^{-6}$  м/с (получено путем

обработки многочисленных экспериментальных данных по выгоранию большинства органических жидкостей и их смесей).

Интенсивность теплового излучения  $q$ , кВт/м<sup>2</sup>, для пожара в результате пролива жидкости или при горении твердых материалов вычисляют по формуле:

$$q = E_f F_q \tau,$$

где  $E_f$  – среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени, кВт/м<sup>2</sup>;  $F_q$  – угловой коэффициент облученности;  $\tau$  – коэффициент пропускания атмосферы.

Значение  $E_f$  – принимается на основе имеющихся экспериментальных данных. Для некоторых жидких углеводородных топлив указанные данные приведены в таблице.3.12. При отсутствии данных допускается принимать величину  $E_f$  равной: 100 кВт/м<sup>2</sup> – для СУГ; 40 – для нефтепродуктов; 40 – для твердых материалов.

Рассчитывается эффективный диаметр пролива жидкости  $d$ , м:

$$d = \sqrt{\frac{4F}{\pi}}, F - \text{площадь пролива жидкости, м}^2.$$

Вычисляют высоту пламени  $H$ , м:

$$H = 42 \cdot d \cdot \left( \frac{m}{\rho_v \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0.61},$$

где  $m$  – удельная массовая скорость выгорания топлива, кг/(м<sup>2</sup>сек), допускается принимать величину  $m$  равной для бензина – 0,06; для дизтоплива – 0,04;  $\rho_v$  – плотность окружающего воздуха, кг/м<sup>3</sup> (1,2047 при 20 градусах Цельсия);  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

Табл.3.12. Среднеповерхностная плотность излучения пламени в зависимости от диаметра очага и удельной массовой скорости выгорания для некоторых жидких углеводородных топлив.

Топливо	$E_f, \text{кВт}/\text{м}^2$					$m, \text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$
	$d, \text{м}$					
	10	20	30	40	50	
СПГ (метан)	220	180	150	130	120	0,08
СУГ (пропан-бутан)	80	63	50	43	40	0,10
Бензин	60	47	35	28	25	0,06
Дизельное топливо	40	32	25	21	18	0.04
Нефть	25	19	15	12	10	0.04

**Примечание.** Для диаметров очага менее 10 или более 50 м следует принимать величину  $E_f$  такой же, как и для очагов диаметром 10 и 50 м соответственно.

Затем определяется угловой коэффициент облученности  $F_q$  :

$$F_q = \sqrt{F_y^2 + F_n^2},$$

где  $F_y, F_n$  – факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок, соответственно, определяется с помощью выражений:

$$F_y = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{S} \arctg\left(\frac{h}{\sqrt{S^2 - 1}}\right) + \frac{h}{S} \left\{ \arctg\left(\sqrt{\frac{S-1}{S+1}}\right) - \frac{A}{\sqrt{A^2 - 1}} \arctg\left(\sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}}\right) \right\} \right];$$

$$F_n = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{(B-1/S)}{\sqrt{B^2 - 1}} \arctg\left(\sqrt{\frac{(B+1)(S-1)}{(B-1)(S+1)}}\right) - \frac{(A-1/S)}{\sqrt{A^2 - 1}} \arctg\left(\sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}}\right) \right];$$

$$A = (h^2 + S^2 + 1)/(2 \cdot S); \quad B = (1 + S^2)/(2 \cdot S); \quad S = 2 \cdot r/d; \quad h = 2 \cdot H/d,$$

где  $r$  – расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта, м.

Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau$  определяют по формуле:

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

#### Перечень исходных данных:

- среднеповерхностная интенсивность теплового излучения;
- площадь пролива;
- удельная массовая скорость выгорания ЛВЖ (ГЖ);
- плотность окружающего воздуха;

- расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта.

**Перечень выходных данных:**

- интенсивность теплового излучения.

**Область применения:**

$$E_f = (10 - 200) \text{кВт} / \text{м}^2; F = (1 - 10000) \text{м}^2; m = (0,01 - 0,1) \text{кг} / (\text{м}^2 \text{с});$$

$$\rho_B = (1,1 - 1,3) \text{кг} / \text{м}^3; r = (1 - 1000) \text{м} \quad (r > d / 2).$$

*3.5.4.2. Тепловые характеристики огненного шара*

Возникновение огненных шаров возможно при повреждениях и разрушениях резервуаров и сосудов с горючими жидкими перегретыми продуктами с их выбросом в атмосферу. Обычно огненный шар, расширяясь, весьма быстро достигает максимума своего радиуса, который затем сохраняется в течение всего времени существования шара.

При аварийном вскрытии газопроводов и емкостей, разливах углеводородов и их испарении облако ГПВС, переобогащенное топливом, не детонирует, а интенсивно горит, образуя огненный шар. Большая вероятность такого процесса обусловлена также тем, что для большинства углеводородов концентрационные пределы воспламенения их ГПВС шире, чем детонации.

Поражающее действие огненного шара определяется интенсивностью его теплового излучения. Возникновение огненных шаров возможно при разрушениях резервуаров и сосудов с горючими жидкостями перегретыми продуктами (сжиженные углеводородные газы, аммиак, хлор, фреоны, содержащиеся в замкнутых объемах при повышенном давлении).

При разрушении системы с перегретой жидкостью происходит ее разлив и быстрое испарение. Взрывной характер процесса объясняется кратковременностью аварийного вскрытия сосудов, резервуаров и другого оборудования, содержащих продукт под давлением. Например, время

полного разрушения сосуда объемом  $V=100 \text{ м}^3$  при давлении 1 МПа составляет 7 мс.

Время образования парового облака, с, можно определить по формуле

$$\tau_0 \approx 0,78 \cdot \sqrt[3]{V(k \cdot n - 1)} / a,$$

где  $V$  – объем жидкого продукта,  $\text{м}^3$ ;  $n = \rho_{\text{сж}} / \rho$  – отношение плотностей жидкости и парового облака при его расширении до объема с предельным радиусом  $R_c$ , соответствующего атмосферному давлению;  $a$  – скорость звука, м/с, с которой смещается внешняя граница облака до значения  $R_c = a \cdot \tau_0, \text{м}$ ;  $k$  – доля быстро испаряющейся жидкости в адиабатическом режиме при температуре  $T$ .

Например, для  $V=100 \text{ м}^3$  сжиженного под давлением пропана  $n = 582/1,3 = 448$ ; при  $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$   $k=0,38$ ;  $a=300 \text{ м/с}$

$$\tau_0 = 0,78 \cdot \sqrt[3]{100(0,38 \cdot 448 - 1)} / 300 = 0,067 \text{ с.}$$

Обычно огненный шар весьма быстро достигает максимума своего радиуса  $R_0$ , который сохраняется в течение всего времени существования шара.

В ряде работ приведены следующие подтвержденные экспериментально формулы для радиуса  $R_0, \text{м}$  и времени существования  $t_s, \text{с}$ , огненного шара

$$R_0 = \frac{1}{2} A_1 M^\alpha, \quad t_s = A_2 M^\beta,$$

где  $M$  – масса испарившегося продукта, кг;  $A_1, A_2, \alpha, \beta$  – коэффициенты.

Для различных энергоносителей (боеприпасы, жидкие ракетные топлива, сжиженный нефтяной газ – СНГ) значения коэффициентов достаточно близки:

$$A_1 = 3,76 \dots 3,86; \quad A_2 = 0,258 \dots 0,299;$$

$$\alpha = 0,325 \dots 0,320; \quad \beta = 0,349 \dots 0,320.$$

Для нефтяного газа эти данные соответствуют огненному шару диаметром 180 м, образовавшемуся при разливе 68 т сжиженного газа при аварии автоцистерны.



Температура огненного шара  $\theta$  зависит от типа вещества. Так при горении ракетных топлив  $\theta \approx 2500\text{K}$ , горючих газов  $\theta \approx 1350\text{K}$ . Для небольших огненных шаров, образуемых при взрывах пропана, пентана и октана в воздухе ( $M \leq 10\text{кг}$ ) экспериментально получены значения констант  $A_2 = 1,07, \beta = 0,181$ .

В практических расчетах для веществ, сгорающих с образованием газообразных продуктов (при среднем значении теплоты сгорания  $47\text{МДж/кг}$ ), которые наиболее часто приводят к образованию огненных шаров, в /33/ рекомендуется принимать среднее значение температуры  $2300\text{K}$ . При этом расчетные формулы для диаметра  $D$  и времени существования огненного шара приобретают вид:

$$D = 3,97 \cdot \sqrt[3]{M}, \quad t_s = 0,395 \cdot \sqrt[3]{M}.$$

Воспламеняющее и поражающее действие огненного шара определяется параметрами его теплового излучения: величиной теплового потока и импульсом теплового излучения, т.е. поражающее действие теплового излучения определяется тепловой энергией, приходящейся на единицу поверхности на конкретном расстоянии  $r$  от центра огненного шара. Зависимость величины теплового потока  $q$ ,  $\text{Вт/м}^2$ , от расстояния  $r$ , м, до центра огненного шара с радиусом  $R_0$  дается соотношением

$$\frac{q}{\theta^4} = \frac{G(2R_0/r)^2}{F + (2R_0/r)^2},$$

где  $F = 161,7$ ;  $G = 5,26 \cdot 10^{-5}$  - константы.

Величина тепловой энергии (доза или импульс теплового излучения), падающей на единицу поверхности,  $Q$ ,  $\text{Дж/м}^2$ , определяется интегрированием функции для  $q$ . Принимая  $R_0$  и  $\theta$  за константы, получено  $b \cdot G = 2,04 \cdot 10^4$ :

$$\frac{Q}{bG\sqrt[3]{M\theta^2}} = \frac{(2R_0/r)^2}{F + (2R_0/r)^2}.$$

Приняв  $T = 2300\text{K}$ , можно переписать эту формулу в виде функции  $Q = Q/\sqrt[3]{M}$ ,  $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{1/3})$ , безразмерного аргумента  $K = D/R)^2$ :

$$Q = 3,55 \cdot 10^3 \cdot K / (161,7 + K).$$

По методике (Dow Chemical, США), данные по огненному шару от сгорания ГПВС при выбросах сжиженного нефтяного газа из емкостей следующие:

$$\text{радиус огненного шара } R_0, \text{ м, } R_0 = 29 \cdot \sqrt[3]{M},$$

$$\text{время его существования } t_s, \text{ с, } t_s = 4,5 \cdot \sqrt[3]{M},$$

где  $M$  – половина вместимости емкости по массе, т.

Подставляя значения полной массы  $M$ , кг, были получены /17/ выражения:

$$D = 4,6 \cdot \sqrt[3]{M}, \quad t_s = 0,357 \cdot \sqrt[3]{M},$$

которые оказались достаточно близкими к приведенным выше.

При наличии группы из **трех резервуаров** за величину  $M$  принимается 90% вместимости.

Поток излучения  $q$ , кВт/м<sup>2</sup>, падающий на мишень, определяется по формуле

$$q = E \cdot F \cdot T_p,$$

где  $E$  – мощность поверхностной эмиссии огненного шара, кВт/м<sup>2</sup> (для баллонов, вертикальных и горизонтальных  $E = 270$  кВт/м<sup>2</sup>, для сосудов шарообразной формы  $E = 200$  кВт/м<sup>2</sup>);  $F$  – коэффициент, учитывающий фактор угла падения;  $T_p$  – проводимость воздуха.

Коэффициент  $F$  и проводимость  $T_p$  определяются по формулам:

$$F = \frac{R_0^2 \cdot r}{\left[ (R_0^2 + r^2)^{\frac{3}{2}} \right]} = \frac{2 \cdot K}{\sqrt{(K + 4)^3}}, K = \left( \frac{2 \cdot R_0}{r} \right)^2; \quad T_p = 1 - 0,058 \ln(r),$$

где  $r > 2 \cdot R_0 = D$  – расстояние по горизонтали от хранилища СНГ.

Импульс теплового излучения  $Q$ , кДж/м<sup>2</sup>, определяется по формуле

$$Q = q \cdot t_s.$$

При  $E = 270$  кВт/м<sup>2</sup> формулы для потока излучения  $q$  и импульса  $Q$  принимают вид:

$$q = 540 \cdot T_p \cdot \frac{K}{\sqrt{(K+4)^3}}; \quad Q = \frac{Q}{\sqrt[3]{M}} = 0,357 \cdot E \cdot F \cdot T_p = 192,8 \cdot T_p \cdot \frac{K}{\sqrt{(K+4)^3}}.$$

**Пример.3.8.** Определить характеристики огненного шара, образованного при выбросе сжиженного пропана ( $M = 10,8$  кг), и параметры тепловой радиации на различных расстояниях от эпицентра.

При детонации газозвушной смеси облака параметры ударной волны в энергетических координатах определяют в функциях параметра  $\lambda$  /17,22/:

$$\lambda(R, E) = \frac{R}{\sqrt[3]{E}}, \quad (\lambda \geq \lambda_{кр} = 0,33),$$

где  $R$ , м, - расстояние от центра взрыва облака вблизи земной поверхности;  $\lambda_{кр}$  - значение параметра  $\lambda$  на границе облака;  $E$ , МДж,- эффективный энергозапас, определяемый удельной теплотой  $q_r$  взрывного превращения топлива в облаке:

$$E = 2 \cdot M \cdot q_r, \quad q_r = 44 \cdot \beta,$$

где  $M$ , кг, - масса топлива;  $\beta$  - коэффициент типа топлива (см. табл. /16,22/).

Результаты расчета в диапазоне от 4 до 40 м:

$$M := 10.8 \quad E := 270 \quad \beta := 1.05 \quad R := 4,4.1 .. 40$$

$$D := 4.6 \cdot \sqrt[3]{M} \quad D = 10.2 \quad ts := 0.357 \cdot \sqrt[3]{M} \quad ts = 0.79$$

$$Es := 44 \cdot \beta \cdot M \quad Es = 498.96 \quad \lambda(R) := \frac{R}{\sqrt[3]{Es}} \quad Tp(R) := 1 - 0.058 \cdot \ln(R)$$

$$K(R) := \left(\frac{D}{R}\right)^2 \quad F(R) := \frac{2 \cdot K(R)}{\sqrt{(K(R) + 4)^3}} \quad q(R) := E \cdot F(R) \cdot Tp(R)$$

$$Q(R) := q(R) \cdot ts$$

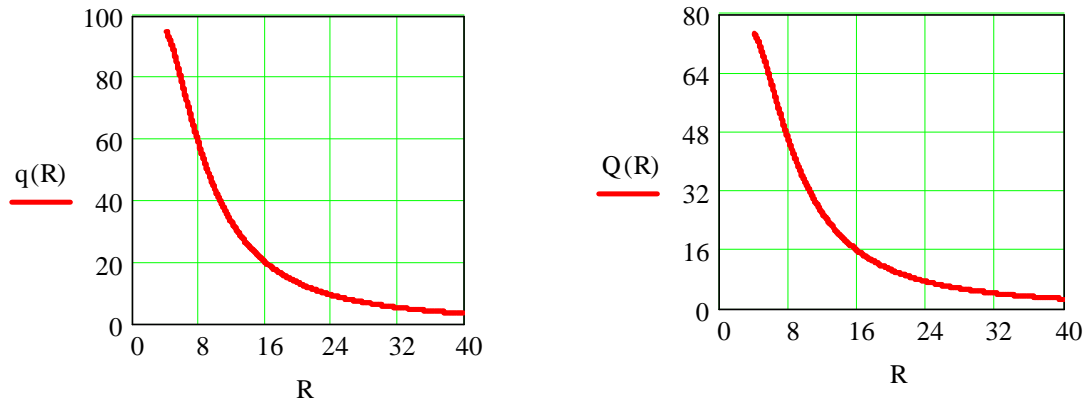


Рис.3.11. Графики зависимости потока излучения и импульса теплового излучения при выбросе сжиженного пропана массой 10,8 кг.

Интенсивность теплового излучения для огненного шара также вычисляется по формуле

$$q = E_f F_q \tau,$$

где величину  $E_f$  определяют на основе имеющихся экспериментальных данных (допускается принимать эту величину равной **450** кВт/м<sup>2</sup>).

Значение  $F_q$  вычисляют по формуле

$$F_q = \frac{H/D_{\text{эфф.}} + 0,5}{4 \cdot [(H/D_{\text{эфф.}} + 0,5)^2 + (r/D_{\text{эфф.}})^2]^{1,5}},$$

где  $H$  – высота центра «огненного шара», м;  $D_{\text{эфф.}}$  – эффективный диаметр «огненного шара», м;  $r$  – расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром «огненного шара», м.

Эффективный диаметр шара, м, и время существования шара, сек, определяются как:

$$D_{\text{эфф.}} = 5,33 \cdot m^{0,327}; \quad t_{\text{ш}} = 0,92 \cdot m^{0,303},$$

где  $m$  - масса горючего вещества, кг.

Величину  $H$  определяют в ходе специальных исследований, допускается принимать величину  $H = D_{\text{эфф.}} / 2$ .

Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau$  рассчитывается как:

$$\tau = \exp \left[ -7,01 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \sqrt{r^2 + H^2} - \frac{D_{\text{эфф.}}}{2} \right) \right].$$

**Перечень исходных данных:**

- высота центра "огневого" шара; расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром "огневого" шара; масса ЛВЖ (ГЖ) в "огневом" шаре.

**Перечень выходных данных:**

- интенсивность теплового излучения; время экспозиции.

**Область применения:**

$$H = (0,5-5,0) \cdot D_{\text{эфф.}}; r = (0,5 - 20,0) \cdot D_{\text{эфф.}}; m = 100 - 10000 \text{ кг.}$$

Болевой температурный порог для кожи человека соответствует температуре 44 град. С. При более высокой температуре степень поражения зависит от удельной энергии Q и длительности облучения. Без болевых ощущений кожа выдерживает тепловой поток интенсивностью q=21 кВт/(м\*м) в течение 2 сек. При стационарном потоке этим данным соответствует Q=42 кДж/(м\*м). Предельно безопасный радиус (радиус эвакуации) для человека составляет (3,1-3,6)\*R0.

Табл.3.13. Поражение человека тепловым излучением

Степень ожога	Q, кДж/м <sup>2</sup>	Характер поражения и последствия	
Первая	100...200	Покраснение и припухлость кожи, сопровождающиеся некоторой болезненностью. Работоспособность не теряется. Ожоги быстро заживают.	Санитарные поражения
Вторая	200...400	Образование пузырей, наполненных жидкостью. Потеря работоспособности. Требуется лечение.	Потеря работоспособности. Требуется лечение.
Третья	400...600	Полное разрушение кожного покрова, образование язв. Требуется длительное лечение.	Длительная потеря работоспособности.
Четвертая	Более 600	Омертвление подкожной клетчатки, мышц и костей, обугливание.	Вероятен смертельный исход

Воздействие на открытые участки тела незащищенного человека световых (тепловых) излучений, характерных для воздушных взрывов, может вызвать ожоги четырех степеней в зависимости от величины дозы Q, согласно табл.3.13.

**Пример.3.9.** Расчет поражающих факторов при тепловом излучении в случае возникновения огненного шара и пожара над проливом бензина (для данных примера 3.2 – взрыв паровоздушной смеси над проливом бензина).

### Огненный шар.

Исходные данные:

$$V := 21.5 \quad h := 0.05$$

Масса парогазовой фазы (определяется по таблице 3.7 и зависит от температуры кипения):

$$G := 5$$

Пересчет массы испарившейся жидкости:

$$Mg := G \cdot \frac{V}{50 \cdot h} \cdot \frac{3600}{180} \quad Mg = 860$$

Эффективный диаметр огненного шара  $D$ , м, и время существования огневого шара  $t_s$ , сек:

$$D := 5.33 \cdot Mg^{0.327} \quad D = 48.563 \quad t_s := 0.92 \cdot Mg^{0.303} \quad t_s = 7.128$$

Высота центра «огненного шара» (допускается принимать  $D/2$ ):

$$H := \frac{D}{2} \quad H = 24.282$$

Определяется угловой коэффициент облученности:

$$r := 25.. 150$$

$$Fq(r) := \frac{\frac{H}{D} + 0.5}{4 \cdot \left[ \left( \frac{H}{D} + 0.5 \right)^2 + \left( \frac{r}{D} \right)^2 \right]^{1.5}}$$

Коэффициент пропускания атмосферы:

$$\tau(r) := \exp \left[ -7.0 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \sqrt{r^2 + H^2} - \frac{D}{2} \right) \right]$$

$$E_f := 450$$

Интенсивность теплового излучения для огненного шара, кВт/м<sup>2</sup>:

$$Q(r) := E_f \cdot F_q(r) \cdot \tau(r)$$

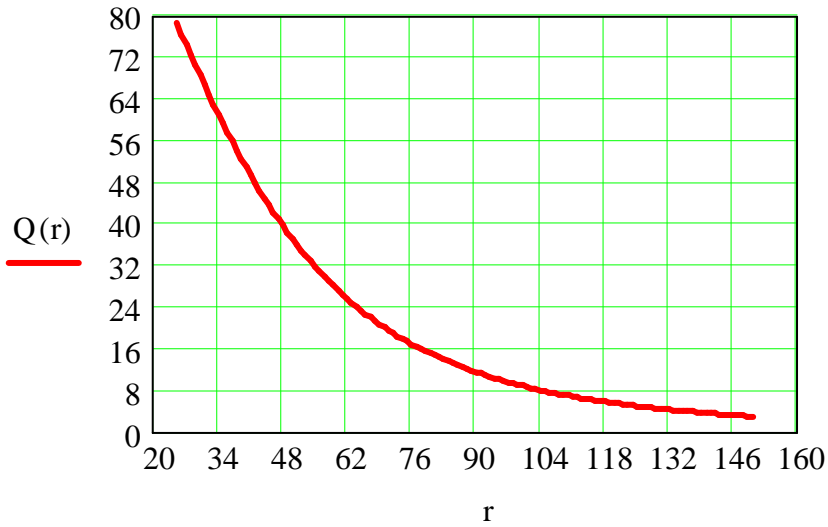


Рис.3.12. Интенсивность теплового излучения  $Q$  (кВт/м<sup>2</sup>) при возникновении огневого шара в зависимости от расстояния, м.

Безопасное расстояние от места расположения человека до зоны, где интенсивность теплового излучения не превышает 4 кВт/м<sup>2</sup>:

$$Q(135) = 4.032$$

Порог боли, сек: 
$$\tau(r) := \left( \frac{35}{Q(r)} \right)^{1.33}$$

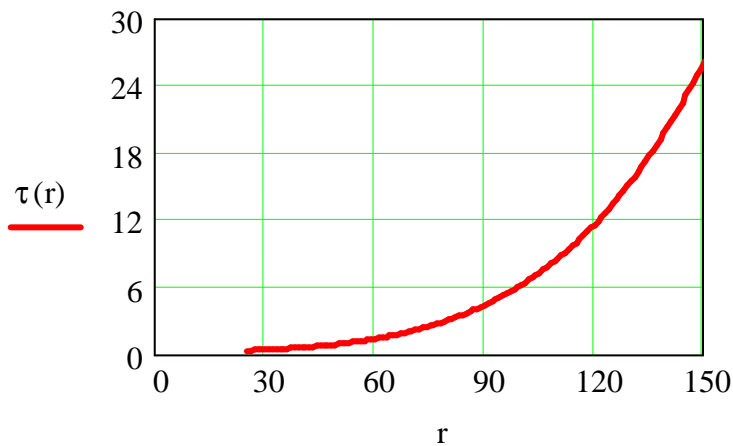


Рис.3.13. Зависимость порога боли от расстояния

Условная вероятность поражения человека тепловым излучением:

Определяется эффективное время экспозиции  $t$ , сек:

$$u := 5 \quad t_0 := 5 \quad t(r) := t_0 + \frac{135}{u}$$

Здесь  $t_0$  - характерное время обнаружения пожара, с (допускается принимать 5 с); 135 - расстояние от места расположения человека до зоны, где интенсивность теплового излучения не превышает 4 кВт/(м\*м);  $u$  - скорость движения человека, м/с (допускается принимать 5 м/с).

Величина "пробит-функция" в зависимости от расстояния:

$$Pr(r) := -14.9 + 2.56 \cdot \ln(t(r) \cdot Q(r)^{1.33})$$

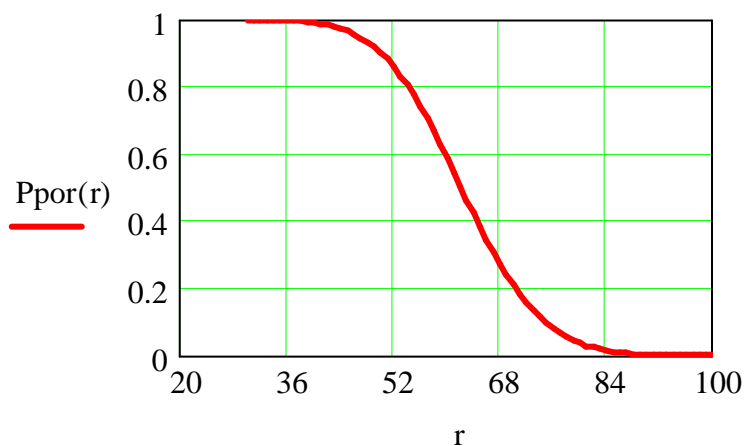


Рис. 3.14. Вероятность поражения человека на определенном расстоянии в результате возникновения огневого шара

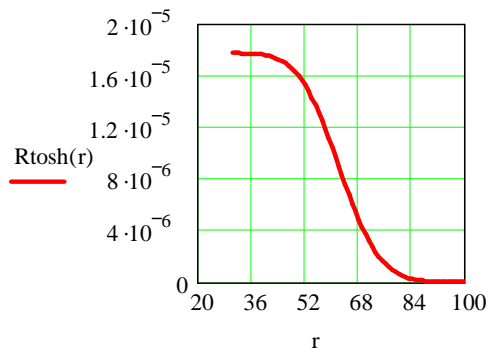
Зависимости территориального и индивидуального рисков в результате возникновения огненного шара вычисляемые по соотношениям

$$R_{tosh}(r) := P_{por}(r) \cdot P_{ck} \cdot P_{sh}$$

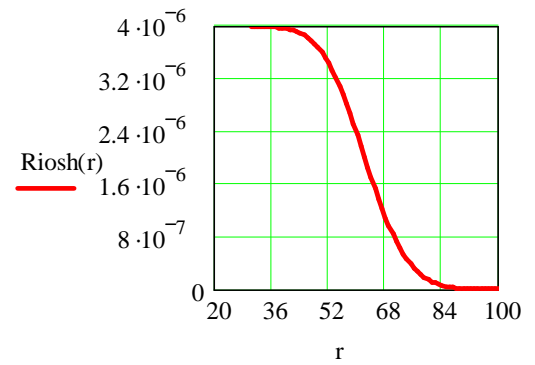
$$R_{iosh}(r) := R_{tosh}(r) \cdot P_n$$

$P_{sh}$  – вероятность возникновения огненного шара, равная 0,704 [67], показаны на рис.3.15





а)



б)

Рис.3.15. Зависимости территориального а) и индивидуального рисков б) от расстояния в результате возникновения огненного шара

На рис.3.16 показана вероятность поражения человеком от ожога третьей степени в результате возникновения огневого шара, вычисленная по соотношению:

$$P_{prt3}(r) := -31.4 + 2.56 \cdot \ln \left[ (1000 \cdot Q(r))^{\frac{4}{3}} \cdot \tau(r) \right]$$

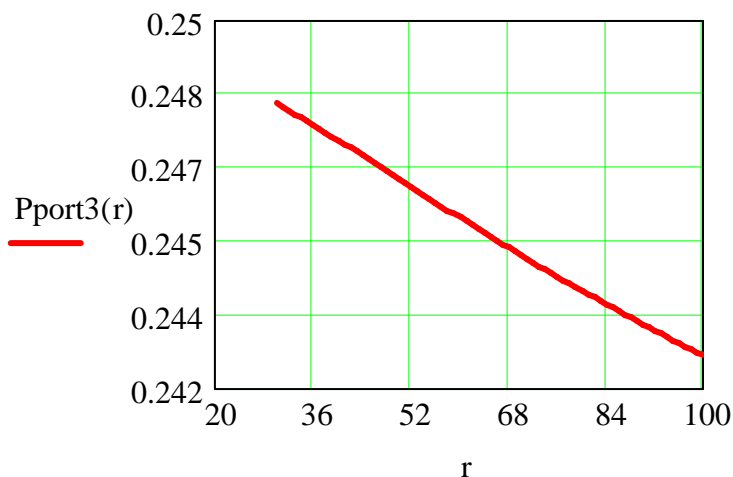


Рис.3.16. Вероятность поражения от ожога третьей степени в зависимости от расстояния при возникновении огневого шара

## Тепловое излучение в результате пролива ЖФ

Исходные данные: площадь пролива F; mb – удельная массовая скорость выгорания; ρ – плотность окружающего воздуха.

$$F := \frac{V}{h} \quad F = 430 \quad mb := 0.06 \quad \rho := 1.2047 \quad g := 9.81$$

Эффективный диаметр пролива жидкости, м:

$$d := \sqrt{\frac{4F}{\pi}} \quad d = 23.399$$

Высота пламени, м:

$$H := 42 \cdot d \cdot \left( \frac{mb}{\rho \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0.61} \quad H = 30.041$$

$$S(r) := \frac{2r}{d} \quad h := \frac{2H}{d} \quad A(r) := \frac{(h^2 + S(r)^2 + 1)}{2S(r)} \quad B(r) := \frac{(1 + S(r)^2)}{2S(r)}$$

Факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок:

$$F_y(r) := \frac{1}{\pi} \cdot \left[ \frac{1}{S(r)} \cdot \operatorname{atan} \left( \frac{h}{\sqrt{S(r)^2 - 1}} \right) - \frac{h}{S(r)} \cdot \left[ \operatorname{atan} \left( \sqrt{\frac{S(r) - 1}{S(r) + 1}} \right) - \frac{A(r)}{\sqrt{A(r)^2 - 1}} \cdot \operatorname{atan} \left[ \sqrt{\frac{(A(r) + 1) \cdot (S(r) - 1)}{(A(r) - 1) \cdot (S(r) + 1)}} \right] \right] \right]$$

$$F_x(r) := \frac{1}{\pi} \cdot \left[ \frac{\left( B(r) - \frac{1}{S(r)} \right)}{\sqrt{B(r)^2 - 1}} \operatorname{atan} \left[ \sqrt{\frac{(B(r) + 1)(S(r) - 1)}{(B(r) - 1)(S(r) + 1)}} \right] - \frac{\left( A(r) - \frac{1}{S(r)} \right)}{\sqrt{A(r)^2 - 1}} \operatorname{atan} \left[ \sqrt{\frac{(A(r) + 1)(S(r) - 1)}{(A(r) - 1)(S(r) + 1)}} \right] \right]$$

Угловой коэффициент облученности:

$$F_q(r) := \sqrt{F_y(r)^2 + F_x(r)^2}$$

Коэффициент пропускания атмосферы:

$$\tau(r) := \exp \left[ -7.0 \cdot 10^{-4} \cdot (r - 0.5 \cdot d) \right]$$

Интенсивность теплового излучения:

$$E_f := 40 \quad Q(r) := E_f \cdot F_q(r) \cdot \tau(r)$$

$$\text{Порог боли, сек:} \quad \tau(r) := \left( \frac{35}{Q(r)} \right)^{1.33}$$

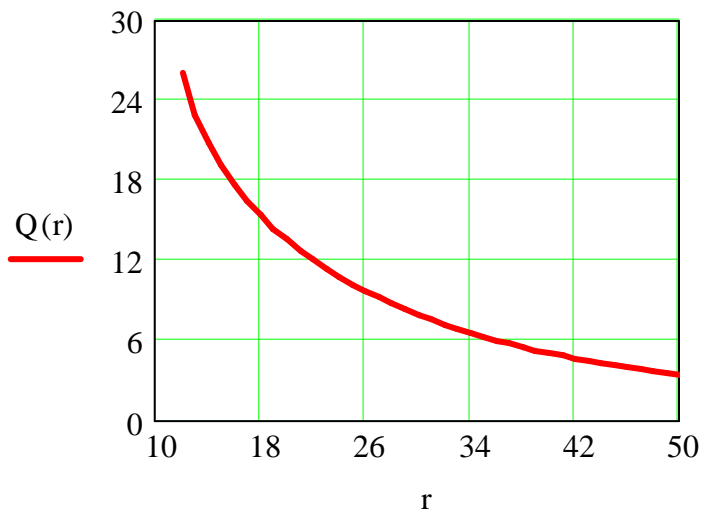


Рис.3.17. Интенсивность теплового излучения  $Q$  (кВт/м<sup>2</sup>) при возникновении пожара пролива в зависимости от расстояния, м.

Условная вероятность поражения человека тепловым излучением при проливе:

$$u := 5 \quad t_0 := 5 \quad t := t_0 + \frac{46}{u}$$

$$Pr(r) := -14.9 + 2.56 \cdot \ln\left(t \cdot Q(r)^{1.33}\right) \quad P_{porr}(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

Зависимости территориального и индивидуального рисков в результате пожара пролива вычисляются по соотношениям

$$R_{tpr}(r) := P_{porr}(r) \cdot P_{ck} \cdot P_{gor}$$

$$R_{ipr}(r) := R_{tpr}(r) \cdot P_n$$

$P_{gor}$  – вероятность горения пролива, равная 0,029 /67/, показаны на рис.3.18.

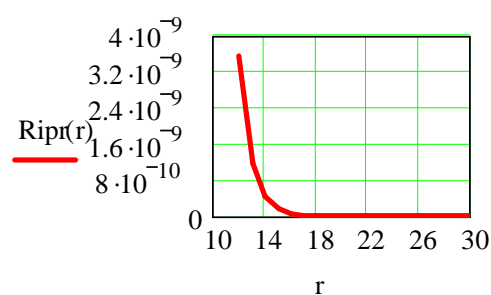
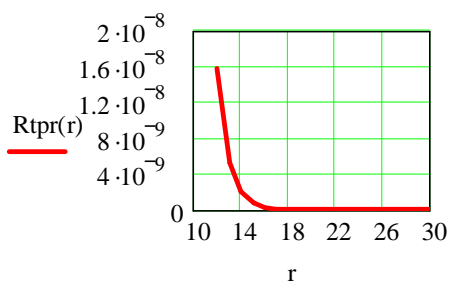


Рис.3.18. Территориальный и индивидуальный риски пожара пролива

На рис.3.19 показана вероятность поражения человеком от ожога третьей степени в результате пожара пролива:

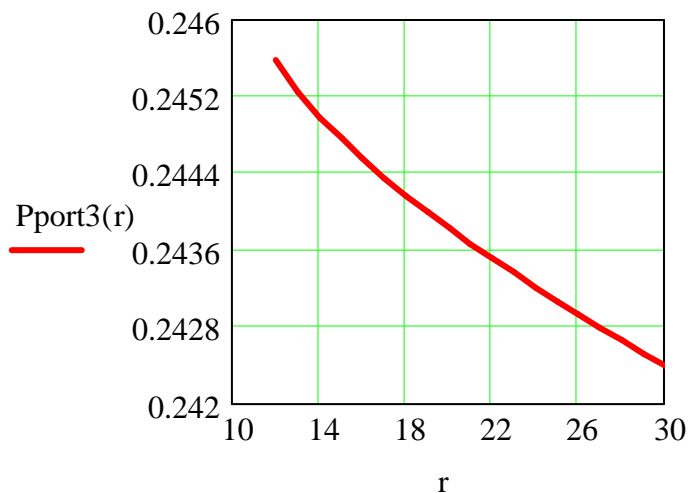


Рис.3.19. Вероятность поражения от ожога третьей степени при пожаре пролива

Общие территориальный и индивидуальный риски (рис.3.20) в результате взрыва паровоздушной смеси бензина, возникновения огневого шара и пожара пролива вычисляются по соотношениям:

$$Rt(r) := Rt2(r) + Rtosh(r) + Rtp(r)$$

$$Ri(r) := Ri2(r) + Riosh(r) + Ripr(r)$$

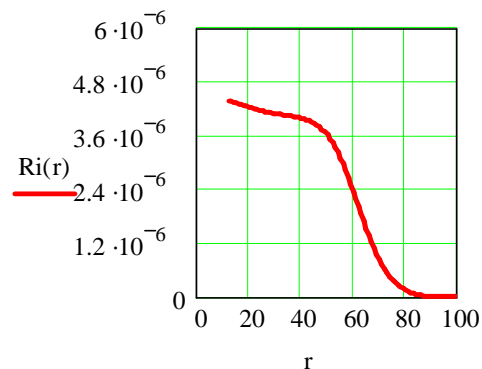
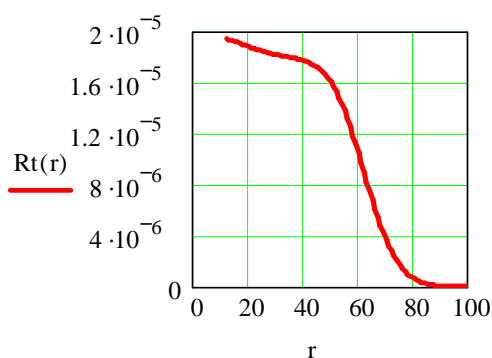


Рис.3.20. Суммарные территориальный и индивидуальный риски в результате возникновения аварии при разгерметизации автоцистерны с бензином

Вероятность поражения человека на определенном расстоянии (в j-й зоне) в результате реализации i-го сценария:

$$Q_{ij}(r) := 1 - (1 - P_{por2}(r) \cdot P_{lwg}) \cdot (1 - P_{por}(r) \cdot P_{sh}) \cdot (1 - P_{porr}(r) \cdot P_{gor})$$

Число летальных исходов, для которого оценивают величину социального риска:

$$N1(r) := Q_{ij}(r) \cdot 2$$

Статистические вероятности развития аварии по i-й ветви дерева:

$$n := 2 \quad Q_0 := 0.00076 \quad Q_1 := 0.704 \quad Q_2 := 0.029$$

Социальный риск для аварии со взрывами и пожарами:

$$S(r) := \sum_{i=0}^n P_{ck} \cdot Q_i \cdot Q_{ij}(r) \cdot N1(r)$$

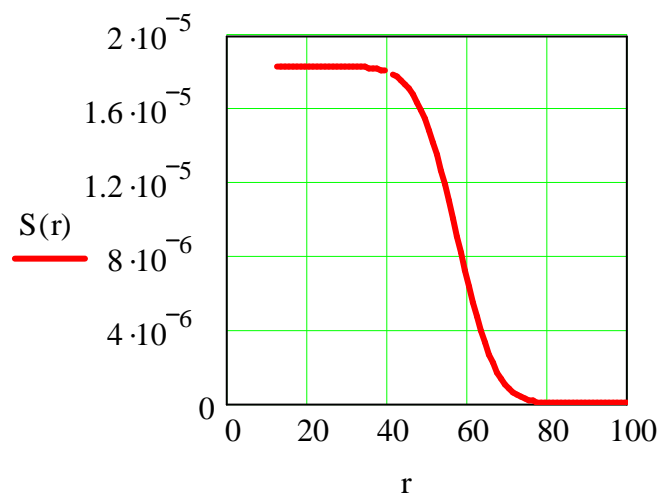


Рис.3.21. Зависимость социального риска от расстояния

### **3.6. Оценка последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (ТВС).**

Методика /38/ предназначена для количественной оценки параметров воздушных ударных волн при взрывах топливно-воздушных смесей, образующихся в атмосфере при промышленных авариях. При рассмотрении предполагается частичная разгерметизация или полное разрушение оборудования, содержащего горючее вещество в газообразной или жидкой фазе, выброс этого вещества в окружающую среду, образование облака ТВС, инициирование ТВС, взрывное превращение (горение или детонация) в облаке ТВС. Методика позволяет определять вероятные степени поражения людей и степени повреждения зданий от взрывной нагрузки при авариях со взрывами топливно-воздушных смесей. Предполагается, что в образовании облака ТВС участвует горючее вещество одного вида, в противном случае (для смеси нескольких горючих веществ) характеристики ТВС, используемые при расчетах параметров ударных волн, определяются отдельно.

Методика используется при разработке планов мероприятий по предотвращению чрезвычайных ситуаций и уменьшения величины ущерба и величины дрейфа центра облака ТВС. Методика позволяет учитывать 6 режимов взрывных превращений облаков ТВС: от детонации до дефлаграции со скоростью видимого фронта пламени 100 м/с.

Согласно методике величину дрейфа центра облака ТВС следует принимать равной 300 м при мгновенной разгерметизации резервуара и 150 м при длительном истечении, что соответствует 70% всех случаев аварий. Направление дрейфа облака ТВС следует принимать исходя из розы ветров данного региона или рассматривать наиболее опасный случай направление в сторону ближайшего населенного пункта и т.п.

Независимо от характера разгерметизации образующееся облако ТВС в 20% случаев рассеивается. Отсюда следует, что образовавшаяся масса

вещества в облаке в этих 20% случаях приводит к загрязнению воздушной среды. В остальных случаях происходит воспламенение облака. Это с равной вероятностью приводит к взрывному превращению облака или образованию огневого шара.

Рассмотрим определение массы вещества в облаке ТВС, образовавшегося в результате аварий на объектах по хранению, переработке и транспортировке сжиженных углеводородных газов или сжатых углеводородных газов.

При мгновенной разгерметизации резервуара хранения, масса вещества  $M$  в облаке равняется полной массе сжиженного углеводородного газа (СУГ), находящегося в резервуаре. При длительном истечении СУГ из резервуара в случае нахождения отверстия ниже уровня жидкости масса вещества в облаке определяется по соотношению:

$$V = 36 \cdot \rho \cdot S \cdot \left[ 2 \cdot \frac{(P - P_a)}{\rho} + 2 \cdot g \cdot H \right]^{\frac{1}{2}},$$

где  $\rho$  – плотность СУГ, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь сечения отверстия, м<sup>2</sup>;  $P$  – давление в резервуаре, Па;  $P_a$  – атмосферное давление, Па;  $g$  – ускорение свободного падения;  $H$  – высота слоя жидкости над отверстием, м.

При истечении СУГ из трубопровода масса в облаке определяется из выражения:

$$M = 60 \cdot \rho \cdot S \cdot \left[ \frac{2(P - P_a)}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left( 1 + \frac{4 \cdot f \cdot l}{d} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где  $l$  – длина трубопровода, м;  $d$  – диаметр трубопровода, м;

$$f = \left[ 4 \cdot l \cdot g \cdot \left( \frac{3.715 \cdot d}{c} \right) \right]^{-2},$$

где  $c$  – толщина стенки трубопровода, м.

При мгновенной разгерметизации резервуара хранения масса вещества  $M$  в облаке определяется полной массой СЖУГ, находящегося в резервуаре.

При длительном истечении СЖУГ из резервуара масса вещества  $M$  в облаке определяется по формуле:

$$M = 40 \cdot S_0 \cdot (P_0 \cdot \rho_0)^{\frac{1}{2}},$$

где  $S_0$  – площадь сечения отверстия,  $m^2$ ;  $P_0$  – давление в резервуаре, Па;  $\rho_0$  – плотность газа,  $kg/m^3$ .

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

$$M = 66 \cdot S \cdot (P_0 \cdot \rho_0)^{\frac{1}{2}},$$

где  $S$  – площадь сечения трубы,  $m^2$ .

Плотность газа определяется из соотношения:

$$\rho_0 = \frac{M_0 P_0}{RT},$$

где  $M_0$  – молекулярный вес,  $kg/kmol$ ;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $Dж/(kmol \cdot K)$ ;  $T$  – температура,  $K$ .

Режим взрывного превращения облака ТВС определяется исходя из класса пространства, окружающего место воспламенения облака и класса чувствительности вещества.

В соответствии с выбранным режимом взрывного превращения, а также в зависимости от массы топлива содержащегося в облаке и интересующего расстояния по методике определяются границы зон полных, сильных, средних и слабых степеней разрушения зданий и сооружений жилой и промышленной застройки. Расчеты выполняются с использованием модели оценки интенсивности тепловых потоков для "огневого шара". Основные расчетные соотношения следующие. Радиус огневого шара определяется из соотношения:

$$R = 3,2 \cdot m^{0,325},$$

Время его существования рассчитывается по формуле:

$$t = 0,85 \cdot m^{0,26},$$

где  $m = 0,6 \cdot M$ ,  $kg$ .

Вероятность поражения людей тепловым потоком зависит от индекса дозы теплового излучения  $I$ , который определяется из соотношения:



$$I = t \cdot \left( \frac{Q_0 \cdot R^2}{X^2} \right)^{\frac{4}{3}},$$

где  $X$  – расстояние от центра огневого шара, м;  $Q_0$  – тепловой поток на поверхности огневого шара, кВт/м<sup>2</sup>.

Воздействие огневых шаров на здания и сооружения, не попадающие в пределы самого огневого шара, определяются наличием возгораемых веществ и величиной теплового потока, которая определяется по формуле (время жизни огневого шара принято равным 15 с):

$$q = \frac{Q_0 R^2}{X^2}.$$

При величине теплового потока более 85 кВт/м<sup>2</sup> воспламенение происходит через 3-5 с.

Кроме того, по методике определяются параметры ударной волны в зависимости от режима взрывного превращения и оцениваются последствия аварии в результате разлета осколков в виде материальных ущербов в натуральном выражении.

Таким образом, для оценки экологических последствий аварий данная методика может быть использована для определения масс СУГ или СЖУГ в облаке ТВС. В случае, если образовавшееся облако не приводит к взрыву, а рассеивается, то в результате этого оно является источником загрязнения атмосферного воздуха углеводородными газами.

Исходными данными для расчета параметров ударных волн при взрыве облака ТВС являются:

- характеристики горючего вещества, содержащегося в облаке ТВС;
- агрегатное состояние ТВС (газовая или гетерогенная смесь);
- средняя концентрация горючего вещества в смеси  $C_r$ ;
- стехиометрическая концентрация горючего газа с воздухом  $C_{ст}$ ;
- масса горючего вещества, содержащегося в облаке,  $M_r$ ;
- удельная теплота сгорания горючего вещества  $q_r$ .

Основными структурными элементами алгоритма расчета (рис. 3.22) являются:

- определение массы горючего вещества, содержащегося в облаке;
- определение эффективного энергозапаса ТВС;
- определение ожидаемого режима взрывного превращения ТВС;
- расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных ударных волн для различных режимов;
- определение дополнительных характеристик взрывной нагрузки;
- оценка поражающего воздействия взрыва ТВС

### 3.6.1. Определение эффективного энергетического запаса ТВС

Эффективный энергетический запас горючей смеси определяется по соотношению

$$E = \begin{cases} M_r \cdot q_r & \text{при } C_r \leq C_{cr} \\ M_r \cdot q_r \cdot C_{cr} / C_r & \text{при } C_r > C_{cr} \end{cases} \quad (3.7)$$

При расчете параметров взрыва облака, лежащего на поверхности земли, величина эффективного энергозапаса удваивается. Для оценки объема газового облака ТВС можно воспользоваться соотношением:  $V = M_r / C_{cr}$ .

Стехиометрическая концентрация горючего вещества в ТВС определяется из справочных данных или рассчитывается отдельно. В случае если определение концентрации горючего вещества в смеси затруднено, в качестве величины  $C_r$  принимается концентрация, соответствующая нижнему концентрационному пределу воспламенения горючего газа. Теплота сгорания горючего газа  $q_r$  в ТВС берется из справочных данных или оценивается по формуле:

$$q_r = 44 \cdot \beta \quad \text{МДж/кг.} \quad (3.8)$$

Корректировочный параметр  $\beta$  для наиболее распространенных в промышленном производстве опасных веществ определяется по таблице 3.14.

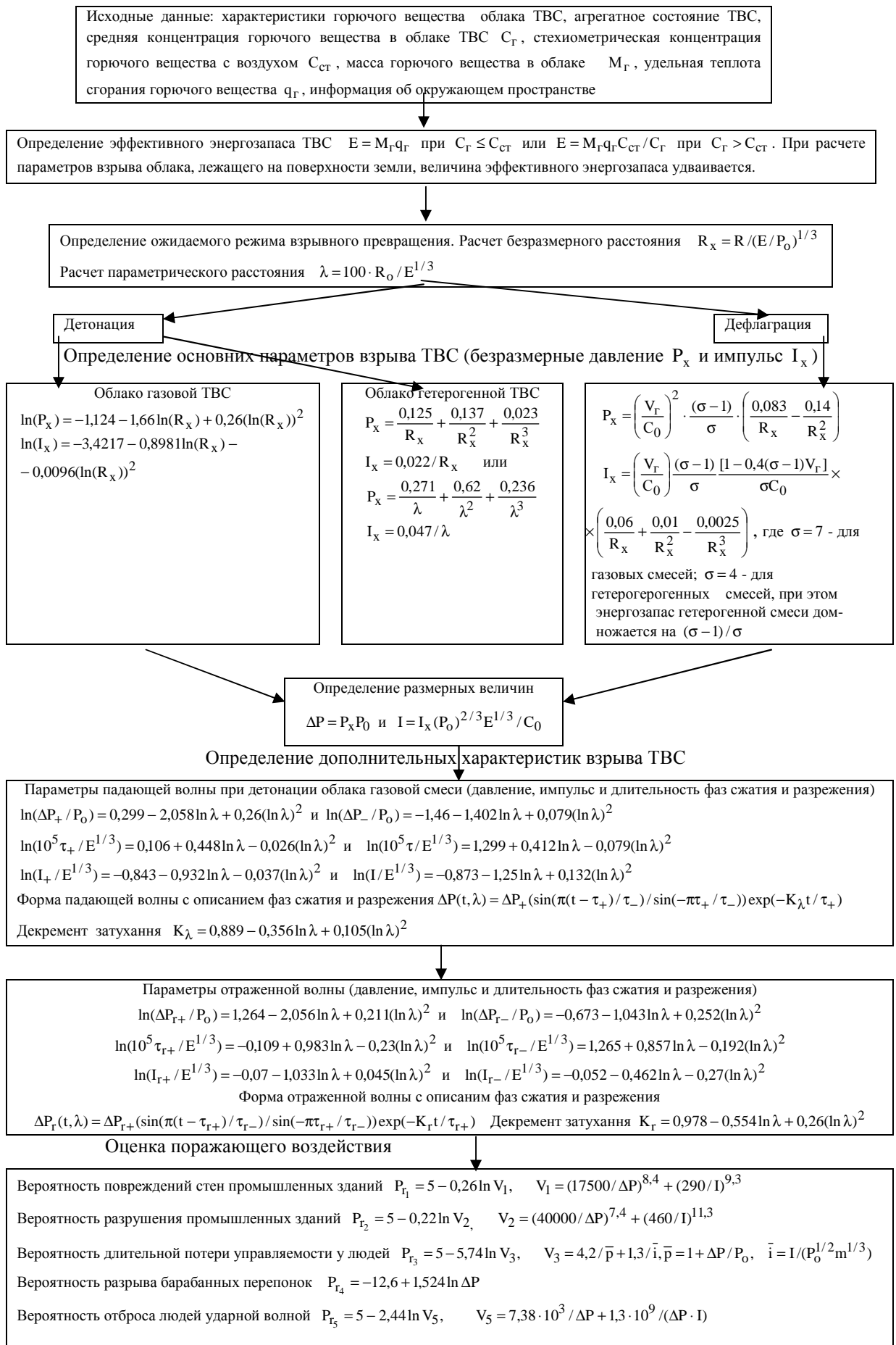


Рис.3.22. Алгоритм расчета последствий аварийных взрывов топливно - воздушных смесей

Таблица 3.14

Класс 1		Класс 2		Класс 3		Класс 4	
Особо чувствительные вещества		Чувствительные вещества		Среднечувствительные вещества		Слабочувствительные вещества	
Размер детонационной ячейки менее 2 см		Размер детонационной ячейки от 2 см до 10см		Размер детонационной ячейки от 10 см до 40см		Размер детонационной ячейки больше 40см	
1	2	3	4	5	6	7	8
	$\beta$		$\beta$		$\beta$		$\beta$
Ацетилен	1,1	Акрилонитрил	0,67	Ацетальдегид	0,56	Аммиак	0,42
Винилацетилен	1,03	Акролеин	0,62	Ацетон	0,65	Бензол	0,88
Водород	2,73	Бутан	1,04	Бензин	1	Декан	1
Гидразин	0,44	Бутилен	1	Винилацетат	0,51	Дизтопливо	1
Изопропилнитрат	0,41	Бутадиен	1	Винилхлорид	0,42	0-дихлорбензол	0,42
Метилацетилен	1,05	1,3 -пентадиен	1	Гексан	1	Додекан	1
Нитрометан	0,25	Пропан	1,05	Генераторный газ	0,38	Керосин	1
Окись пропилена	0,7	Пропилен	1,04	Изооктан	1	Метан	1,14
Окись этилена	0,62	Сероуглерод	0,32	Метиламин	0,7	Метилбензол	1
Этилнитрат	0,3	Этан	1,08	Метилацетат	0,53	Метилмеркаптан	0,53
		Этилен	1,07	Метилбутилкетон	0,79	Метилхлорид	0,12
		ШФЛУ	1	Метилпропилкетон	0,76	Нафталин	0,91
		Диметилловый эфир	0,66	Метилэтилкетон	0,71	Окись углерода	0,23
		Дивиниловый эфир	0,77	Октан	1	Фенол	0,92
		Метилбутиловый эфир	-	Пиридин	0,77	Хлорбензол	0,52
		Диэтиловый эфир	0,77	Сероводород	0,34	Этилбензол	0,90
		Диизопропиловый эфир	0,82	Метиловый спирт	0,52	Дихлорэтан	0,25
				Этиловый спирт	0,62	Трихлорэтан	0,14
				Пропиловый спирт	0,69		
				Амиловый спирт	-		
				Изобутиловый спирт	0,79		
				Изопропиловый спирт	0,69		
				Циклогексан	1		
				Этилформиат	0,46		
				Этилхлорид	0,43		
				Сжиженный природный газ	1		
				Кумол	0,84		
				Печной газ	0,09		
				Циклопропан	1		
				Этиламин	0,8		

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

### 3.6.2. Определение ожидаемого режима взрывного превращения

ТВС, способные к образованию горючих смесей с воздухом, по своим взрывоопасным свойствам разделены на четыре класса (таблица 3.15).

Таблица 3.15

Экспертная таблица для определения режима взрывного превращения

Класс горючего вещества	Вид окружающего пространства			
	1	2	3	4
	Ожидаемый диапазон скорости взрывного превращения			
1	1	1	2	3
2	1	2	3	4
3	2	3	4	5
4	3	4	5	6

В связи с тем, что характер окружающего пространства в значительной степени определяет скорость взрывного превращения облака ТВС, и, следовательно, параметры ударной волны, геометрические характеристики окружающего пространства, разделены на виды, в соответствии со степенью загроможденности (таблица 3.16).

Таблица 3.16

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

Известны два основных режима протекания быстропротекающих процессов взрывного превращения – детонация (скорость распространения пламени выше скорости звука, скорость распространения горения определяется скоростью распространения ударной волны), и дефлеграция (скорость распространения пламени ниже скорости звука, скорость распространения

горения определяется теплопроводностью среды) /33,38,54,55/. Для оценки параметров действия взрыва возможные режимы взрывного превращения ТВС разбиты на шесть диапазонов по скоростям их распространения, причем пять из них приходится на процессы дефлаграционного горения ТВС, поскольку характеристики процесса горения со скоростями фронта меньшими 500 м/с имеют существенные качественные различия.

Ожидаемый диапазон скорости взрывного превращения определяется с помощью экспертной таблицы в зависимости от класса горючего вещества и вида окружающего пространства.

Ниже приведены режимы взрывного превращения ТВС по диапазонам скоростей.

**Диапазон 1.** Детонация или горение со скоростью фронта пламени 500 м/с и больше.

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

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

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

**Диапазон 5.** Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением:

$$V_r = k_1 M_r^{\frac{1}{6}},$$

где  $k_1$  – константа равная 43.

**Диапазон 6.** Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением:

$$V_r = k_2 M_r^{\frac{1}{6}},$$

где  $k_2$  – константа равная 26.

Для дальнейших расчетов необходимо оценить агрегатное состояние топлива смеси. Предполагается, что смесь гетерогенная, если более 50% топлива содержится в облаке в виде капель, в противном случае ТВС считается газовой. Провести такие оценки можно исходя из величины давления насыщенных паров топлива при данной температуре и времени

формирования облака. Для летучих веществ, таких как пропан при температуре +20 °С, смесь можно считать газовой, а для веществ с низким давлением насыщенного пара (распыл дизтоплива при +20 °С) расчеты проводятся в предположении гетерогенной топливно-воздушной смеси.

### *3.6.3 Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных ударных волн*

После определения вероятного режима взрывного превращения, рассчитываются основные параметры воздушных ударных волн: избыточное давление  $\Delta P$  и импульс волны давления  $I$  в зависимости от расстояния до центра облака.

#### *3.6.3.1. Детонация газовых и гетерогенных топливно-воздушных смесей*

Для дальнейших расчетов необходимо оценить агрегатное состояние топлива смеси. Предполагается, что смесь является гетерогенной, если более 50% топлива содержится в облаке в виде капель, в противном случае ТВС считается газовой. Провести такие оценки можно, исходя из величины давления насыщенных паров топлива при данной температуре и времени формирования облака. Для летучих веществ, таких как пропан при температуре + 20°С, смесь можно считать газовой, а для веществ с низким давлением насыщенного пара расчеты производятся в предположении гетерогенной топливно-воздушной смеси.

Для вычисления параметров воздушной ударной волны на заданном расстоянии  $r$  от центра облака при детонации облака ТВС предварительно рассчитывается соответствующее безразмерное расстояние  $\lambda = \lambda(r, E) / 38,55$ :

$$R_x = \frac{r}{(E/P_0)^{1/3}}. \quad (3.9)$$

Все соотношения также могут быть записаны в функциях аргумента  $\lambda$  (безразмерное параметрическое расстояние):

$$\lambda = \frac{100 \cdot r}{E^{1/3}}$$

Далее рассчитываются безразмерное давление  $P_x$  и безразмерный импульс фазы сжатия  $I_x$ .

В случае *детонации облака газовой* ТВС расчет производится по следующим формулам

$$P_x = \exp(-1,124 - 1,66 \ln(R_x) + 0,26(\ln(R_x))^2) \pm 10\% \quad (3.10)$$

$$I_x = \exp(-3,4217 - 0,898 \ln(R_x) - 0,0096(\ln(R_x))^2) \pm 15\% \quad (3.11)$$

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

В случае *детонации облака гетерогенной* ТВС расчет производится по следующим формулам:

$$P_x = \frac{0,125}{R_x} + \frac{0,137}{R_x^2} + \frac{0,023}{R_x^3} \pm 10\%; \quad (3.12)$$

$$I_x = \frac{0,022}{R_x} \pm 15\%. \quad (3.13)$$

Последние зависимости справедливы для  $R_x > 0,25$ . В случае  $R_x < 0,25$ , величина  $P_x$  полагается равной 18, а величина  $I_x = 0,16$ .

### 3.6.3.2. Дефлаграция газовых и гетерогенных топливно-воздушных смесей

В случае **дефлаграционного** взрывного превращения облака ТВС к параметрам, влияющим на величины избыточного давления и импульса положительной фазы, добавляется скорость видимого фронта пламени  $V_f$  и степень расширения продуктов сгорания  $\sigma$ . Для **газовых** смесей принимается  $\sigma = 7$ , для **гетерогенных**  $\sigma = 4$ . Для расчета параметров ударной волны при



дефлаграции гетерогенных облаков величина эффективного энергозапаса смеси домножается на коэффициент  $(\sigma - 1)/\sigma$ .

Безразмерные давление и импульс фазы сжатия определяются по соотношениям:

$$P_{x1} = \left( \frac{V_r}{C_0} \right)^2 \frac{(\sigma - 1)}{\sigma} \left( \frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2} \right); \quad (3.14)$$

$$I_{x1} = \left( \frac{V_r}{C_0} \right)^2 \frac{(\sigma - 1)}{\sigma} \left( 1 - 0,4 \cdot \frac{(\sigma - 1)V_r}{\sigma C_0} \right) \cdot \left( \frac{0,06}{R} + \frac{0,01}{R_x^2} - \frac{0,0025}{R_x^3} \right). \quad (3.15)$$

Последние два выражения справедливы для значений  $R_x > 0,34$ , в противном случае вместо  $R_x$  в эти соотношения подставляется величина 0.34.

Далее вычисляются величины  $P_{x2}$  и  $I_{x2}$ , которые соответствуют режиму детонации и для случая детонации газовой смеси рассчитываются по соотношениям (3.10),(3.11), а для детонации гетерогенной смеси – по соотношениям (3.12), (3.13). Окончательные значения  $P_x$  и  $I_x$  выбирают из условий:

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}); \quad I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}). \quad (3.16)$$

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

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_x \cdot P_0; \\ I &= \frac{I_x (P_0)^{2/3} E^{1/3}}{C_0}, \end{aligned} \quad (3.17)$$

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

### 3.6.4. Определение дополнительных характеристик взрыва ТВС

#### 3.6.4.1. Параметры падающей волны при детонации облака газовой смеси

Параметры падающей волны при детонации облака газовой смеси рассчитываются по следующим соотношениям /38,33/:

Амплитуда избыточного давления на фронте проходящей ударной волны (фаза сжатия), Па:

$$P_+ = \frac{\Delta P_+}{P_0} = \exp(0,299 - 2,058 \ln \lambda + 0,26(\ln(\lambda))^2). \quad (3.18)$$

Амплитуда избыточного давления фазы разрежения:

$$P_- = \frac{\Delta P_-}{P_0} = \exp(-1,46 - 1,402 \ln \lambda + 0,079(\ln(\lambda))^2). \quad (3.19)$$

Импульс фазы сжатия, Па · с:

$$I_+ \equiv \frac{I_+}{E^{1/3}} = \exp(-0,843 - 0,932 \ln \lambda - 0,037(\ln(\lambda))^2). \quad (3.20)$$

Импульс фазы разрежения:

$$I_- \equiv \frac{I_-}{E^{1/3}} = \exp(-0,873 - 1,25 \ln \lambda + 0,132(\ln(\lambda))^2). \quad (3.21)$$

Длительность фазы сжатия, с:

$$\tau_+ \equiv \frac{10^5 \tau_+}{E^{1/3}} = \exp(0,106 + 0,448 \ln \lambda - 0,026(\ln(\lambda))^2). \quad (3.22)$$

Длительность фазы разрежения, с:

$$\tau_- \equiv \frac{10^5 \tau_-}{E^{1/3}} = \exp(1,299 + 0,412 \ln \lambda - 0,079(\ln(\lambda))^2). \quad (3.23)$$

Форма падающей волны с описанием фаз сжатия и разрежения в наиболее опасном случае детонации газовой смеси может быть описана соотношением:

$$\Delta P(t, \lambda) = \Delta P_+ (\sin(\pi(t - \tau_+)/\tau_-) / \sin(-\pi\tau_+/\tau_-)) \exp(-K_i t / \tau_+). \quad (3.24)$$

Декремент затухания в падающей волне рассчитывается по соотношению:

$$K_i = 0,889 - 0,356 \ln \lambda + 0,105(\ln(\lambda))^2. \quad (3.25)$$

#### 3.6.4.2. Параметры отраженной ударной волны

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

Амплитуда отраженной волны давления

$$P_{r+} = \frac{\Delta P_{r+}}{P_0} = \exp(1,264 - 2,056 \ln \lambda + 0,211 (\ln(\lambda))^2). \quad (3.26)$$

Амплитуда отраженной волны разрежения

$$P_{r-} = \frac{\Delta P_{r-}}{P_0} = \exp(-0,673 - 1,043 \ln \lambda + 0,252 (\ln(\lambda))^2). \quad (3.27)$$

Импульс отраженной волны давления

$$I_{r+} \equiv \frac{I_{r+}}{E^{1/3}} = \exp(-0,07 - 1,033 \ln \lambda + 0,045 (\ln(\lambda))^2). \quad (3.28)$$

Импульс отраженной волны разрежения

$$I_{r-} \equiv \frac{I_{r-}}{E^{1/3}} = \exp(-0,052 - 0,462 \ln \lambda - 0,27 (\ln(\lambda))^2). \quad (3.29)$$

Длительность отраженной волны давления

$$\tau_{r+} \equiv \frac{10^5 \tau_{r+}}{E^{1/3}} = \exp(-0,109 + 0,983 \ln \lambda - 0,23 (\ln(\lambda))^2). \quad (3.30)$$

Длительность отраженной волны разрежения

$$\tau_{r-} \equiv \frac{10^5 \tau_{r-}}{E^{1/3}} = \exp(1,265 + 0,857 \ln \lambda - 0,192 (\ln(\lambda))^2). \quad (3.31)$$

Общее время действия отраженных волн на мишень

$$\tau_{r+} + \tau_{r-} \equiv \frac{10^5 (\tau_{r+} + \tau_{r-})}{E^{1/3}} = \exp(1,497 + 0,908 \ln \lambda - 0,404 (\ln(\lambda))^2). \quad (3.32)$$

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

$$\Delta P_r(t, \lambda) = \Delta P_{r+} \left( \frac{\sin(\pi(t - \tau_{r+}) / \tau_{r-})}{\sin(-\pi \tau_{r+} / \tau_{r-})} \right) \exp(-K_r t / \tau_{r+}). \quad (3.33)$$

Декремент затухания в отраженной волне рассчитывается по соотношению:

$$K_r = 0,978 - 0,554 \ln \lambda + 0,26 (\ln(\lambda))^2. \quad (3.35)$$

Все приведенные выше соотношения справедливы при значениях  $\lambda$  до 51,6.

### 3.6.5. Оценка поражающего воздействия

При взрывах ТВС существенную роль играют такие поражающие факторы, как длительность действия ударной волны, и связанный с ней параметр импульс взрыва. Реальное деление плоскости факторов поражения на диаграмме импульс – давление на две части (внутри – область разрушения, вне – область устойчивости) не имеет четкой границы. При приближении параметров волны к границе опасной области вероятность заданного уровня поражения нарастает от 0 до 100%. При превышении известного уровня величин амплитуды давления и импульса достигается 100% вероятность поражения. Эта типичная особенность диаграмм поражения может быть отражена представлением вероятности достижения того или иного уровня ущерба с помощью пробит-функции -  $P_{ii}$ .

#### 3.6.5.1. Оценка вероятности повреждений промышленных зданий от взрыва облака ТВС

Вероятность **повреждений стен** промышленных зданий, при которых возможно восстановление зданий без их сноса, может оцениваться по соотношению /38,56,57/:

$$P_{r1} = 5 - 0,26 \ln V_1. \quad (3.36)$$

Фактор  $V_1$  рассчитывается с учетом перепада давления в волне и импульса статического давления по соотношению

$$V_1 = \left( \frac{17500}{\Delta P} \right)^{8,4} + \left( \frac{290}{I} \right)^{9,3}. \quad (3.37)$$

Вероятность **разрушения** промышленных **зданий**, при которых здания принадлежат сносу, оценивается по соотношению

$$P_{r2} = 5 - 0,22 \ln V_2. \quad (3.38)$$

В этом случае фактор  $V_2$  рассчитывается по формуле

$$V_2 = \left( \frac{4000}{\Delta P} \right)^{7,4} + \left( \frac{460}{I} \right)^{11,3}. \quad (3.39)$$

### 3.6.5.2. Оценка вероятности поражений людей при взрыве облака ТВС

Вероятность длительной потери управляемости у людей (состояние нокдауна), попавших в зону действия ударной волны при взрыве облака ТВС, может быть оценена по величине пробит-функции /56,57/:

$$P_{r3} = 5 - 5,74 \ln V_3. \quad (3.40)$$

Фактор опасности  $V_3$  рассчитывается по соотношению

$$V_3 = \frac{4,2}{\bar{p}} + \frac{1,3}{\bar{i}}, \quad (3.41)$$

где безразмерное давление и безразмерный импульс задаются выражениями:

$$\bar{p} = 1 + \frac{\Delta P}{P_0}; \quad \bar{i} = \frac{I}{P_0^{1/2} m^{1/3}}, \quad m - \text{масса тела живого организма, кг.}$$

Зависимость вероятности разрыва барабанных перепонок у людей от уровня перепада давления в воздушной волне:

$$P_{r4} = -12,6 + 1,524 \ln \Delta P. \quad (3.42)$$

Вероятность отброса людей волной давления может оцениваться по величине пробит-функции

$$P_{r5} = 5 - 2,44 \ln V_5. \quad (3.43)$$

Здесь фактор  $V_5$  рассчитывается из соотношения

$$V_5 = \frac{7,38 \cdot 10^3}{\Delta P} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{\Delta P \cdot I}. \quad (3.44)$$

Связь функции  $P_{ri}$  с вероятностью той или иной степени поражения находится по таблице 3.17 /66/.

Таблица 3.17.

## Связь вероятности поражения с пробит-функцией

Условная вероятность поражения, %	Значения величины $P_r$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,90	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
-	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

## 3.6.5.3. Вероятность поражения человека тепловым излучением

Условную вероятность поражения человека тепловым излучением определяют следующим образом /40/:

1) рассчитывают величину пробит-функции  $P_r$  по формуле

$$P_r = -14,9 + 2,56 \ln(t \cdot q^{1,33}), \quad (3.45)$$

где  $t$  – эффективное время экспозиции, с, которое для пожаров проливов ЛВЖ, ГЖ и твердых материалов определяется как:

$$t = t_0 + x / u,$$

где  $t_0$  – характерное время обнаружения пожара, с (допускается принимать 5 сек.);  $x$  – расстояние от места расположения человека до зоны, где интенсивность теплового излучения не превышает  $4 \text{ кВт/м}^2$ ;  $u$  – скорость движения человека, м/с (допускается принимать 5 м/с);

для воздействия «огненного шара»:  $t_{ш} = 0,92 \cdot \sqrt[3]{m}$ .

Затем по формуле (3.1) или с помощью таблицы 3.17 определяют условную вероятность поражения человека тепловым излучением.

**Примечание.** Если для рассматриваемой технологической установки возможен как пожар пролива, так и «огненный шар», то должны быть учтены оба типа аварии.

**Пример 3.10.** В результате аварии на автодороге, проходящей по открытой местности, в безветренную погоду произошел разрыв автоцистерны, содержащей 8 т сжиженного пропана. Для оценки максимально возможных последствий принято, что в результате выброса газа в пределах воспламенения оказалось практически все топливо, перевозившееся в цистерне. Средняя концентрация пропана в образовавшемся облаке составила около  $140 \text{ г/м}^3$ . Воспламенение облака привело к возникновению взрывного режима его превращения. Требуется определить параметры воздушной ударной волны (избыточное давление и импульс фазы сжатия) на расстоянии 100 м от места аварии.

Решение:

Агрегатное состояние смеси - газовая; окружающее пространство - открытое; концентрация горючего в смеси,  $\text{кг/м}^3$ ,  $C_g$ ; масса топлива, содержащегося в облаке, кг,  $M_g$ ; стехиометрическая концентрация пропана с воздухом,  $\text{кг/м}^3$ ,  $C_{st}$ ; корректировочный параметр  $\beta$  для пропана; атмосферное давление, Па,  $P_0$ ; скорость звука в воздухе, м/с,  $C_0$ ; степень расширения продуктов сгорания,  $\sigma$ .

Ниже представлена программа и результаты расчета в окне Mathcad.

$J := 1$      $J = 1$  облако лежит на земле,     $J = 0$  в другом случае

$I := 0$      $I = 1$  гетерогенная ТВС,  $I = 0$  газовая ТВС

$K1, K2, K3, K4$  - класс горючего вещества;     $WP1, WP2, WP3, WP4$  - вид окружающего пространства.

$$K1 := 0 \quad WP1 := 0$$

$$K2 := 1 \quad WP2 := 0$$

$$K3 := 0 \quad WP3 := 0$$

$$K4 := 0 \quad WP4 := 1$$

$$Mg := 8000 \quad Cg := 0.14 \quad Cst := 0.077 \quad Po := 101325 \quad Co := 340 \quad \beta := 1.05 \quad q := 44 \cdot \beta$$

Определяем теплоту сгорания газа (пропан), Дж/кг:

$$q := q \cdot 10^6 \quad q = 4.62 \times 10^7$$

Определяем эффективный энергозапас ТВС, Е, Дж:

$$E := \begin{cases} (2 \cdot Mg \cdot q) & \text{if } Cg < Cst \wedge J = 1 \\ \left( \left( 2 \cdot Mg \cdot q \cdot \frac{Cst}{Cg} \right) \right) & \text{if } Cg > Cst \wedge J = 1 \\ (Mg \cdot q) & \text{if } Cg < Cst \wedge J = 0 \\ \left( \left( Mg \cdot q \cdot \frac{Cst}{Cg} \right) \right) & \text{if } Cg > Cst \wedge J = 0 \end{cases} \quad E = 4.066 \times 10^{11}$$

$$\sigma := \begin{cases} 4 & \text{if } I = 1 \\ 7 & \text{if } I = 0 \end{cases}$$

Скорость фронта пламени:



$$V_g := \begin{cases} 500 & \text{if } K1 = 1 \wedge WP1 = 1 \\ 500 & \text{if } K2 = 1 \wedge WP1 = 1 \\ 400 & \text{if } K3 = 1 \wedge WP1 = 1 \\ 250 & \text{if } K4 = 1 \wedge WP1 = 1 \\ 500 & \text{if } K1 = 1 \wedge WP2 = 1 \\ 400 & \text{if } K2 = 1 \wedge WP2 = 1 \\ 250 & \text{if } K3 = 1 \wedge WP2 = 1 \\ 200 & \text{if } K4 = 1 \wedge WP2 = 1 \\ 400 & \text{if } K1 = 1 \wedge WP3 = 1 \\ 250 & \text{if } K2 = 1 \wedge WP3 = 1 \\ 200 & \text{if } K3 = 1 \wedge WP3 = 1 \\ \left(43 \cdot \sqrt[6]{Mg}\right) & \text{if } K4 = 1 \wedge WP3 = 1 \\ 250 & \text{if } K1 = 1 \wedge WP4 = 1 \\ 200 & \text{if } K2 = 1 \wedge WP4 = 1 \\ \left(43 \cdot \sqrt[6]{Mg}\right) & \text{if } K3 = 1 \wedge WP4 = 1 \\ \left(26 \cdot \sqrt[6]{Mg}\right) & \text{if } K4 = 1 \wedge WP4 = 1 \end{cases}$$

$$V_g = 200$$

Расчет безразмерного расстояния:

$$r := 10..1000 \quad R_{x1}(r) := \frac{r}{\left(\frac{E}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}}}$$

$$R_x(r) := \begin{cases} 0.34 & \text{if } R_{x1}(r) < 0.34 \\ R_{x1}(r) & \text{if } R_{x1}(r) > 0.34 \end{cases}$$

Рассчитываем параметры взрыва при скорости горения  $V_g$ , м/с.

$$P_{x1}(r) := \left( \frac{V_g}{C_o} \right)^2 \cdot \left( \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \cdot \left( \frac{0.83}{R_{x1}(r)} - \frac{0.14}{R_{x1}(r)^2} \right)$$

$$I_{x1}(r) := \left( \frac{V_g}{C_o} \right) \cdot \left( \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \cdot \left[ 1 - 0.4 \cdot \frac{V_g}{C_o} \cdot \left( \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \right] \cdot \left( \frac{0.06}{R_{x1}(r)} + \frac{0.01}{R_{x1}(r)^2} - \frac{0.0025}{R_{x1}(r)^3} \right)$$

В случае детонации облака гетерогенной ТВС рассчитываем  $P_{x2}$  и  $I_{x2}$ :

$$P_{x2}(r) := \begin{cases} \left( \left( \frac{0.125}{R_{x1}(r)} + \frac{0.137}{R_{x1}(r)^2} + \frac{0.023}{R_{x1}(r)^3} \right) \right) & \text{if } R_{x1}(r) > 0.25 \wedge I = 1 \\ 18 & \text{if } R_{x1}(r) < 0.25 \wedge I = 1 \\ 18 & \text{if } R_{x1}(r) < 0.2 \wedge I = 0 \\ \exp[-1.124 - 1.66 \cdot \ln(R_{x1}(r)) + 0.26 \cdot (\ln(R_{x1}(r)))^2] & \text{if } (0.2 < R_{x1}(r) < 24) \wedge I = 0 \end{cases}$$

$$I_{x2}(r) := \begin{cases} \frac{0.022}{R_{x1}(r)} & \text{if } R_{x1}(r) > 0.25 \wedge I = 1 \\ 0.16 & \text{if } R_{x1}(r) < 0.25 \wedge I = 1 \\ \exp[-3.4217 - 0.898 \cdot \ln(0.142) - 0.0096 \cdot (\ln(0.142))^2] & \text{if } R_{x1}(r) < 0.2 \wedge I = 0 \\ \exp[-3.4217 - 0.898 \cdot \ln(R_{x1}(r)) - 0.0096 \cdot (\ln(R_{x1}(r)))^2] & \text{if } 0.2 < R_{x1}(r) < 24 \wedge I = 0 \end{cases}$$

Окончательные значения  $P_x$  и  $I_x$  выбираем из условий:

$$P_x(r) := \min(P_{x1}(r), P_{x2}(r)) \quad I_x(r) := \min(I_{x1}(r), I_{x2}(r))$$

Вычисляются соответствующие им размерные величины:

$$\Delta P(r) := P_x(r) \cdot P_o \quad I(r) := \frac{I_x(r) \cdot P_o^{\frac{2}{3}} \cdot E^{\frac{1}{3}}}{C_o}$$

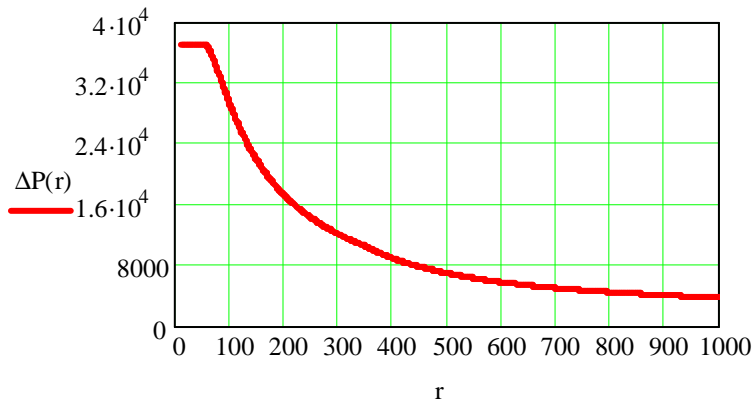


Рис.3.22. Изменение избыточного давления (Па) от расстояния при взрыве 8 т сжиженного пропана

Оценка поражающего фактора.

1. Вероятность повреждений стен промышленных зданий:

$$r := 50..300 \quad V1(r) := \left( \frac{17500}{\Delta P(r)} \right)^{8.4} + \left( \frac{290}{I(r)} \right)^{9.3} \quad Pr1(r) := 5 - 0.26 \cdot \ln(V1(r))$$

$$Ppor1(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr1(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

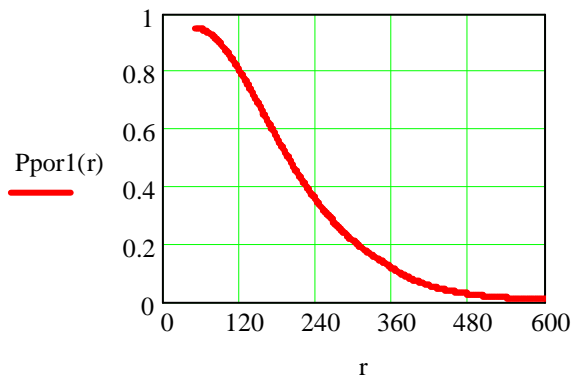


Рис. 3.23. Зависимость вероятности повреждений стен промышленных зданий от расстояния

2. Вероятность разрушений промышленных зданий, при которых здания подлежат сносу:

$$V2(r) := \left( \frac{40000}{\Delta P(r)} \right)^{7.4} + \left( \frac{460}{I(r)} \right)^{11.3} \quad Pr2(r) := 5 - 0.22 \cdot \ln(V2(r)) \quad Ppor2(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr2(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

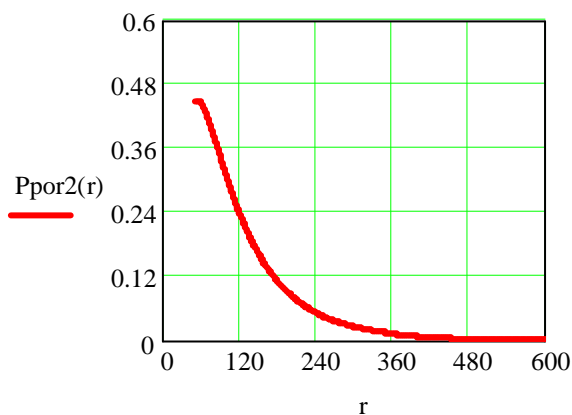


Рис.3.24. Зависимость вероятности разрушения промышленных зданий от расстояния

3. Вероятность длительной потери управляемости у людей, попавших в зону действия ударной волны при взрыве облака ТВС:

$$p(r) := 1 + \frac{\Delta P(r)}{P_0} \quad m := 80 \quad i(r) := \frac{I(r)}{\sqrt{P_0} \cdot \sqrt[3]{m}} \quad V_3(r) := \frac{4.2}{p(r)} + \frac{1.3}{i(r)}$$

$$Pr_3(r) := 5 - 5.74 \cdot \ln(V_3(r)) \quad Pr_3(100) = -3.115$$

$$Ppor_3(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr_3(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

(при расчете  $Pr_3$  предполагается, что масса человека 80 кг).

4. Вероятность разрыва барабанных перепонок у людей от уровня перепада давления в воздушной волне:

$$Pr_4(r) := -12.6 + 1.524 \cdot \ln(\Delta P(r)) \quad Ppor_4(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr_4(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

$$Pr_4(100) = 3.06$$

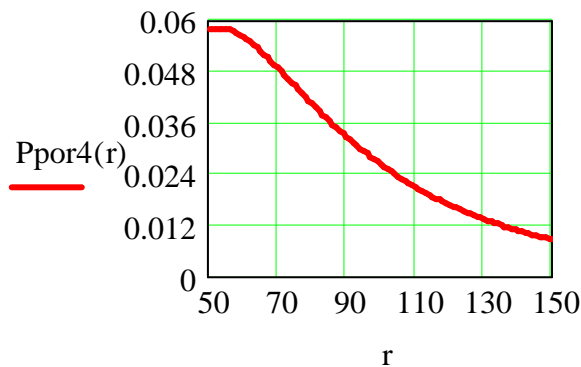


Рис.3.25. Зависимость вероятности разрыва барабанных перепонок от расстояния у людей от уровня перепада давления в воздушной волне:

5. Вероятность отброса людей волной давления:

$$V5(r) := \frac{7.38 \cdot 10^3}{\Delta P(r)} + \frac{1.3 \cdot 10^9}{\Delta P(r) \cdot I(r)} \quad \text{Pr5}(r) := 5 - 2.44 \cdot \ln(V5(r))$$

$$P_{por5}(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\text{Pr5}(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt \quad \text{Pr5}(100) = -2.488$$

**Выводы:** на расстоянии 100 м 99% вероятность повреждений и 30% вероятность разрушений промышленных зданий и сооружений, 3% вероятность разрыва барабанных перепонок у людей. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

Интенсивность теплового излучения в случае возникновения огненного шара.

Эффективный диаметр огненного шара  $D$ , м, и время существования шара  $t_s$ , сек:

$$D := 5.33 \cdot Mg^{0.327} \quad D = 100.702 \quad t_s := 0.92 \cdot Mg^{0.303} \quad t_s = 14.01$$

Определяем величину  $H$ , угловой коэффициент облученности, коэффициент пропускания атмосферы:

$$H := \frac{D}{2}$$

$$F_q(r) := \frac{\frac{H}{D} + 0.5}{4 \cdot \left[ \left( \frac{H}{D} + 0.5 \right)^2 + \left( \frac{r}{D} \right)^2 \right]^{1.5}} \quad \tau(r) := \exp\left[ -7.0 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \sqrt{r^2 + H^2} - \frac{D}{2} \right) \right]$$

$$E_f := 450$$

$E_f = 450$  - допускается принимать в случае отсутствия экспериментальных данных

$$Q(r) := E_f \cdot F_q(r) \cdot \tau(r) \quad \text{кВт/(м*м)}$$

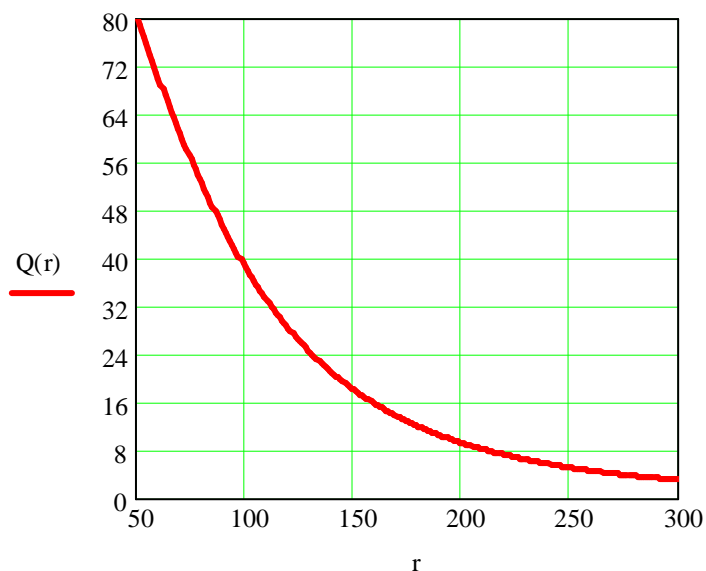


Рис. 3.26. Зависимость интенсивности теплового излучения от расстояния при воспламенении облака пропана

Порог боли, сек:

$$\tau(r) := \left( \frac{35}{Q(r)} \right)^{1.33} \quad Q(273) = 3.977$$

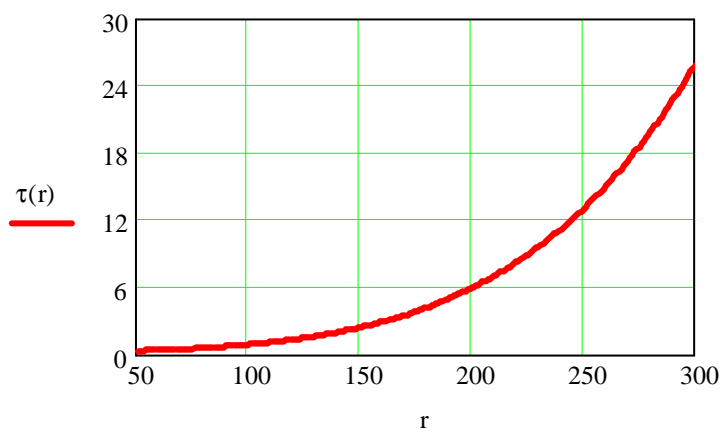


Рис.3.27. Зависимость порога боли от расстояния

Условная вероятность поражения человека тепловым излучением:

$$u := 5 \quad t_0 := 5 \quad t(r) := t_0 + \frac{273}{u}$$

$$\text{Pr}(r) := -14.9 + 2.56 \cdot \ln(t(r) \cdot Q(r)^{1.33})$$

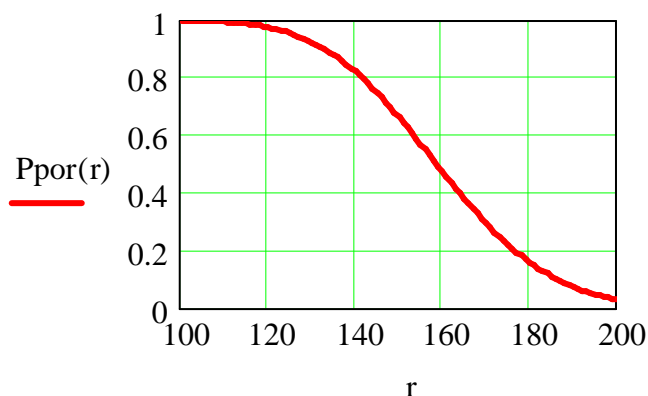


Рис.3.28. Зависимость вероятности поражения человека от теплового излучения в зависимости от расстояния при воспламенении облака пропана

Ожог третьей степени:

$$Prt3(r) := -31.4 + 2.56 \cdot \ln \left[ (1000 \cdot Q(r))^{\frac{4}{3}} \cdot \tau(r) \right]$$

$$Pport3(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Prt3(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

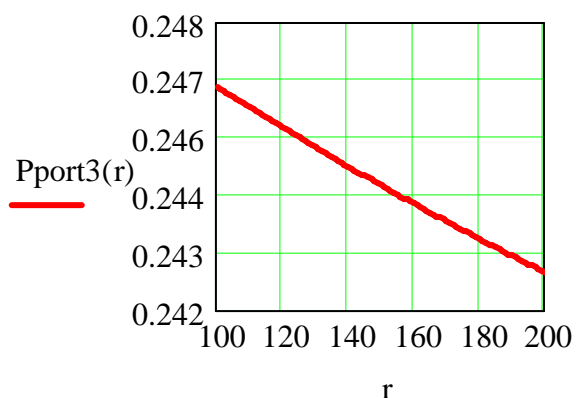


Рис.3.29. Вероятность поражения от ожога третьей степени в зависимости от расстояния при воспламенении облака пропана

**Пример 3.11.** В результате внезапного раскрытия обратного клапана в пространство, загроможденное подводными трубопроводами, выброшено 100 кг этилена. Рядом с загазованным объектом на расстоянии 150 м находится помещение цеха. Концентрация этилена в облаке 80 кг/м<sup>3</sup>.

Определить степень поражения здания цеха и расположенного в нем персонала при взрыве облака ТВС.

Решение:

Горючий газ - этилен; агрегатное состояние смеси - газовая; окружающее пространство - открытое; концентрация горючего в смеси,  $\text{кг/м}^3$ ,  $C_g$ ; масса топлива, содержащегося в облаке, кг,  $M_g$ ; стехиометрическая концентрация пропана с воздухом,  $\text{кг/м}^3$ ,  $C_{st}$ ; корректировочный параметр  $\beta$  для этилена; атмосферное давление, Па,  $P_o$ ; скорость звука в воздухе, м/с,  $C_o$ ; степень расширения продуктов сгорания,  $\sigma$ .

$J := 1$   $J = 1$  облако лежит на земле,  $J = 0$  в другом случае

$I := 0$   $I = 1$  гетерогенная ТВС,  $I = 0$  газовая ТВС

$C_g := 0.08$   $M_g := 100$   $C_{st} := 0.09$   $\beta := 1.07$   $P_o := 101325$   $C_o := 340$   
 $K1, K2, K3, K4$  - класс горючего вещества;  $WP1, WP2, WP3, WP4$  - вид окружающего пространства

$K1 := 0$   $WP1 := 1$

$K2 := 1$   $WP2 := 0$

$K3 := 0$   $WP3 := 0$

$K4 := 0$   $WP4 := 0$

Определяем теплоту сгорания газа, Дж/кг:

$$q := 44 \cdot 10^6 \cdot \beta \quad q = 4.708 \times 10^7$$

Определяем эффективный энергозапас ТВС  $E$ , Дж:

$$E := \begin{cases} (2 \cdot M_g \cdot q) & \text{if } C_g < C_{st} \wedge J = 1 \\ \left( \left( 2 \cdot M_g \cdot q \cdot \frac{C_{st}}{C_g} \right) \right) & \text{if } C_g > C_{st} \wedge J = 1 \\ (M_g \cdot q) & \text{if } C_g < C_{st} \wedge J = 0 \\ \left( \left( M_g \cdot q \cdot \frac{C_{st}}{C_g} \right) \right) & \text{if } C_g > C_{st} \wedge J = 0 \end{cases} \quad E = 9.416 \times 10^9$$



$$\sigma := \begin{cases} 4 & \text{if } I = 1 \\ 7 & \text{if } I = 0 \end{cases}$$

$$\sigma = 7$$

$$V_g := \begin{cases} 500 & \text{if } K1 = 1 \wedge WP1 = 1 \\ 500 & \text{if } K2 = 1 \wedge WP1 = 1 \\ 400 & \text{if } K3 = 1 \wedge WP1 = 1 \\ 250 & \text{if } K4 = 1 \wedge WP1 = 1 \\ 500 & \text{if } K1 = 1 \wedge WP2 = 1 \\ 400 & \text{if } K2 = 1 \wedge WP2 = 1 \\ 250 & \text{if } K3 = 1 \wedge WP2 = 1 \\ 200 & \text{if } K4 = 1 \wedge WP2 = 1 \\ 400 & \text{if } K1 = 1 \wedge WP3 = 1 \\ 250 & \text{if } K2 = 1 \wedge WP3 = 1 \\ 200 & \text{if } K3 = 1 \wedge WP3 = 1 \\ \left( (43 \cdot \sqrt[6]{Mg}) \right) & \text{if } K4 = 1 \wedge WP3 = 1 \\ 250 & \text{if } K1 = 1 \wedge WP4 = 1 \\ 200 & \text{if } K2 = 1 \wedge WP4 = 1 \\ \left( (43 \cdot \sqrt[6]{Mg}) \right) & \text{if } K3 = 1 \wedge WP4 = 1 \\ \left( (26 \cdot \sqrt[6]{Mg}) \right) & \text{if } K4 = 1 \wedge WP4 = 1 \end{cases}$$

$$V_g = 500$$

Ожидаемый режим взрывного превращения облака ТВС - детонация с диапазоном видимой скорости фронта пламени от 500 м/с и выше,  $V_g$ .

Расчет безразмерного параметрического расстояния:

$$r := 20..200$$

$$\lambda(r) := \frac{100 \cdot r}{(E)^{\frac{1}{3}}} \quad \lambda(150) = 7.103$$

По соотношениям для падающей волны находим.

Амплитуда фазы давления, Па:

$$\Delta P_{pl}(r) := P_0 \cdot \exp\left[0.299 - 2.058 \cdot \ln(\lambda(r)) + 0.26 \cdot (\ln(\lambda(r)))^2\right]$$

$$\Delta P_{pl}(150) = 6.566 \times 10^3$$

Амплитуда фазы разрежения, Па:

$$\Delta P_{\text{minus}}(r) := P_0 \cdot \exp\left[-1.46 - 1.402 \cdot \ln(\lambda(r)) + 0.079 \cdot (\ln(\lambda(r)))^2\right]$$

$$\Delta P_{\text{minus}}(150) = 2.041 \times 10^3$$

Импульс фазы сжатия, Па·с:

$$I_{\text{pl}}(r) := E^{\frac{1}{3}} \cdot \exp\left[-0.843 - 0.932 \cdot \ln(\lambda(r)) - 0.037 \cdot (\ln(\lambda(r)))^2\right]$$

Импульс фазы разрежения, Па·с:

$$I_{\text{minus}}(r) := E^{\frac{1}{3}} \cdot \exp\left[-0.873 - 1.25 \cdot \ln(\lambda(r)) + 0.132 \cdot (\ln(\lambda(r)))^2\right]$$

Длительность фазы сжатия, с:

$$\tau_{\text{pl}}(r) := 10^{-5} \cdot E^{\frac{1}{3}} \cdot \exp\left[0.106 + 0.448 \cdot \ln(\lambda(r)) - 0.026 \cdot (\ln(\lambda(r)))^2\right]$$

$$\tau_{\text{pl}}(150) = 0.051$$

Длительность фазы разрежения, с:

$$\tau_{\text{minus}}(r) := 10^{-5} \cdot E^{\frac{1}{3}} \cdot \exp\left[1.299 + 0.412 \cdot \ln(\lambda(r)) - 0.079 \cdot (\ln(\lambda(r)))^2\right]$$

$$\tau_{\text{minus}}(150) = 0.1281$$

Декремент затухания в падающей волне:

$$K(r) := 0.889 - 0.356 \cdot \ln(\lambda(r)) + 0.105 \cdot (\ln(\lambda(r)))^2 \quad K(150) = 0.595$$

Падающая волна в наиболее опасном случае детонации газовой смеси:

$$t := 0, 0.01 \dots 0.5$$

$$\Delta P(t) := 6.5 \cdot 10^3 \cdot \frac{\sin\left[\pi \cdot \frac{(t - 0.0509)}{0.128}\right]}{\sin\left(-\pi \cdot \frac{0.0509}{0.128}\right)} \cdot \exp\left(\frac{-0.595 \cdot t}{0.0509}\right)$$

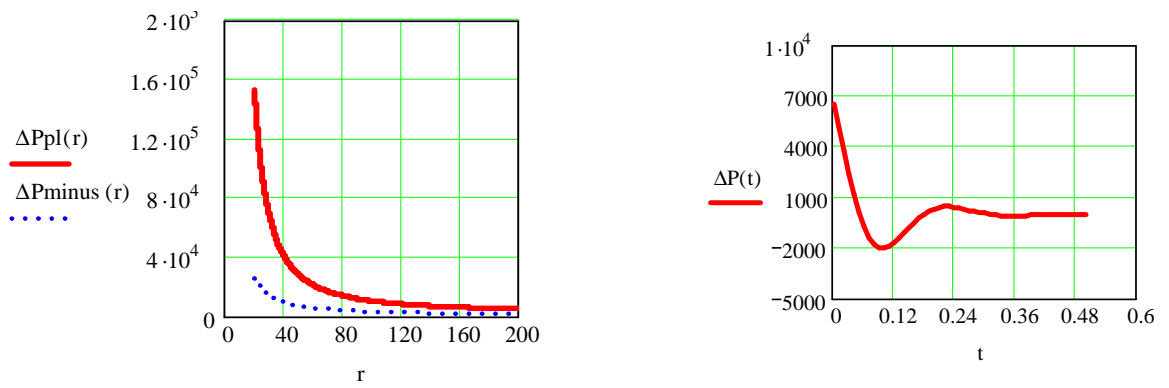


Рис.3.30. Зависимости избыточного давления фаз сжатия  $\Delta P_{pl}$ , разрежения  $\Delta P_{minus}$  и формы падающей волны  $\Delta P$

Используя значения  $\Delta P_{pl}(r)$  и  $I_{pl}(r)$ , вычислим вероятности:

1. Вероятность повреждений стен промышленных зданий:

$$r := 10..200 \quad V1(r) := \left( \frac{17500}{\Delta P_{pl}(r)} \right)^{8.4} + \left( \frac{290}{I_{pl}(r)} \right)^{9.3} \quad Pr1(r) := 5 - 0.26 \cdot \ln(V1(r))$$

$$P_{por1}(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr1(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

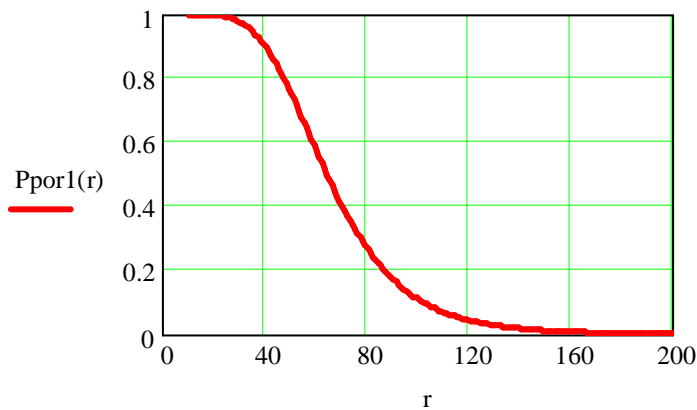


Рис.3.31. Зависимость вероятности повреждения зданий сооружений от расстояния для падающей волны

2. Вероятность разрушений промышленных зданий, при которых здания подлежат сносу:

$$V2(r) := \left( \frac{40000}{\Delta P_{pl}(r)} \right)^{7.4} + \left( \frac{460}{I_{pl}(r)} \right)^{11.3} \quad Pr2(r) := 5 - 0.22 \cdot \ln(V2(r))$$

$$Ppor2(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr2(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

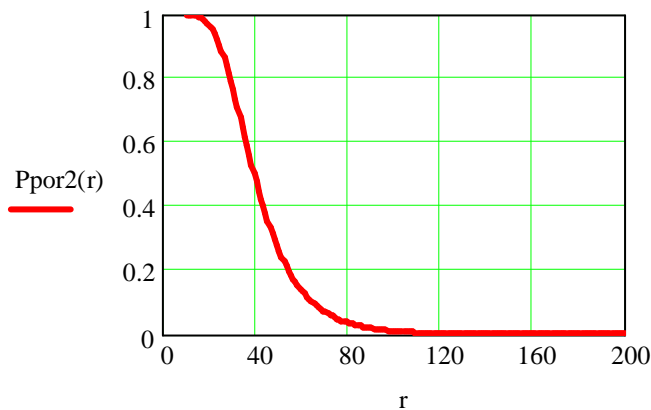


Рис.3.32. Зависимость вероятности разрушения зданий сооружений от расстояния для падающей волны

3. Вероятность длительной потери управляемости у людей, попавших в зону действия ударной волны при взрыве облака ТВС

$$p(r) := 1 + \frac{\Delta P_{pl}(r)}{P_0} \quad m := 80 \quad i(r) := \frac{I_{pl}(r)}{\sqrt{P_0} \cdot \sqrt[3]{m}} \quad V3(r) := \frac{4.2}{p(r)} + \frac{1.3}{i(r)}$$

$$Pr3(r) := 5 - 5.74 \cdot \ln(V3(r)) \quad Ppor3(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr3(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

4. Вероятность разрыва барабанных перепонок у людей от уровня перепада давления в воздушной волне:

$$Pr4(r) := -12.6 + 1.524 \cdot \ln(\Delta P_{pl}(r))$$

$$Ppor4(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr4(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

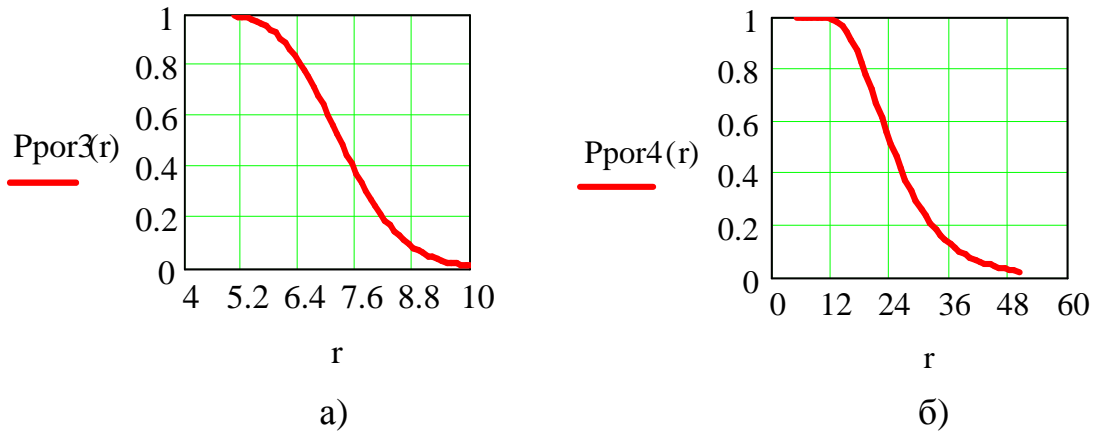


Рис.3.33. Зависимости вероятностей длительной управляемости людей а) и разрыва барабанных перепонок от уровня перепада давления для падающей волны

5. Вероятность отброса людей волной давления:

$$V5(r) := \frac{7.38 \cdot 10^3}{\Delta P_{pl}(r)} + \frac{1.3 \cdot 10^9}{\Delta P_{pl}(r) \cdot I_{pl}(r)} \quad Pr5(r) := 5 - 2.44 \cdot \ln(V5(r))$$

$$P_{por5}(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr5(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

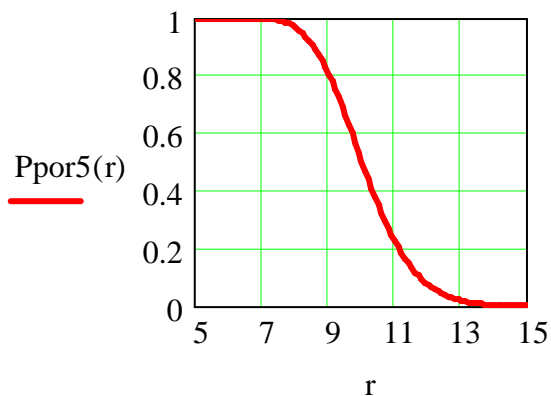


Рис.3.34. Зависимость вероятности отброса людей волной давления от расстояния при взрыве облака этилена для падающей волны

На расстоянии 150 м для падающей волны: около 2% вероятность повреждений и 1% вероятность разрушений промышленных зданий. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

По соотношениям для отраженной волны находим.

Амплитуда отраженной волны давления, Па:

$$\Delta P_{opl}(r) := P_0 \cdot \exp\left[1.264 - 2.056 \cdot \ln(\lambda(r)) + 0.211 \cdot (\ln(\lambda(r)))^2\right]$$

Амплитуда отраженной волны разрежения, Па:

$$\Delta P_{ominus}(r) := P_0 \cdot \exp\left[-0.673 - 1.043 \cdot \ln(\lambda(r)) + 0.252 \cdot (\ln(\lambda(r)))^2\right]$$

Импульс отраженной волны давления, Па·с:

$$I_{opl}(r) := E^{\frac{1}{3}} \cdot \exp\left[-0.07 - 1.033 \cdot \ln(\lambda(r)) + 0.045 \cdot (\ln(\lambda(r)))^2\right]$$

Импульс отраженной волны разрежения, Па·с:

$$I_{ominus}(r) := E^{\frac{1}{3}} \cdot \exp\left[-0.052 - 0.462 \cdot \ln(\lambda(r)) - 0.27 \cdot (\ln(\lambda(r)))^2\right]$$

Длительность отраженной волны давления, с:

$$\tau_{opl}(r) := 10^{-5} \cdot E^{\frac{1}{3}} \cdot \exp\left[-0.109 + 0.983 \cdot \ln(\lambda(r)) - 0.23 \cdot (\ln(\lambda(r)))^2\right]$$

$$\tau_{opl}(150) = \blacksquare$$

Длительность отраженной волны разрежения, с:

$$\tau_{ominus}(r) := 10^{-5} \cdot E^{\frac{1}{3}} \cdot \exp\left[1.265 + 0.857 \cdot \ln(\lambda(r)) - 0.192 \cdot (\ln(\lambda(r)))^2\right]$$

$$\tau_{ominus}(150) = 0.192$$

Декремент затухания в отраженной волне:

$$K_0(r) := 0.978 - 0.554 \cdot \ln(\lambda(r)) + 0.26 \cdot (\ln(\lambda(r)))^2 \quad K_0(150) = 0.891$$

Форма отраженной волны при взаимодействии со стенкой:

$$\Delta Pr(t) := 1.4 \cdot 10^4 \cdot \frac{\sin\left[\pi \cdot \frac{(t - 0.054)}{0.192}\right]}{\sin\left(-\pi \cdot \frac{0.054}{0.192}\right)} \cdot \exp\left(\frac{-0.891 \cdot t}{0.054}\right)$$

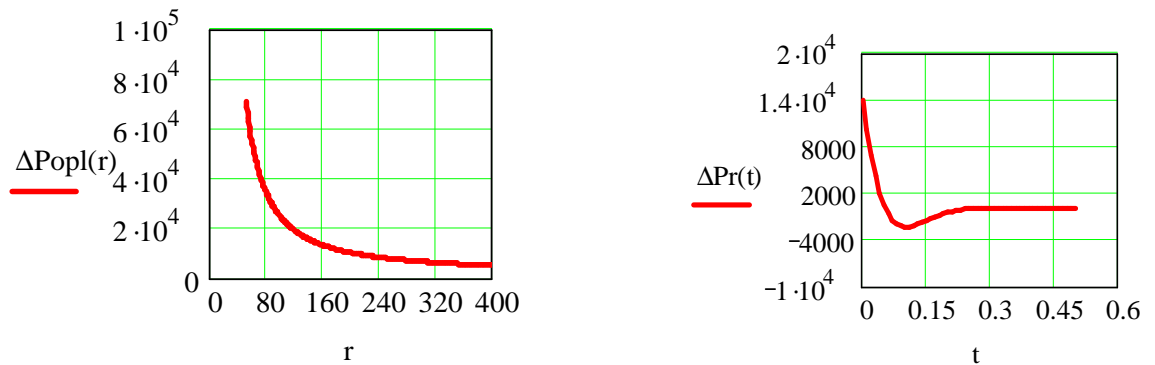


Рис.3.35. Зависимости амплитуды отраженной волны давления от расстояния и форма отраженной волны при взаимодействии со стенкой

Используя значения  $\Delta Popl(r)$  и  $I opl(r)$ , вычислим вероятности:

1. Вероятность повреждений стен промышленных зданий:

$$r := 20..400 \quad V1(r) := \left(\frac{17500}{\Delta Popl(r)}\right)^{8.4} + \left(\frac{290}{I opl(r)}\right)^{9.3} \quad Pr1(r) := 5 - 0.26 \cdot \ln(V1(r))$$

$$Ppor1(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr1(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

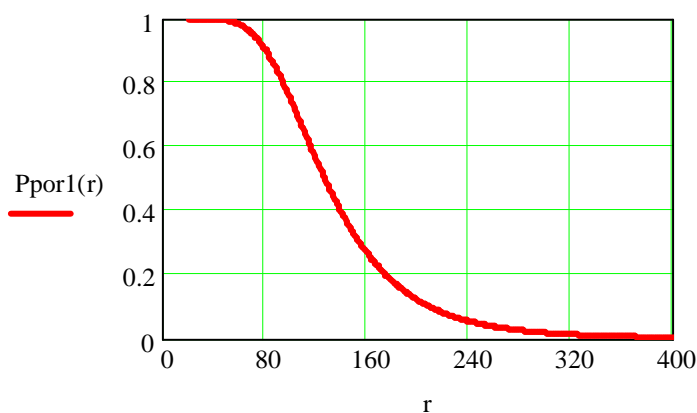


Рис.3.36. Зависимость вероятности повреждения зданий и сооружений от расстояния для отраженной волны давления

2. Вероятность разрушений промышленных зданий, при которых здания подлежат сносу:

$$V2(r) := \left( \frac{40000}{\Delta P(r)} \right)^{7.4} + \left( \frac{460}{I(r)} \right)^{11.3} \quad Pr2(r) := 5 - 0.22 \cdot \ln(V2(r))$$

$$Ppor2(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr2(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

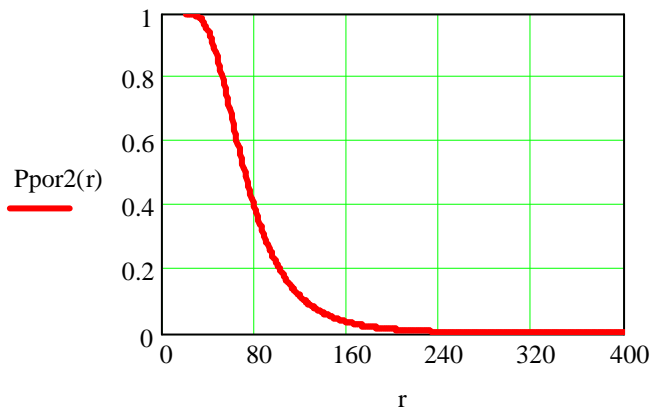


Рис.3.37. Зависимость вероятности разрушения зданий и сооружений от расстояния для отраженной волны давления

3. Вероятность длительной потери управляемости у людей, попавших в зону действия ударной волны при взрыве облака ТВС:

$$p(r) := 1 + \frac{\Delta P_{opl}(r)}{P_o} \quad m := 80 \quad i(r) := \frac{I_{opl}(r)}{\sqrt{P_o} \cdot \sqrt[3]{m}} \quad V3(r) := \frac{4.2}{p(r)} + \frac{1.3}{i(r)}$$

$$Pr3(r) := 5 - 5.74 \cdot \ln(V3(r)) \quad Ppor3(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr3(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$



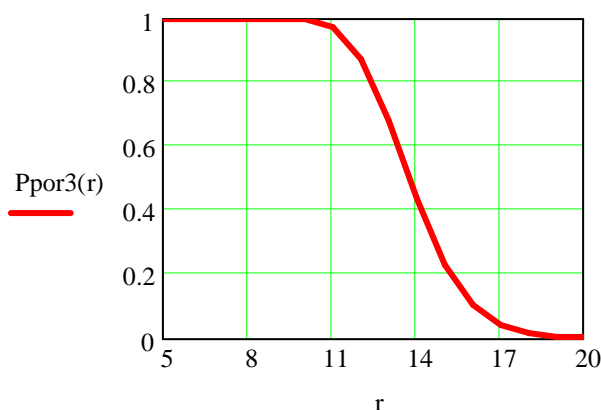


Рис.3.38. Зависимость вероятности длительной потери управляемости у людей, попавших в зону действия ударной волны от расстояния для отраженной волны давления

4. Вероятность разрыва барабанных перепонок у людей от уровня перепада давления в воздушной волне:

$$r := 20..60$$

$$Pr4(r) := -12.6 + 1.524 \cdot \ln(\Delta P_{opl}(r)) \quad Ppor4(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr4(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

5. Вероятность отброса людей волной давления для отраженной волны давления:

$$V5(r) := \frac{7.38 \cdot 10^3}{\Delta P_{opl}(r)} + \frac{1.3 \cdot 10^9}{\Delta P_{opl}(r) \cdot I_{opl}(r)} \quad Pr5(r) := 5 - 2.44 \cdot \ln(V5(r))$$

$$Ppor5(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr5(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

На расстоянии 150 м для отраженной волны: 32% вероятность повреждений и 4% вероятность разрушений промышленных зданий. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

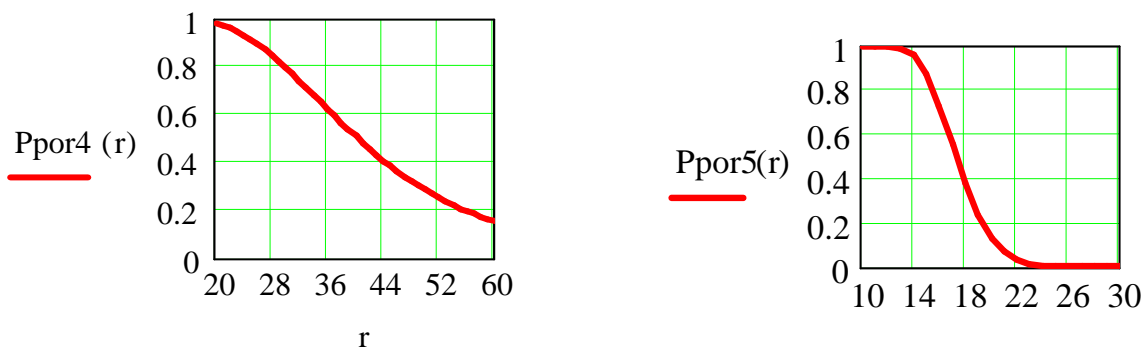


Рис.3.39. Зависимости вероятностей разрыва барабанных перепонок от уровня перепада давления а) и отброса людей волной давления для отраженной волны

**Пример 3.12.** Тепловые характеристики огненного шара (см. 3.5.4.2).

Вскрытие резервуара емкостью 1000т жидкого пропана. Обозначения: М - половина вместимости емкости по массе, т; R0 - радиус огненного шара, м; ts - время существования огненного шара, сек; q - поток излучения, кВт/м<sup>2</sup>; E - мощность поверхностной эмиссии, кВт/м<sup>2</sup> (для баллонов, вертикальных и горизонтальных резервуаров E=270, для сферического сосуда E=200). Поток излучения q, падающий на мишень определяется как  $q = E \cdot F \cdot Tr$ , где F - коэффициент, учитывающий фактор угла падения, Tr - проводимость воздуха; Q - импульс теплового излучения, кДж/м<sup>2</sup>; r - расстояние по горизонтали от хранилища СНГ до мишени ( $r > 2R0$ ).

Программа расчета в Mathcad.

$$E := 270 \quad M := 500 \quad R0 := 29 \cdot \sqrt[3]{M} \quad R0 = 230.173 \quad ts := 4.5 \cdot \sqrt[3]{M} \quad ts = 35.717$$

$$r := 200.. 2000$$

$$F(r) := R0^2 \cdot \frac{r}{\sqrt{(R0^2 + r^2)^3}} \quad Tr(r) := 1 - 0.058 \cdot \ln(r) \quad q(r) := E \cdot F(r) \cdot Tr(r)$$

$$Q(r) := q(r) \cdot ts \quad \text{кДж/(м*м)}$$

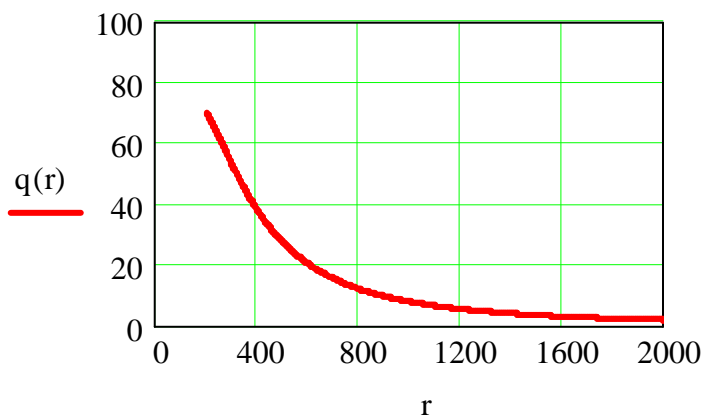


Рис.3.40. Поток излучения  $q$  ( $\text{кВт}/\text{м}^2$ ) от расстояния в результате сгорания пропано-воздушной смеси от разлива 1000 т жидкого пропана.

Болевой температурный порог для кожи человека соответствует температуре  $44\text{ }^\circ\text{C}$ . При более высокой температуре степень поражения зависит от удельной энергии  $Q$  и длительности облучения. Без болевых ощущений кожа выдерживает тепловой поток интенсивностью  $q = 21\text{ кВт}/\text{м}^2$  в течение 2 сек. При стационарном потоке этим данным соответствует  $Q = 42\text{ кДж}/\text{м}^2$ . Предельно безопасный радиус (радиус эвакуации) для человека составляет  $(3,1 - 3,6) \cdot R_0$ .

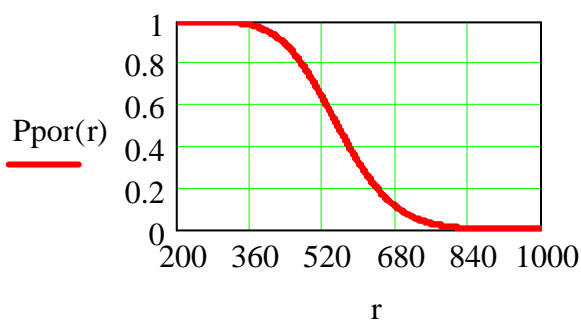


Рис.3.41. Вероятность поражения тепловым излучением при вскрытии резервуара с 1000 т пропана в зависимости от расстояния

Условную вероятность поражения человека (рис.3.41) тепловым излучением определяют следующим образом:

$$P(r) := -14.9 + 2.56 \cdot \ln(ts \cdot q(r)^{1.33}) \quad P_{por}(r) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{P(r)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

**Примечание.** Сравним некоторые результаты при расчете избыточного давления и импульса волны давления при сгорании смесей горючих газов и паров на примере 3.2 (взрыв паров бензина в результате пролива при разгерметизации автоцистерны) по формуле (3.5) и по методике ТВС /38/, описанной в разделе 3.6. Результаты расчета представлены на рис.3.42.

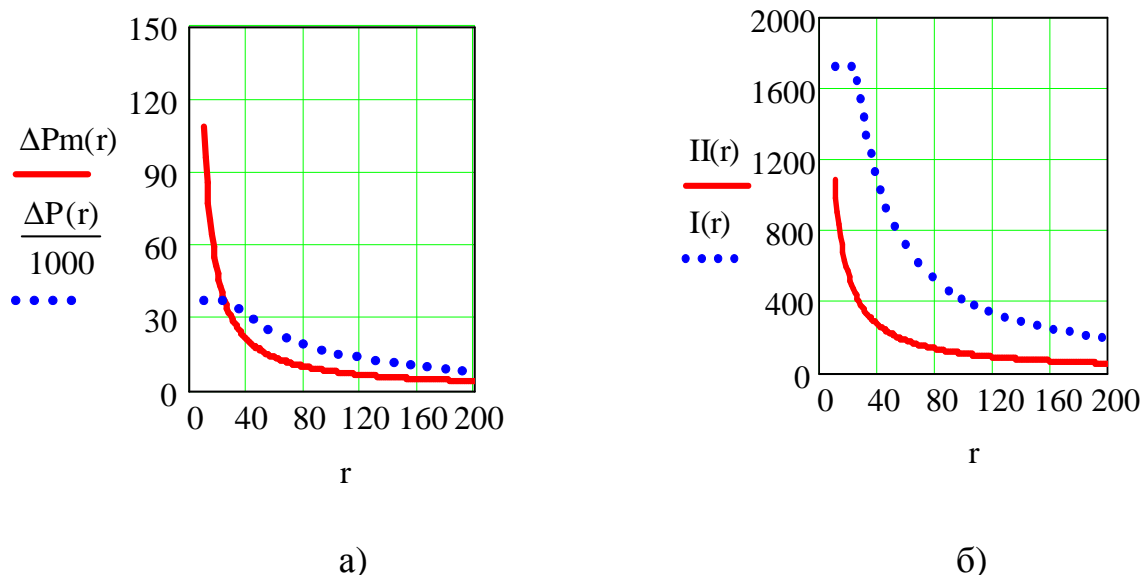


Рис.3.42. Зависимости избыточного давления (кПа) а) и импульса волны давления (Па·с) б) от расстояния (м) при взрыве паров бензина в результате пролива при разгерметизации автоцистерны, просчитанные по различным методикам (сплошная кривая по формуле (3.5), пунктирная кривая по методике ТВС)

Как видно из рис. 3.42 избыточное давление, вычисленное по формуле (3.5) имеет очень большие значения на начальном участке кривой и быстро падает с расстоянием по сравнению с методикой ТВС /38/. Например, на расстоянии 10 м  $\Delta P$  по формуле (3.5) будет равно 108,8 кПа, по методике ТВС - 36,97 кПа, на расстоянии 50 м соответственно 16,32 кПа и 27,2 кПа, на

расстоянии 100 м соответственно 7,86 кПа и 15,8 кПа. Аналогичные выводы можно сделать и по кривым импульса волны давления. Методика ТВС основана на мировом опыте /55/ и учитывает при расчетах класс горючего вещества и вид окружающего пространства. Поэтому при расчете взрывных волн, генерируемых парогазовыми и дисперсными средами предпочтительнее пользоваться методикой ТВС (см.3.6.1).

### **3.7. Методика оценки последствий аварий на пожаро, - взрывоопасных объектах**

В отличие от методики ТВС /38/ данная методика /41/ разработана для оценки последствий аварий, на объектах по хранению, переработке и транспортировке не только сжиженных углеводородных газов, сжатых углеводородных газов, но и легковоспламеняющихся жидкостей, конденсированных взрывчатых веществ (КВВ).

В качестве последствий аварий рассматривается разрушения зданий и сооружений, находящихся как на территории объекта, так и вне его, а также поражение персонала объекта и населения.

Методика может быть использована при разработке планов мероприятий по предотвращению чрезвычайных ситуаций и уменьшению ущерба от последствий аварий.

Взрывные превращения облаков ТВС. Для людей, находящихся на открытой местности, определяется расстояние, на котором происходит поражение при различных режимах взрывных превращений облаков ТВС.

Количество погибших, среди людей, находящихся на открытой местности  $N_M$ , определяется формулой:

$$N_M = \sum_{i=1}^6 \frac{n_{iM} \cdot p_{iM}}{100}, \quad (3.46)$$

где  $n_{iM}$  - количество людей, находящихся в  $i$ -ой зоне (определяется по картограмме распределения людей);  $p_{iM}$  - процент людей, погибающих в  $i$ -ой

зоне:

$p_{1M} = 99\%$ ,  $p_{2M} = 90\%$ ,  $p_{3M} = 50\%$ ,  $p_{4M} = 10\%$ ,  $p_{5M} = 1\%$ ,  $p_{6M} = 0\%$ ;  $b$  – количество режимов взрывного превращения.

Количество погибших среди людей, находящихся в зданиях, определяется по формуле:

$$N_3 = \sum_{i=1}^4 n_{ijk} \left(1 - \frac{P_{ijk}}{100}\right) + \sum_{i=3}^4 n_{in} \left(1 - \frac{P_{in}}{100}\right), \quad (3.47)$$

где  $n_{ijk}$  – количество людей, попавших в жилые и административные здания, находящиеся в  $i$ -ой зоне (определяется по картограмме распределения людей);  $P_{ijk}$  – процент людей, выживающих в жилых и административных зданиях, попавших в  $i$ -ую зону:  $p_{1ж}=30\%$ ,  $p_{2ж}=85\%$ ,  $p_{3ж}=94\%$ ,  $p_{4ж}=98\%$ ;  $n_{in}$  – количество людей, находящихся в промышленных зданиях и сооружениях, попавших в  $i$ -ую зону (определяется по картограмме распределения людей);  $P_{in}$  – процент людей, выживающих в промышленных зданиях и сооружениях, попавших в  $i$ -ую зону:  $p_{3н}=40\%$ ,  $p_{4н}=90\%$ .

**Порядок оценки последствий аварий на объектах по хранению, переработке и транспортировке горючих жидкостей.**

При разрушении резервуара, объем вытекшей жидкости определяется по формуле:

$$V = 0,79 \cdot D^2 \cdot L, \quad (3.48)$$

где  $D$  – диаметр трубопровода, м;  $L$  – длина отрезка между соседними отсекателями, м.

Линейный размер разлития зависит от объема вытекшей жидкости и условий растекания. При свободном растекании диаметр разлития может быть определен из соотношения:

$$d = (25.5 \cdot V)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.49)$$

где  $d$  – диаметр разлития, м;  $V$  – объем жидкости, м.

При разлитии в поддон или обвалование необходимо определить, закрыто ли полностью слоем жидкости их дно. Условием для закрытия является наличие слоя жидкости толщиной более 0,02 м.

Величина теплового потока на заданном расстоянии от горящего разлития вычисляется по формуле:

$$q = 0.8 \cdot Q_0 \cdot \exp(-0.03 \cdot x), \quad (3.50)$$

где  $Q_0$  – тепловой поток на поверхности факела, кВт/м<sup>2</sup>;  $x$  – расстояние до фронта пламени, м.

Расстояние, на котором будет наблюдаться поток с заданной величиной  $q$ , определяется по формуле:

$$x = 33 \cdot \ln\left(1.25 \cdot \frac{Q_0}{q}\right). \quad (3.51)$$

Величина индекса дозы теплового излучения определяется из соотношения:

$$I = 60 \cdot q^{\frac{4}{3}}. \quad (3.52)$$

### **Порядок оценки последствий аварий на объектах хранения, переработке и транспортировки сжатых углеводородных газов (СЖУГ)**

При мгновенной разгерметизации резервуара хранения масса вещества  $M$  в облаке равняется полной массе СЖУГ, находящихся в резервуаре.

При длительном истечении СЖУГ из резервуара масса вещества в облаке  $M$  определяется по формуле

$$M = 40 \cdot S_{\text{отв}} \cdot (P_p \cdot \rho_r)^{1/2},$$

где  $S_{\text{отв}}$  – площадь сечения отверстия, м<sup>2</sup>;  $P_p$  – давление в резервуаре, Па;  $\rho_r$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

При истечении сжатого газа из трубы масса вещества в облаке определяется по формуле

$$M = 66 \cdot S \cdot (P_p \rho_r)^{1/2},$$

где  $S$  – площадь сечения трубы, м<sup>2</sup>.

Плотность газа определяется из соотношения

$$\rho_r = (M_0 P_p) / (RT),$$

где  $M_0$  – молярная масса газа, кг/кмоль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль · К).

### **Осколки оборудования**

Число осколков  $N$ , образующихся при разрыве сферического резервуара с СУГ, определяется путем округления величины  $N$ , найденной из соотношения

$$N = -3,77 + 0,0096 \cdot V,$$

где  $V$  – объем резервуара, л.

Средняя масса одного осколка  $m$  определяется по формуле

$$m = M_p / N,$$

где  $M_p$  – масса оболочки резервуара, кг.

При разрыве цилиндрического резервуара образуются два осколка равной массы.

Определяется перечень зданий и сооружений, попадающих в зону разлета осколков. Здания получают среднюю степень разрушения, а технологические установки и трубопроводы – сильную.

### **3.8. Чрезвычайные ситуации, вызванные выбросом токсических веществ**

Для оценки последствий аварий, сопровождающихся выбросом токсических веществ, используется несколько методик /38,39,66/. Методика РД 52.04 предназначена для решения задач ГО, поскольку она позволяет определить только границы зоны порогового поражения. Методика ТОКСИ позволяет определить пространственно-временное поле концентраций опасного химического вещества (ОХВ), размеры зон химического заражения, соответствующих различной степени поражения людей, определяемой по



ингаляционной токсодозе. Последняя методика рекомендуется для использования при разработке декларации безопасности объектов повышенной опасности.

Последствия выброса опасных веществ определяются в три этапа: определение мощности и скорости выброса; определение распространения загрязняющего вещества после выброса и определение его воздействия на исследуемые объекты.

Для анализа последствий необходимо иметь модели для расчета:

- выбросов вредных веществ;
- нарушений герметичности резервуара давления;
- утечки из трубопровода;
- выброс со взрывом и без взрыва;
- испарения с поверхности жидкости и т.д.;
- рассеяния вредных веществ;
- загрязнения воздуха на малых и больших расстояниях;
- загрязнения воды;
- загрязнения почвы и продовольствия;
- теплового излучения;
- взрывов;
- выпадения примесей;
- химических реакций;
- долгосрочный и кратковременной токсичности (для факторов с пороговым и безпороговым действием, учет аддитивности, синергизма, фармакинетики);
- ущерба для здоровья населения и другие.

### *3.8.1. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте*

Методика /39/ предназначена для заблаговременного и оперативного прогнозирования масштабов заражения на случай выбросов сильнодействующих ядовитых веществ в окружающую среду при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте.

Сильнодействующее ядовитое вещество (СДЯВ) – это химическое вещество, применяемое в народном хозяйстве, которое при выливе или выбросе может приводить к загрязнению воздуха на уровне поражающих концентраций.

Зона заражения СДЯВ – территория, на которой концентрация СДЯВ достигает значений, опасных для жизни людей.

Под прогнозированием масштаба заражения СДЯВ понимается определение глубины и площади зоны заражения СДЯВ.

Методика распространяется на случаи выброса СДЯВ в атмосферу в газообразном, парообразном или аэрозольном состоянии.

Масштабы заражения СДЯВ в зависимости от их физических свойств и агрегатного состояния рассчитываются для первичного и вторичного облаков. Первичное облако – облако СДЯВ, образующееся в результате мгновенного (1-3 мин) перехода в атмосферу части СДЯВ из емкости при ее разрушении.

Вторичное облако – облако СДЯВ, образующееся в результате испарения разлившегося вещества с подстилающей поверхности.

Исходные данные для прогнозирования масштабов заражения СДЯВ:

- общее количество СДЯВ на объекте и данные о размещении их запасов в технологических емкостях и трубопроводах;

- количество СДЯВ, выброшенных в атмосферу, и характер их разлива на подстилающей поверхности ("свободно", "в поддон" или "в обваловку");
- высота поддона или обваловки складских емкостей;
- метеорологические условия: температура воздуха, скорость ветра на высоте 10 м (на высоте флюгера), степень вертикальной устойчивости воздуха.

При заблаговременном прогнозировании масштабов заражения на случай производственных аварий в качестве исходных данных рекомендуется принимать: выбросе СДЯВ ( $Q_0$ ) – количество СДЯВ в максимальной по объему единичной емкости (технологической, складской, транспортной и др.), метеорологические условия – инверсия, скорость ветра 1 м/с.

Для прогноза масштабов заражения непосредственно после аварии должны браться конкретные данные о количестве выброшенного (разлившегося) СДЯВ и реальные метеоусловия.

Внешние границы зоны заражения СДЯВ рассчитывается по пороговой токсодозе при ингаляционном воздействии на организм человека.

При прогнозировании последствий химических аварий применяются следующие допущения:

- емкости, содержащие СДЯВ, при авариях разрушаются полностью;
- толщина  $h$  слоя жидкости для СДЯВ, разлившихся свободно на подстилающей поверхности принимается равной 0,05 м по всей площади разлива;
- при проливе ОХВ из емкостей, имеющих самостоятельным поддон (обваловку), толщина слоя жидкости принимается равной  $h = H - 0,2$ , где  $H$  – высота поддона (обваловки), м;
- для СДЯВ, разлившихся в поддон или обваловку при разливах из емкостей, расположенных группой, имеющих общий поддон (обваловку):

$$h = \frac{Q_0}{F \cdot d},$$

где  $Q_0$  - количество выброшенного (разлившегося) при аварии вещества, т;  $d$  – плотность СДЯВ, (табл.3.22) т/м<sup>3</sup>;  $F$  – реальная площадь разлива в поддон (обваловку), м<sup>2</sup>.

- предельное время пребывания людей в зоне заражения и продолжительность сохранения неизменными метеорологических условий (степени вертикальной устойчивости атмосферы, направления и скорости ветра) составляет 4 часа. По истечении указанного времени прогноз обстановки должен уточняться.

Прогнозирование глубины зоны заражения СДЯВ проводится по следующей методике.

#### 1. Определение количественных характеристик при выбросе СДЯВ.

Количественные характеристики выброса СДЯВ для расчета масштабов заражения определяются по их эквивалентным значениям. Под эквивалентным количеством СДЯВ понимается такое количество хлора, масштаб заражения которым при инверсии эквивалентен масштабу заражения при данной степени вертикальной устойчивости атмосферы количество СДЯВ, перешедшим в первичное (вторичное) облако.

##### 1.1. Определение эквивалентного количества вещества в первичном облаке.

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

$$Q_{31} = K_1 K_3 K_5 K_7 Q_0,$$

$K_1$  – коэффициент, зависящий от условий хранения СДЯВ (Приложение 3 /39/), для сжатых газов  $K_1 = 1$ );  $K_3$  – коэффициент, равный отношению пороговой токсодозы хлора к пороговой токсодозе другого СДЯВ (Приложение 3);  $K_5$  – коэффициент, учитывающий степень вертикальной устойчивости атмосферы, для инверсии принимается равным 1, для

изотермии 0,23, для конвекции 0,08;  $K_7$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха (Приложение 3, для сжатых газов  $K_7 = 1$ ).

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

$$Q_0 = \rho_{ж} \cdot V_x,$$

где  $V_x$  – объем хранилища,  $m^3$ .

При авариях на газопроводах  $Q_0$  рассчитывается по формуле

$$Q_0 = \frac{n \cdot \rho_{ж} \cdot V_r}{100},$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность СДЯВ;  $V_r$  – объем секции газопровода между автоматическими отсекающими,  $m^3$ .

При определении величины  $Q_{э1}$  для сжиженных газов, не вошедших в приложение 3 методики /39/, значение коэффициента  $K_7$  принимается равным 1, а коэффициент  $K_1$  рассчитывается по соотношению:

$$K_1 = \frac{c_p \Delta T}{\Delta H_{исп}},$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость жидкого СДЯВ,  $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $\Delta T$  – разность температур жидкого СДЯВ до и после разрушения емкости,  $^\circ C$ ;  $\Delta H_{исп}$  – удельная теплота испарения жидкого СДЯВ при температуре испарения,  $kJ/kg$ .

## 1.2. Определение эквивалентного количества вещества во вторичном облаке.

Эквивалентное количество вещества во вторичном облаке рассчитывается по формуле:

$$Q_{э2} = (1 - K_1) K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 \frac{Q_0}{h \cdot \rho_{ж}},$$

где  $K_2$  – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств СДЯВ (приложение 3 /39/);  $K_4$  – коэффициент, учитывающий скорость ветра (приложение 4 /39/);  $K_6$  – коэффициент, зависящий от времени  $N$ ,

прошедшего после начала аварии; значение коэффициента  $K_6$  определяется после расчета продолжительности  $T$  (час) испарения вещества:

$$K_6 = \begin{cases} \tau^{0,8} & \text{при } \tau < \tau_{\text{исп}} \\ \tau_{\text{исп}}^{0,8} & \text{при } \tau \geq \tau_{\text{исп}} \end{cases}$$

при  $\tau < 1$  ч  $K_6$  принимается для 1 ч;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность СДЯВ;  $h$  – толщина слоя СДЯВ, м.

Продолжительность поражающего действия СДЯВ определяется временем его испарения  $\tau_{\text{исп}}$  (час) с площади разлива:

$$\tau_{\text{исп}} = \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot h}{K_2 K_4 K_7}$$

При определении  $Q_{3,2}$  для веществ, не вошедших в приложение 3, значение коэффициента  $K_7$  принимается равным 1, а коэффициент  $K_2$  определяется по формуле

$$K_2 = 8,1 \cdot 10^{-6} \cdot P \cdot \sqrt{M},$$

где  $P$  – давление насыщенного пара вещества при заданной температуре воздуха;  $M$  – молекулярная масса вещества.

2. Расчет глубины зоны заражения при аварии на химически опасном объекте.

Расчет глубины зоны заражения первичным (вторичным) облаком СДЯВ при авариях на технологических емкостях, хранилищах и транспорте ведется с использованием приложений 2 и 5 /39/. Максимальные значения глубины зоны заражения первичным ( $\Gamma_1$ ) и вторичным ( $\Gamma_2$ ) облаком СДЯВ, определяются в зависимости от эквивалентного количества вещества и скорости ветра, скорости переноса переднего фронта зараженного воздуха при заданной скорости ветра и степени вертикальной устойчивости. Полная глубина зоны заражения  $\Gamma$  (км), обусловленной воздействием первичного и вторичного облака СДЯВ, определяется как:

$$\Gamma_{\text{зар}} = \begin{cases} \Gamma_1 + 0,5 \cdot \Gamma_2, & \text{если } \Gamma_1 > \Gamma_2, \\ \Gamma_2 + 0,5 \cdot \Gamma_1, & \text{если } \Gamma_1 < \Gamma_2. \end{cases}$$

Полученное значение сравнивается с предельно возможным значением глубины переноса воздушных масс  $\Gamma_n$ , определяемым по формуле:

$$\Gamma_{\text{пред}} = \tau \cdot u,$$

где  $\tau$  – время от начала аварии, ч;  $u$  – скорость переноса переднего фронта зараженного воздуха при данной скорости ветра и степени вертикальной устойчивости воздуха, км/ч (приложение 5).

За истинную глубину зоны заражения принимается величина:

$$\Gamma = \min \{ \Gamma_{\text{зар}}, \Gamma_{\text{пред}} \}$$

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

$$t = \frac{x}{v},$$

где  $x$  – расстояние от источника заражения до заданного объекта, км;  $v$  – скорость переноса переднего фронта облака зараженного воздуха, км/час (определяется по таблице приложения 5 /39/).

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

3. 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 СДЯВ на объекте и следующие метеорологические условия: инверсия, скорость ветра 1 м/с.

Эквивалентное количество СДЯВ в облаке зараженного воздуха определяется аналогично рассмотренному в п.1.2 методу для вторичного облака при свободном разливе. При этом суммарное эквивалентное количество  $Q_3$  рассчитывается по формуле:

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

где  $K_{2i}$  – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств  $i$ -го СДЯВ;  $K_{3i}$  – коэффициент, равный отношению пороговой токсодозы хлора к пороговой токсодозе  $i$ -го СДЯВ;  $K_{6i}$  – коэффициент, зависящий от времени, прошедшего после разрушения объекта;  $K_{7i}$  – поправка на температуру для  $i$ -го СДЯВ;  $Q_i$  – запасы  $i$ -го СДЯВ на объекте, т;  $d_i$  – плотность  $i$ -го СДЯВ.

Полученные по приложению 2 значения глубины зоны заражения  $\Gamma$  в зависимости от рассчитанного значения  $Q_3$  и скорости ветра сравниваются с предельно возможным значением глубины переноса воздушных масс  $\Gamma_{\text{п}}$ . За окончательную расчетную глубину зоны заражения принимается меньшее из двух сравниваемых между собой значений.

Согласно методике площадь фактического заражения СДЯВ – площадь территории, зараженной СДЯВ в опасных для жизни пределах. Площадь зоны возможного заражения СДЯВ – площадь территории, в пределах которой под воздействием изменения направления ветра может перемещаться облако СДЯВ, определяется по формуле:

$$S_{\text{в}} = 8,72 \cdot 10^{-3} \cdot \Gamma^2 \cdot \varphi,$$

где  $S_{\text{в}}$  – площадь зоны возможного заражения СДЯВ, км<sup>2</sup>;  $\varphi$  – угловые размеры зоны возможного заражения СДЯВ в зависимости от скорости ветра (выбираются из таблицы);  $\Gamma$  – глубина зоны заражения, км.

Площадь зоны фактического заражения  $S_{\text{ф}}$  рассчитывается как:

$$S_{\text{ф}} = K_8 \cdot \Gamma^2 \cdot \tau^{0,2},$$

где  $K_8$  – коэффициент, зависящий от степени вертикальной устойчивости воздуха, принимается равным: 0,081 при инверсии; 0,133 при изотермии; 0,235 при конвекции;  $\tau$  – время, прошедшее после начала аварии, ч.

В зависимости от скорости приземного ветра зоны заражения наносятся на карты в виде круга или сектора с угловыми размерами:

Скорость ветра, м/с	< 0,5	0,6...1	1,1...2,0	>2
Угловые размеры, град	360	180	90	45



В случае аварии на ОХО, расположенном на расстоянии  $R$ , км, от города и при условии, что  $\Gamma > R$ , зона заражения охватывает как город, так и загородную зону.

Площадь зоны заражения ОХВ в городе,  $\text{км}^2$ , равна

$$S_{\text{гор}} = \frac{S_{\text{зар}}}{\pi} \cdot \left[ \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{(2 \cdot R - \Gamma)}{\Gamma} \right] \cdot \frac{S(2 \cdot R - \Gamma)}{1,6 \cdot \Gamma^2} \cdot \sqrt{\Gamma \cdot R - R^2},$$

а в загородной зоне,  $\text{км}^2$ :

$$S_{\text{з.з.}} = S_{\text{ф}} - S_{\text{гор}}.$$

Основными факторами, влияющими на количество пораженных людей среди персонала и населения, оказавшихся в зоне заражения, являются:

- 1) различие в характере воздействия на население первичного и вторичного облаков ОХВ;
- 2) количество населения, оказавшегося в зоне возможного заражения;
- 3) степень защищенности населения, попавшего в зону заражения, от воздействия опасных концентраций ОХВ.

Различия в воздействии первичного и вторичного облаков на человека заключается в том, что первичное облако имеет более высокую концентрацию паров ОХВ, но воздействует кратковременно, а вторичное облако, имея более низкую концентрацию паров ОХВ, воздействует на человека в зоне заражения более длительное время.

Принимаем, что население, как в городе, так и в загородной зоне, распределено по территории равномерно.

Количество населения, попавшего в зону заражения,  $N$ , человек, рассчитывается исходя из средней плотности по формуле

$$N = P_{\text{гор}} S_{\text{гор}} + P_{\text{з.з.}} S_{\text{з.з.}},$$

где  $P_{\text{гор}}, P_{\text{з.з.}}$  – плотности населения соответственно в городе и загородной зоне, чел./ $\text{км}^2$ ;  $S_{\text{гор}}, S_{\text{з.з.}}$  – площади территории в городе и загородной зоне, приземный слой воздуха которых подвергся заражению,  $\text{км}^2$ .

Оценка последствий химической аварии (ожидаемого ущерба) может быть представлена следующим образом:

$$P_{\text{пор}} = \frac{N_{\text{пор}}}{N} = \sum q_i (1 - k_{\text{защ.}i}),$$

где  $N_{\text{пор}}$  – количество пораженного населения, чел.,  $N$  – общее количество населения, чел.;  $q_i$  – доля населения, защищаемая от ОХВ  $i$ -м способом;  $k_{\text{защ.}i}$  – коэффициент защиты (укрытие  $i$ -го типа).

В случае образования первичного и вторичного облаков сначала рассчитывают количество пораженных от первичного облака. Расчет количества человек, пораженных ОХВ вторичного облака, производится путем вычитания числа пораженных от первичного облака из общего количества населения, попавшего в зону заражения.

### *3.8.2. Методика оценки последствий химических аварий*

В данном разделе представлена методика оценки последствий химических аварий, разработанная НТЦ "Промышленная безопасность" с учетом внесенных модификаций и исправлений /38/ (Методика "ТОКСИ").

Методика оценки последствий химических аварий предназначена для оценки масштабов поражения при промышленных авариях с выбросом опасных химических веществ (ОХВ) и оценки процесса рассеяния выбросов газообразных химических веществ в атмосфере и позволяет определить:

- количество поступивших в атмосферу опасных химических веществ (ОХВ) при различных авариях;
- пространственно-временное поле концентраций ОХВ в атмосфере;
- размеры зон химического заражения, соответствующие различной степени поражения людей, определяемой по ингаляционной токсодозе (в том числе пороговой и смертельной);
- степень поражения людей в случае химической аварии;

Методика рекомендуется для использования:

- при разработке декларации безопасности промышленного объекта;
- при проведении анализа опасностей и рисков промышленных производств, на которых производятся, используются, транспортируются или хранятся ОХВ;
- при разработке планов локализации и ликвидации последствий химических аварий;
- при разработке иных мероприятий по предупреждению техногенных чрезвычайных ситуаций, защите персонала и населения.

По данной методике производится количественная оценка последствий химической аварии на промышленном объекте с выбросом опасных химических веществ в атмосферу. Она позволяет определять зоны химического заражения при авариях на технологических емкостях и хранилищах, при аварийном выбросе ОХВ из скважин, а также при транспортировке ОХВ железнодорожным, автомобильным и трубопроводным транспортом.

Методика распространяется на случаи выброса ОХВ в атмосферу как в жидком, так и газообразном состоянии (в технологическом оборудовании ОХВ могут находиться как в жидком, так и газообразном состоянии).

Расчеты могут производиться согласно следующих сценариев аварии.

Для ОХВ, находящегося в технологическом оборудовании в **газообразном** состоянии.

### **Сценарий 1.**

Разрушение оборудования с выбросом всего объема ОХВ, образование первичного облака, рассеяние первичного облака и воздействия на окружающую среду.

### **Сценарий 2.**

Разрушение оборудования и истечение газа из разрушенного оборудования при отсутствии пролива жидкой фазы; рассеяние облака и воздействия на окружающую среду.

При истечении газа из разрушенного трубопровода возможно отсечение (либо в результате использования запирающей арматуры, либо в результате остановки компрессоров, подающих ОХВ в трубопровод, либо в результате и того и другого) аварийного участка трубопровода и истечение ОХВ из него. При этом также образуется облако, которое рассеивается в атмосфере и воздействует на окружающую среду.

Для ОХВ, находящегося в технологическом оборудовании в **жидком** состоянии.

По сценариям 1 и 3 ОХВ мгновенно поступает в окружающую среду; по сценариям 2 и 4 ОХВ поступает в окружающую среду через отверстия площадью  $S$  в течение продолжительного времени. Сценарии 1 и 3 применимы только к емкостному оборудованию, сценарии 2 и 4 – как к емкостному оборудованию, так и к трубопроводам.

### **Сценарий 3.**

Разрушение оборудования с жидким ОХВ, выбросе ОХВ в окружающую среду, при наличии перегрева у жидкой фазы возможно ее вскипание с образованием в атмосфере газокапельного облака. Часть жидкой фазы может пролиться на подстилающую поверхность – либо в обваловку, либо на неограниченную площадь. Если жидкость при этом имеет температуру кипения меньше температуры поверхности, то произойдет вскипание жидкости при ее соприкосновении с подстилающей поверхностью. Из газовой фазы, содержащейся в оборудовании, из образовавшейся при вскипании за счет перегрева жидкой фазы газокапельной фазы и из газа, образующегося при кипении пролива, образуется первичное облако, которое рассеивается в атмосфере и воздействует на окружающую среду.

Из пролива происходит испарение ОХВ, в результате чего образуется вторичное облако, которое также рассеивается в атмосфере и воздействует на окружающую среду.

#### **Сценарий 4. Аварии на емкостях.**

Разрушение оболочки емкости выше уровня жидкости и длительное истечение газа из разрушенного оборудования при отсутствии пролива жидкой фазы (если жидкость находится в перегретом состоянии, то происходит вскипание жидкости, в результате которого в дополнение к газовой фазе, содержащейся в емкости на момент начала аварии, добавится газовая фаза, образовавшаяся при кипении), рассеяние газового облака ОХВ (вторичного) и воздействию его на окружающую среду.

Разрушение оболочки емкости ниже уровня жидкости и истечение жидкой фазы из разрушенного оборудования, образование пролива на месте выброса.

Если жидкость в емкости находилась в перегретом состоянии, то происходит вскипание жидкости сразу после ее выброса из емкости и образование в атмосфере газочапельной взвеси. Затем происходит кипение жидкой фазы (той ее части, что не участвовала в формировании газочапельной взвеси в атмосфере) при проливе ее на подстилающую поверхность. При этом из газа, образовавшегося при кипении пролива, а также из газочапельной взвеси выброса, поступившего из емкости в атмосферу за время кипения пролива, формируется первичное облако, которое рассеивается в атмосфере и воздействует на окружающую среду.

Продолжающийся (если не вся жидкая фаза, расположенная выше уровня отверстия разгерметизации, была выброшена из блока за время формирования первичного облака) выброс жидкой фазы идет в пролив, с поверхности которого происходит испарение ОХВ.

При истечении перегретой жидкости продолжающийся выброс жидкой фазы также вскипает до выпадения на землю, образуя в атмосфере газочапельную взвесь ОХВ. При этом в атмосфере образуется вторичное облако ОХВ, состоящее из газообразного ОХВ, испарившегося с пролива, и (при выбросе перегретой жидкости) из газочапельной взвеси, образующейся при вскипании ОХВ сразу после выброса. Такое вторичное облако будет

формироваться на месте аварии до тех пор, пока будет существовать возможность выброса жидкой фазы, т.е. до момента выброса из оборудования всей жидкой фазы, находившейся выше уровня разгерметизации. Причем если в емкости находилась перегретая жидкость и если давление в емкости могло опуститься ниже давления насыщенного пара ОХВ, соответствующего температуре в емкости, то по мере вытекания ее из емкости возможно и вскипание перегретого ОХВ в самой емкости.

После окончания выброса жидкой фазы из емкости начинается истечение газовой фазы из нее за счет наличия избыточного давления в емкости. При этом на стадии истечения газовой фазы продолжается испарение пролива. В результате в атмосфере образуется вторичное облако ОХВ, состоящее из газообразного ОХВ, испарившегося с пролива, и из газообразного ОХВ, поступающего из разрушенной емкости за счет наличия избыточного давления в емкости. Такое вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока будет существовать возможность выброса газовой фазы из емкости за счет избыточного давления в емкости и испарения из пролива. Причем если в емкости находилась перегретая жидкость, то в формирующееся на месте аварии вторичное облако будет поступать не только газовая фаза, находившаяся в емкости на начало аварии, но и газовая фаза, образующаяся при вскипании в емкости перегретой жидкости.

Если давление в емкости становится равным атмосферному, то газовая фаза из разгерметизированной емкости перестает поступать в окружающую среду за счет избытка давления. Если пролив ОХВ при этом еще не испарился, то в атмосфере образуется вторичное облако ОХВ, состоящее из газообразного ОХВ, испарившегося с пролива. Такое вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока будет существовать испарение ОХВ из пролива. Если после испарения пролива давление в емкости еще не стало равным атмосферному, то газовая фаза из разгерметизированной емкости продолжает поступать в окружающую среду за счет существующего избыточного давления в емкости. Такое вторичное

облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока будет существовать избыточное давление в емкости.

Если пролив ОХВ на месте аварии испарился и давление в емкости стало равным атмосферному, то поступление ОХВ в окружающую среду будет обусловлено лишь испарением ОХВ с поверхности жидкости в емкости. При этом в атмосфере образуется вторичное облако ОХВ, состоящее из газообразного ОХВ, поступающего из разгерметизированной емкости за счет испарения ОХВ из нее. Вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока не испарится все ОХВ из емкости или пока не будет заткнуто отверстие разгерметизации и тем самым ликвидирована авария.

#### **Сценарий 4. Аварии на трубопроводах, на входе которых стоит емкость.**

Разрушение трубопровода, выходящего из емкости выше уровня жидкости, и истечение газа из разрушенного оборудования при отсутствии пролива жидкой фазы (если жидкость находится в перегретом состоянии, то при достаточном падении давления происходит вскипание жидкости, в результате которого в дополнение к газовой фазе, содержащейся в емкости на момент начала аварии, добавится газовая фаза, образовавшаяся при кипении). При этом в атмосфере происходит рассеяние газового облака ОХВ (вторичного) и воздействию его на окружающую среду. При наличии запирающей арматуры возможно отсечение аварийного участка трубопровода и истечение ОХВ только из этого аварийного участка. При этом также образуется облако, которое рассеивается в атмосфере и воздействует на окружающую среду.

При разрушении трубопровода, выходящего из емкости ниже уровня жидкости, стадии аварии будут аналогичны описанным выше с двумя отличиями.

Во-первых, при существовавшем разрушении трубопровода в случае выброса перегретой жидкости вскипание жидкости может происходить не только в воздухе (после выбросе из трубопровода) – случай малого расстояния от места выброса до присоединения емкости с трубопроводом, но и в самом

трубопроводе – случай достаточной удаленности места выброса от места соединения трубопровода с емкостью.

Во-вторых, при наличии на трубопроводе запирающей арматуры и срабатывании ее в ходе аварии, появляется этап – истечение из отсеченного участка трубопровода,- который полностью совпадает по физической картине с описанным выше выбросом из емкости и отличается лишь изменением количественных параметров, при которых происходит выброс.

#### **Сценарий 4. Аварии на трубопроводах, на входе которых стоит насос.**

При разрушении трубопровода происходит истечение жидкой фазы из разрушенного оборудования и образование пролива на месте выброса. Если жидкость в трубопроводе находилась в перегретом состоянии, то происходит вскипание жидкости либо сразу после ее выброса из трубопровода (случай, когда при сильном разрушении трубопровода место выброса находится вблизи насоса, и случаи небольших отверстий разгерметизации), либо внутри трубопровода (случай, когда при сильном разрушении трубопровода место выброса находится вдали от насоса).

При выбросе перегретой жидкости в атмосфере образуется газокапельная взвесь, а затем происходит кипение жидкой фазы (той ее части, которая не участвовала в формировании газокапельной взвеси в атмосфере) при проливе на подстилающую поверхность. При этом из газа, образовавшегося при кипении пролива, а также из газокапельной взвеси выброса, поступившего из трубопровода в атмосферу за время кипения пролива, формируется первичное облако, которое рассеивается в атмосфере и воздействует на окружающую среду.

Продолжающийся выброс жидкой фазы идет в пролив, с которого происходит испарение ОХВ. При выбросе перегретой жидкости часть жидкой фазы вскипает до выпадения на землю, образуя затем в атмосфере газокапельную взвесь ОХВ. При этом в атмосфере образуется вторичное облако ОХВ, состоящее из газообразного ОХВ, испарившегося с пролива, и (при выбросе перегретой жидкости) из газокапельной взвеси, образующейся



при вскипании ОХВ, либо сразу после выброса, либо в трубопроводе. Такое вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока будет существовать возможность выброса жидкой фазы (двухфазной смеси), т.е. до момента отсечения аварийного участка трубопровода и выброса из отсеченного участка трубопровода всей жидкой фазы, находящейся в нем выше уровня отверстия разгерметизации.

После окончания выброса жидкой фазы из отсеченного участка трубопровода начинается истечение газовой фазы за счет наличия избыточного давления в нем, что возможно только в случае, если в трубопроводе находится перегретая жидкость. При этом на стадии истечения газовой фазы продолжается испарение пролива. В результате в атмосфере образуется вторичное облако ОХВ, состоящее из газообразного ОХВ, испарившегося из пролива, и из газообразного ОХВ, поступающего из разрушенного трубопровода за счет наличия избыточного давления в нем. Такое вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока будет существовать возможность выброса газовой фазы из трубопровода за счет избыточного давления в нем и испарения из пролива.

Если давление в отсеченном участке аварийного трубопровода становится равным атмосферному, то газовая фаза из разгерметизированного трубопровода перестает поступать в окружающую среду за счет избытка давления. Если пролив ОХВ при этом еще не испарился, то в атмосфере образуется вторичное облако ОХВ, состоящее из газообразного ОХВ, испарившегося с пролива. Такое вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока будет существовать испарение ОХВ из пролива.

Если испарился пролив, а давление в отсеченном участке аварийного трубопровода осталось выше атмосферного, то газовая фаза из разгерметизированного трубопровода продолжает поступать в окружающую среду за счет сохраняющегося избыточного давления в нем. Такое вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока будет

существовать избыточное давление в отсеченном участке аварийного трубопровода.

Если пролив ОХВ на месте аварии испарился и давление в отсеченном участке аварийного трубопровода стало равным атмосферному, то поступление ОХВ в окружающую среду будет обусловлено лишь испарением ОХВ с поверхности жидкости в трубопроводе. В атмосфере при этом образуется вторичное облако ОХВ, состоящее из газообразного ОХВ, поступающего из разгерметизированного трубопровода за счет испарения ОХВ из него. Такое вторичное облако будет формироваться на месте аварии до тех пор, пока не испарится все ОХВ из трубопровода или пока не будет ликвидировано отверстие разгерметизации, а значит, и вся авария.

В методике приняты следующие допущения:

- для расчета выбросов газообразного ОХВ использованы соотношения для политропного идеального газа;
- в методике принята следующая классификация источников поступления ОХВ в атмосферу: по размеру - точечный ( $L = 0$ ) и протяженный ( $L > 0$ ) и по времени действия – мгновенный и продолжительного времени действия. В зависимости от типа источника используются разные формулы для расчета фактора метеорологического разбавления;
- при расчете рассеяния ОХВ в атмосфере использована рекомендуемая Международной метеорологической организацией Гауссова модель диффузии и ее модификации;
- при неизвестном времени истечения ОХВ из разгерметизированного трубопровода рекомендуется использовать время срабатывания задвижек (отсекания) трубопровода по паспортным данным при автоматической блокировке или равным 300с при ручном отключении системы;

- для случаев отсутствия обваловки и наличия плотной подстилающей поверхности высота слоя разлившегося ОХВ принимается равной 0,05 м;
- предполагается, что скорость и направление движения ветра остаются неизменными в течение времени экспозиции;
- при прогнозировании масштабов зон химического заражения в наиболее консервативных условиях в качестве исходных данных рекомендуется принимать за величину выброса ОХВ ( $Q$ ) – его содержание в максимальной по объему единичной емкости (технологической, складской, транспортной и др.); метеорологические условия: для расчета наихудшего варианта принимается класс стабильности – инверсия, скорость ветра 1 м/с.

Для оценки экологических последствий аварий на опасных промышленных объектах необходимо определить параметры выброса ОХВ:

1. Количество вещества в ОХВ ( $Q_i, \tau$ );
2. Характерный размер источника выброса ( $L, \text{м}$ );
3. Расчетная производительность источника ( $q_i, \tau/\text{с}$ );
4. Время действия источника ОХВ ( $t, \text{с}$ ).

Расчеты ведутся в зависимости от сценария развития аварии ( $i$  – номер сценария развития аварийной ситуации).

Характерный размер источника ( $\text{м}$ ) оценивается как:

$$L = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \cdot V_i \cdot \left(\frac{P_i}{P_a}\right)^{\frac{1}{k}}}, \quad (3.53)$$

где  $k$  – показатель изотропы рассматриваемого газа (безразмерный коэффициент).

Высота источника  $h$  принимается равной высоте, на которой расположена открытая часть емкости, время действия источника  $t$  принимается равным нулю. Источник считается мгновенным и, в зависимости от соотношения

рассчитанной величины  $L$  и характерного размера задачи, может рассматриваться как точечный или протяженный.

В случае частичного разрушения емкости с газообразным компонентом (сценарий 2) принимается, что в результате аварии в емкости появились отверстия общей площадью  $S$ , и вещество истекает через них в атмосферу. Общее количество газа  $Q_2$  в емкости определяется по вышеприведенной формуле.

Средняя производительность источника ОХВ (т/с) рассчитывается по формуле:

$$q_2 = \frac{Q_2}{t_2} \cdot \frac{P_2 - P_a}{P_2}, \quad (3.54)$$

где  $P_2$  – давление насыщенных паров сжиженного ОХВ при температуре испарения (бар).

Среднее время действия источника ОХВ  $t_2$  (с) задается или может быть рассчитано в предположении стационарного изотермического истечения путем численного интегрирования:

$$t_2 = Q_2 \int_{P_a}^{P_2} \frac{dP}{P \cdot q(P)}.$$

Функция  $q(P)$  определяется по соотношению:

$$q(P) = \mu \cdot S \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \rho_r \cdot f(P)},$$

где коэффициент сужения струи  $\mu$  принимается равным 0,8.

Безразмерная функция  $f(P)$  определяется как

$$f(P) = \begin{cases} \left( \frac{P_{кр}}{P} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_{кр}}{P} \right)^{\frac{k+1}{k}}, & P > P_a \\ \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} - \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}, & P \leq P_a. \end{cases}$$

Критическое давление  $P_{кр}$  находится из соотношения:

$$P_{кр} = P_a \cdot \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

### 3.8.2.1. Определение количественных характеристик выброса ОХВ

В зависимости от агрегатного состояния ОХВ в оборудовании и характера разрушения оборудования выбирается один из четырех сценариев. Стадии аварии для различных сценариев перечислены ниже. В общем случае можно выделить восемь возможных стадий развития аварийной ситуации:

1. Разрушение оборудования и образование первичного облака;
2. Истечение жидкой фазы до отсечения аварийного участка;
3. Истечение жидкой фазы из аварийного участка после его отсечения;
4. Истечение газа при наличии пролива жидкой фазы и испарение с пролива;
5. Истечение газа из разрушенного оборудования при отсутствии пролива жидкой фазы;
6. Испарение с пролива при отсутствии истечения жидкости или газа из разрушенного оборудования;
7. Испарение из емкости при отсутствии пролива;
8. Ликвидация аварии (ликвидации отверстия разгерметизации и пролива).

Каждая из вышеперечисленных стадий вносит свой вклад в суммарную массу выброса ОХВ. В зависимости от сценария, конфигурации оборудования, характера разрушения, свойств ОХВ и действий по ликвидации аварии отдельные этапы из приведенных выше могут либо присутствовать, либо отсутствовать в той или иной аварийной ситуации.

#### **Перечень необходимых для проведения расчета данных.**

Для проведения расчетов по любому из четырех сценариев необходимо знать следующие характеристики окружающей среды:

- тип местности, где происходит рассеяние выброса (необходим для определения  $z_0$  - величины шероховатости подстилающей поверхности, значения которых выбираются из таблицы в зависимости от типа местности, где происходит рассеяние);
- скорость ветра на высоте 10м;
- температура воздуха и давление в окружающей среде (при нормальных условиях принимается равным  $10^5$  Па);
- уровень инсоляции и облачности (необходим для определения класса устойчивости атмосферы);
- значения токсодоз и концентраций ОХВ в воздухе, соответствующие тому или иному воздействию ОХВ на человека;
- индивидуальные характеристики ОХВ в газовой и жидкой фазах (молекулярная масса, показатель адиабаты, температура кипения жидкой фазы при давлении окружающей среды, теплота испарения жидкой фазы, теплоемкость жидкой фазы, плотность жидкой фазы);
- при наличии пролива в обваловку – площадь обваловки, ее высота и площадь возможного контакта жидкости с твердой поверхностью;
- при наличии проливов вскипающих жидкостей – характеристики подстилающей поверхности (плотность, теплоемкость, теплопроводность) и температура подстилающей поверхности;
- время экспозиции для человека, попадающего в область поражения;
- определение количества выброшенного ОХВ или производительности источника поступления ОХВ в атмосферу для конкретного сценария аварии и времени действия источника;
- расчет фактора метеорологического разбавления ОХВ в атмосфере для различных типов источников;
- определение пространственно-временного поля концентраций ОХВ;
- оценка поражающего воздействия ОХВ, включая расчет зон химического заражения и вероятного числа пострадавших от воздействия ОХВ.

Кроме того, для каждого типа сценария следует знать дополнительные исходные данные по характеристикам оборудования и сценарию аварии.

- физико-химические и токсикологические характеристики ОХВ;
- количество и технологические параметры ОХВ;
- вероятностный сценарий выброса ОХВ в атмосферу;
- параметры технологического аппарата, на котором произошла авария;
- топографические характеристики территории вблизи аварийного объекта;
- метеоусловия на момент аварии;
- данные о персонале и населении, находящихся вблизи аварийного объекта.

### **Сценарий 1.**

$Q$  - общая масса газообразного ОХВ в оборудовании в кг, либо  $V_1, P_1, T_1$  - объем оборудования (емкости),  $m^3$ ; давление в оборудовании (емкости), Па; температура в оборудовании (емкости),  $^{\circ}C$ , по которым можно определить  $Q$ .

### **Сценарий 2.**

$P_2$  - давление в оборудовании, Па;  $\rho_2$  - плотность ОХВ в оборудовании,  $кг/м^3$ ; либо определяется по давлению  $P_2$  и температуре  $T_2$  в оборудовании; либо определяется по общей массе газообразного ОХВ в оборудовании  $Q$  и объему оборудования  $V_2$ ;  $Q$  - общая масса газообразного ОХВ в оборудовании (без учета массы ОХВ в отсекаемом участке аварийного трубопровода), кг; либо  $V_2, T_2$  - объем оборудования,  $m^3$ , и температура в оборудовании,  $^{\circ}C$ , по которым вместе с давлением в оборудовании  $P_2$ , Па, можно определить  $Q$ ;  $Q_{тр}$  - общая масса ОХВ в отсекаемом аварийном участке трубопровода, кг, необходима для для расчета выбросов из трубопровода;  $S$  - площадь отверстия разгерметизации,  $m^2$ ;  $S_{тр}$  - площадь

поперечного сечения трубопровода,  $\text{м}^2$ ;  $q^{\text{комп}}$  – расход компрессора,  $\text{кг/с}$ , необходим при расчете выброса с трубопровода, на входе которого стоит компрессор, в случае, если площадь отверстия разгерметизации трубопровода превосходит 20% поперечного сечения трубопровода;  $t_{\text{ликвид}}$  – время ликвидации отверстий разгерметизации,  $\text{с}$ ;  $t_{\text{отс}}$  – для выбросов из трубопровода, если количество ОХВ в отсекаемом участке трубопровода составляет более 20% общего количества выброса, принимается равным времени отсечения аварийного участка (времени остановки насоса); для остальных ситуаций принимается равным времени ликвидации отверстий разгерметизации  $t_{\text{ликв}}$ ,  $\text{с}$ .

### **Сценарий 3.**

$P_3$  – давление в оборудовании,  $\text{Па}$ ;  $T_3$  – температура в оборудовании,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $Q^{\text{г}}$  – общая масса газообразного ОХВ в оборудовании,  $\text{кг}$ ; либо  $V_3$  и  $\alpha$  – объем оборудования,  $\text{м}^3$ , и объемная доля оборудования, заполненная газовой фазой, по которым вместе с давлением в оборудовании и температурой в оборудовании можно определить  $Q$ ;  $Q^{\text{ж}}$  – масса жидкого ОХВ в оборудовании,  $\text{кг}$ .

### **Сценарий 4.**

$P_4$  – давление в оборудовании,  $\text{Па}$ ;  $T_4$  – температура в оборудовании,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho_4$  – плотность газовой фазы ОХВ в оборудовании,  $\text{кг/м}^3$ ; либо определяется по давлению  $P_4$  и температуре  $T_4$  в оборудовании;  $H$  – высота,  $\text{м}$ , столба жидкости ОХВ в оборудовании над уровнем отверстия, через которое происходит истечение; при истечении из трубопровода, на входе которого стоит насос, принимается равной 0  $\text{м}$ ;  $L$  – длина участка трубопровода от входа до места разгерметизации,  $\text{м}$ ;  $D_{\text{тр}}$  – диаметр трубопровода,  $\text{м}$ ;  $q^{\text{насос}}$  – расход насоса компрессора,  $\text{кг/с}$ , необходим при расчете выброса с трубопровода, на входе которого стоит насос, в случае, если площадь отверстия разгерметизации трубопровода превосходит 20%



поперечного сечения трубопровода;  $S$  – площадь отверстия разгерметизации,  $m^2$ ;  $t_{отс}$  – время отсечения аварийного участка (время остановки насоса), с;  $S_{обор}$  – максимальная площадь поверхности жидкости в оборудовании,  $m^2$ ;  $Q^*$  – масса, кг, жидкого ОХВ в оборудовании (при истечении из трубопровода с насосом на входе равно  $Q_H^*$ ), не включает в себя массу жидкого ОХВ в аварийном участке отсекаемого трубопровода;  $Q^r$  – масса газообразного ОХВ в оборудовании, кг;  $Q_H^*$  – масса жидкого ОХВ в оборудовании выше уровня отверстия, через которое происходит истечение, кг (при истечении из трубопровода с насосом на входе принимается равной нулю);  $Q_{тр}^*$  – масса жидкого ОХВ, способного поместиться в отсекаемом участке трубопровода, кг, определяется перемножением объема отсекаемого участка трубопровода на плотность жидкого ОХВ;  $H_{тр}^{отс}$  – высота столба жидкого ОХВ в трубопроводе над уровнем отверстия, через которое происходит истечение на момент отсечения аварийного участка трубопровода, м; необходима только при истечении из трубопровода, если количество ОХВ в отсекаемом участке трубопровода составляет более 20% общего количества выброса, в остальных случаях принимается равной нулю; определяется из геометрических характеристик оборудования, общего количества жидкого ОХВ в оборудовании перед аварией и количества ОХВ, вытекшего из оборудования до момента отсечения;  $Q_{H^{тр}}^*$  – масса жидкого ОХВ в аварийном участке трубопровода выше уровня отверстия, через которое происходит истечение, на момент начала аварии, кг; необходима только при истечении из трубопровода, если количество ОХВ в отсекаемом участке трубопровода составляет более 20% общего количества выброса; определяется из геометрических характеристик оборудования и общего количества жидкого ОХВ в оборудовании перед аварией;  $Q_{отс}^r$  – масса газообразного ОХВ в отсекаемом участке трубопровода на момент отсечения, кг; необходима при истечении из трубопровода, если количество

ОХВ в отсекаемом участке трубопровода составляет более 20% общего количества выброса; определяется из геометрических характеристик оборудования, общего количества жидкого ОХВ в оборудовании перед аварией, количества ОХВ, вытекшего из оборудования до момента отсечения, и параметров газовой фазы в оборудовании;  $Q_{\text{тр.отс}}^{\text{ж}}$  – масса жидкого ОХВ в отсекаемом участке трубопровода на момент отсечения, кг; необходима при истечении из трубопровода, если количество ОХВ в отсекаемом участке трубопровода составляет более 20% общего количества выброса; определяется из геометрических характеристик оборудования, общего количества жидкого ОХВ в оборудовании перед аварией, количества ОХВ вытекшего из оборудования до момента отсечения;  $Q_{\text{H.отс.тр}}^{\text{ж}}$  – масса жидкого ОХВ в аварийном участке трубопровода выше уровня отверстия, через которое происходит истечение, на момент отсечения аварийного участка трубопровода, кг; необходима при истечении из трубопровода, если количество ОХВ в отсекаемом участке трубопровода составляет более 20% общего количества выброса; определяется из геометрических характеристик оборудования, общего количества жидкого ОХВ в оборудовании перед аварией, количества ОХВ вытекшего из оборудования до момента отсечения, и расположения отверстия разгерметизации.

В общем случае для выбранного  $i$ -го сценария рассчитываются следующие характеристики выброса:  $Q_i$  – масса ОХВ, образующая первичное облако в  $i$ -ом сценарии, кг;  $q_i^{\text{ж}}, q_i^{\text{г}}, q_i^{\text{тн}}, q_i^{\text{н}}, q_i^{\text{е}}$  – расход ОХВ во вторичном облаке, образующемся при истечении жидкого ОХВ из разрушенного оборудования в  $i$ -ом сценарии, расход при истечении газообразного ОХВ из разрушенного оборудования при наличии пролива в  $i$ -ом сценарии, расход при истечении газообразного ОХВ из разрушенного оборудования в отсутствие пролива в  $i$ -ом сценарии, расход при испарении ОХВ из пролива в  $i$ -ом сценарии, расход при испарении ОХВ из оборудования в  $i$ -ом сценарии, соответственно, кг/с;

$t_i^*, t_i^r, t_i^{rn}, t_i^n, t_i^e$  – длительности истечения жидкого ОХВ из разрушенного оборудования в  $i$ -ом сценарии, истечения газообразного ОХВ из разрушенного оборудования при наличии пролива в  $i$ -ом сценарии, истечения газообразного ОХВ из разрушенного оборудования в отсутствие пролива в  $i$ -ом сценарии, испарения ОХВ из пролива в  $i$ -ом сценарии, испарения ОХВ из оборудования в  $i$ -ом сценарии,  $c$ ;  $\rho_i^{выб}, \rho_i^*, \rho_i^r, \rho_i^{rn}, \rho_i^n, \rho_i^e$  – плотности ОХВ в первичном облаке в начальный момент времени в  $i$ -ом сценарии, в начальный момент времени во вторичном облаке, образующемся при истечении жидкого ОХВ из разрушенного оборудования в  $i$ -ом сценарии, в начальный момент времени во вторичном облаке, образующемся при истечении газообразного ОХВ из разрушенного оборудования при наличии пролива в  $i$ -ом сценарии, в начальный момент времени во вторичном облаке, образующемся при испарении ОХВ из пролива в  $i$ -ом сценарии, в начальный момент времени во вторичном облаке, образующемся при испарении ОХВ из оборудования в  $i$ -ом сценарии,  $\text{кг/м}^3$ ;  $R_i, R_i^*, R_i^r, R_i^{rn}, R_i^n, R_i^e$  – начальные размеры первичного облака ОХВ в начальный момент времени в  $i$ -ом сценарии, вторичного облака ОХВ, образующегося при истечении жидкого ОХВ из разрушенного оборудования в  $i$ -ом сценарии (при отсутствии ЖФ принимается равным 0 м), вторичного облака ОХВ, образующегося при истечении газообразного ОХВ из разрушенного оборудования при наличии пролива в  $i$ -ом сценарии, вторичного облака ОХВ, образующегося при истечении газообразного ОХВ из разрушенного оборудования в отсутствие пролива в  $i$ -ом сценарии, вторичного облака ОХВ, образующегося при испарении ОХВ из пролива в  $i$ -ом сценарии, вторичного облака ОХВ, образующегося при испарении ОХВ из оборудования в  $i$ -ом сценарии, м.

1. В случае выброса газа (**сценарий 1**) количество ОХВ в выбросе  $Q_i$  принимается равным всей массе вещества, содержащегося в полностью разрушенной емкости, и рассчитывается по соотношению:

$$Q_i = Q, \quad (3.55)$$

если известна масса ОХВ в оборудовании  $Q$ , или

$$Q_1 = 0,001 \cdot \frac{\mu}{R} \cdot \frac{V_1 \cdot P_1}{(T_1 + 273,15)}, \quad (3.56)$$

если неизвестна масса  $Q$  ОХВ в оборудовании, но известны объем оборудования  $V_1$ , давление в оборудовании  $P_1$  и температура в оборудовании  $T_1$ .

$$q_1^{\text{ж}} = q_1^{\text{г}} = q_1^{\text{гн}} = q_1^{\text{н}} = q_1^{\text{е}} = q_1^{\text{отс.выб}} = 0,0; t_1^{\text{ж}} = t_1^{\text{г}} = t_1^{\text{гн}} = t_1^{\text{н}} = t_1^{\text{е}} = t_1^{\text{отс.выб}} = 0,0,$$

$q_1^{\text{отс.выб}}$  - расход ОХВ во вторичном облаке, кг/с, образующемся при истечении жидкого ОХВ из разрушенного трубопровода после отсечения аварийного участка в сценарии 4 (принимается равным 0 кг/с, если количество ОХВ в отсекаемом участке аварийного трубопровода составляет менее 20% общего количества выброса);  $t_1^{\text{отс.выб}}$  - длительность истечения жидкого ОХВ из разрушенного трубопровода после отсечения аварийного участка в сценарии 4, с (принимается равным 0 с, если количество ОХВ в отсекаемом участке аварийного трубопровода составляет менее 20% общего количества выброса).

Плотность ОХВ в первичном облаке в начальный момент времени в  $i$ -ом сценарии, кг/м<sup>3</sup>, равна

$$\rho_1^{\text{выб}} = \rho_1 \left( \frac{P_0}{P_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (3.57)$$

где  $\rho_1 = \frac{Q_1}{V_1}$  – плотность газообразного ОХВ в оборудовании,  $P_0$  – давление в окружающей среде, Па (при нормальных условиях принимается равным 10<sup>5</sup> Па),  $\gamma$  – показатель адиабаты газообразного ОХВ.

$$\rho_1^{\text{ж}} = \rho_1^{\text{г}} = \rho_1^{\text{гн}} = \rho_1^{\text{н}} = \rho_1^{\text{е}} = \rho_1^{\text{отс.выб}} = 0,0$$

Размер первичного облака ОХВ в начальный момент времени вычисляется как

$$R_1 = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \cdot \frac{Q_1}{\rho_1^{\text{выб}}}}, \quad (3.58)$$

$$R_1^{\text{ж}} = R_1^{\text{г}} = R_1^{\text{ги}} = R_1^{\text{и}} = R_1^{\text{е}} = R_1^{\text{отс.выб}} = 0,0.$$

2. Для **сценария 2** характеристики выброса рассчитываются по следующим формулам

$$Q_2 = 0,0,$$

$$q_2^{\text{ги}} = 0,8 \cdot S \cdot \min \left\{ \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma-1} P_2 \rho_2 \left[ \left( \frac{P_0}{P_2} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P_0}{P_2} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, \sqrt{P_2 \rho_2 \gamma \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \right\}. \quad (3.59)$$

Если истечение происходит из трубопровода, на входе которого стоит компрессор, и  $S$  превосходит величину  $0,2 \cdot S_{\text{тр}}$ , то  $q_2^{\text{ги}}$  полагается равным расходу компрессора  $q^{\text{комп}}$ .

$$q_2^{\text{ж}} = q_2^{\text{и}} = q_2^{\text{г}} = q_2^{\text{е}} = q_2^{\text{отс.выб}} = 0,0, \\ t_2^{\text{ги}} = \min \left[ \left( \frac{Q + Q_{\text{тр}}}{q_2^{\text{ги}}} \right), t_{\text{отс}} + \frac{Q_{\text{тр}}}{q_2^{\text{ги}}}, t_{\text{ликв}} \right], \quad (3.60)$$

если известна масса ОХВ в оборудовании  $Q$  ( $Q_{\text{тр}}$  - общая масса ОХВ в отсекаемом участке аварийного трубопровода, кг; включает массу жидкости в сценарии 4 или массу жидкости в сценарии 2; при выбросах ОХВ из емкости задается равной нулю), и

$$t_2^{\text{ги}} = \min \left[ 0,001 \cdot \frac{\mu}{R} \cdot \frac{V_2 P_2}{(T_2 + 273,15) q_2^{\text{ги}}} + \frac{Q_{\text{тр}}}{q_2^{\text{ги}}}, t_{\text{отс}} + \frac{Q_{\text{тр}}}{q_2^{\text{ги}}}, t_{\text{ликв}} \right], \quad (3.61)$$

если неизвестна масса ОХВ в оборудовании  $Q$ , но известны объем оборудования  $V_2$ , давление в оборудовании  $P_2$  и температура в оборудовании  $T_2$ .

$$t_2^{\text{ж}} = t_2^{\text{и}} = t_2^{\text{г}} = t_2^{\text{е}} = t_2^{\text{отс.выб}} = 0,0, \\ \rho_2^{\text{ги}} = \rho_2 \left( \frac{P_0}{P_2} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (3.62)$$

где  $\rho_2 = 0,001 \cdot \frac{\mu}{R} \cdot \frac{P_2}{(T_2 + 273,15)}$  – плотность газообразного ОХВ в оборудовании.

$$\rho_2^{\text{ж}} = \rho_2^{\text{выб}} = \rho_2^{\text{и}} = \rho_2^{\text{г}} = \rho_2^{\text{е}} = \rho_2^{\text{отс.выб}} = 0,0$$

Начальный размер вторичного облака ОХВ, образующегося при истечении газообразного ОХВ из разрушенного оборудования в отсутствие пролива в  $i$ -ом сценарии (при отсутствии жидкой фазы принимается равным нулю):

$$R_2^{\text{ги}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \frac{q_2^{\text{ги}}}{\rho_2^{\text{ги}} \cdot U}}, \quad (3.63)$$

где  $U$  – скорость ветра на высоте 10 м,

$$R_2^{\text{ж}} = R_2 = R_2^{\text{и}} = R_2^{\text{г}} = R_2^{\text{е}} = R_2^{\text{отс.выб}} = 0,0.$$

3. Для **сценария 3** характеристики выброса рассчитываются по следующим формулам:

$$Q_3 = Q_3^{\text{г}} + Q_3^{\text{ж}} + Q_3^{\text{и}} + Q^{\text{г}},$$

где  $Q_3^{\text{г}}, Q_3^{\text{ж}}, Q_3^{\text{и}}, Q^{\text{г}}$  – массы ОХВ, переходящие в первичное облако в виде газа при мгновенном вскипании перегретого ОХВ, в виде аэрозоля, в виде газа при кипении пролива, газообразного ОХВ в оборудовании в сценарии 3, кг.

$$Q^{\text{г}} = 0,001 \cdot \alpha \cdot \frac{\mu}{R} \cdot \frac{V_3 P_3}{(T_3 + 273,15)}, \quad (3.64)$$

где  $\alpha$  – объемная доля оборудования, заполненная газовой фазой (формула применяется, если заранее неизвестна величина  $Q^{\text{г}}$ ).

$$Q_3^{\text{г}} = Q^{\text{ж}} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{C_p (T_3 - T_{\text{кип}} + |T_3 - T_{\text{кип}}|)}{2 \Delta H_{\text{кип}}} \right) \right],$$

$$Q_3^{\text{ж}} = \min \{ Q_3^{\text{г}}, Q^{\text{ж}} - Q_3^{\text{г}} \},$$

$$Q_3^{\text{и}} = \min \left\{ \frac{T_{\text{п}} - T_{\text{кип}} + |T_{\text{п}} - T_{\text{кип}}|}{\Delta H_{\text{кип}}} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{\text{п}} c_{\text{п}} \rho_{\text{п}}}{\pi}} \cdot \frac{F_{\text{конт}}^2}{F} \cdot \sqrt{t_{\text{кип}}}, Q^{\text{ж}} - Q_3^{\text{г}} - Q_3^{\text{ж}} \right\},$$

где  $Q^*$  – масса жидкого ОХВ в оборудовании, кг;  $F$  – площадь поверхности пролива, принимается равной площади обваловки, а при отсутствии обваловки или незначительной массе выброса определяется по формуле

$$F = \frac{Q^* - Q_3^* - Q_3^*}{0,05\rho_{ж}}; \quad (3.65)$$

$F_{\text{конт}}$  – площадь контакта с твердой поверхностью, эта площадь включает как боковую поверхность обваловки, так и подстилающую поверхность; при проливе на неограниченную поверхность  $F_{\text{конт}} = F$ ;  $T_{\text{п}}, \lambda_{\text{п}}, c_{\text{п}}, \rho_{\text{п}}$  – соответственно температура, теплопроводность, теплоемкость и плотность подстилающей поверхности;  $t_{\text{кип}}$  – время, в течение которого ОХВ поступает в первичное облако из-за интенсивного кипения жидкого ОХВ за счет подвода тепла от подстилающей поверхности;  $\Delta H_{\text{кип}}$  – теплота испарения жидкого ОХВ, Дж/кг;  $T_{\text{кип}}$  – температура кипения жидкого ОХВ при давлении  $P_0$ , °С;

$$\sqrt{t_{\text{кип}}} = \min \left\{ \frac{T_{\text{п}} - T_{\text{кип}} + |T_{\text{п}} - T_{\text{кип}}|}{2\Delta H_{\text{кип}}} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{\text{п}} c_{\text{п}} \rho_{\text{п}}}{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U) p_{\text{н}}} \cdot \frac{F_{\text{конт}}}{F}, \sqrt{\frac{2\sqrt{F}}{U}} \right\},$$

$p_{\text{н}}$  – давление насыщенного пара ОХВ при температуре воздуха, мм.рт.ст;

$$p_{\text{н}} = 760 \exp \left[ \Delta H_{\text{кип}} \mu \frac{\left( \frac{1}{T_{\text{кип}} + 273,15} - \frac{1}{T_{\text{п}} + 273,15} \right)}{R} \right], q_3^{\text{н}} = F \sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U) p_{\text{н}},$$

$$q_3^{\text{ж}} = q_3^{\text{г}} = q_3^{\text{ги}} = q_3^{\text{е}} = q_3^{\text{отс.выб}} = 0,0, \quad t_3^{\text{н}} = \frac{(Q - Q_3)}{q_3^{\text{н}}}, \quad t_3^{\text{ж}} = t_3^{\text{г}} = t_3^{\text{ги}} = t_3^{\text{е}} = t_3^{\text{отс.выб}} = 0,0,$$

$$\rho_3^{\text{выб}} = \begin{cases} \rho_{\text{кип}} \cdot \frac{Q_3}{Q_3^{\text{г}} + Q_3^{\text{н}} + Q_3^{\text{г}}}, \text{ если } T_3 > T_{\text{кип}} \text{ или } T_{\text{п}} > T_{\text{кип}} \\ 0,001 \cdot \frac{\mu}{R} \cdot \frac{P_3}{(T_3 + 273,15)} \cdot \left( \frac{P_0}{P_3} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \text{ в остальных случаях,} \end{cases} \quad (3.66)$$

$$\rho_3^{\text{и}} = \rho_{\text{кип}} = \rho(T_{\text{кип}}, P_0) = 0,001 \cdot \frac{\mu}{R} \cdot \frac{P_0}{(T_{\text{кип}} + 273,15)}, \quad (3.67)$$

$$\rho_3^{\text{ж}} = \rho_3^{\text{г}} = \rho_3^{\text{е}} = \rho_3^{\text{ги}} = \rho_3^{\text{отс.выб}} = 0,0,$$

$$R_3 = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \cdot \frac{Q_3}{\rho_3^{\text{выб}}}}, \quad (3.68)$$

$$R_3^{\text{и}} = 0,5\sqrt{F}, \quad (3.69)$$

$$R_3^{\text{ж}} = R_3^{\text{г}} = R_3^{\text{е}} = R_3^{\text{ги}} = R_3^{\text{отс.выб}} = 0,0$$

4. Для **сценария 4** характеристики выброса рассчитываются по следующим формулам.

Если истечение происходит из трубопровода, на входе которого стоит емкость и величина  $S$  превосходит  $0,2S_{\text{тр}}$ , либо истечение происходит непосредственно из емкости, то расход определяется по формуле

$$q_{\text{выб}} = 0,6 \cdot S \cdot \text{sign}(Q_{\text{н}}^{\text{ж}}) \cdot \sqrt{2\text{Hgr}_{\text{ж}}^2 + 2 \cdot \rho_{\text{ж}} [P_4 - p_{\text{н}}(T_4)] + \frac{1}{K} \frac{\Delta H_{\text{кип}}^2 \rho^2(T_4, p_{\text{н}}(T_4))}{c_p (T_{\text{кип}} + 273,15)}},$$

где

$$p_{\text{н}}(T_4) = P_0 \exp \left[ \Delta H_{\text{кип}} \mu \frac{\left( \frac{1}{T_{\text{кип}} + 273,15} - \frac{1}{T_4 + 273,15} \right)}{R} \right] \text{ — давление}$$

насыщенных паров ОХВ при температуре  $T_4$ ;  $\text{sign}$  – знак величины. Он равен 1, если величина больше 0, -1, если величина меньше нуля, и 0, если

величина равна 0;  $\rho(T_4, p_{\text{н}}(T_4)) = \frac{\mu}{R} \frac{p_{\text{н}}(T_4)}{(T_4 + 273,15)}$  – плотность газообразного

ОХВ при температуре  $T_4$  и давлении  $p_{\text{н}}(T_4)$ ;  $K$  – функция, зависящая от  $L$  – длины участка трубопровода от входа до места разгерметизации (в случае истечения непосредственно из емкости  $L = 0$ );



$$K = \begin{cases} \frac{\Delta H_{\text{кип}}^2 \rho^2 (T_4, p_H(T_4))}{2\rho_{\text{ж}} (p_H(T_4) - P_0) c_p (T_{\text{кип}} + 273,15)} + \frac{L}{30D_{\text{тр}}}, & 0 \leq L \leq 30D_{\text{тр}} \\ 1,18, & 30D_{\text{тр}} < L \leq 50D_{\text{тр}} \\ 1,33, & 50D_{\text{тр}} < L \leq 100D_{\text{тр}} \\ 1,54, & 100D_{\text{тр}} < L \leq 200D_{\text{тр}} \\ 1,82, & 200D_{\text{тр}} < L \leq 400D_{\text{тр}} \\ 2,1, & 400D_{\text{тр}} < L. \end{cases} \quad (3.70)$$

Если истечение происходит из трубопровода, на входе которого стоит насос, а величина  $S$  превосходит  $0,2S_{\text{тр}}$ , то  $q_{\text{выб}}$  полагается равным расходу насоса  $q_{\text{насос}}$ .

В остальных случаях расход определяется по формуле

$$q_{\text{выб}} = \text{sign}(Q_{\text{H}}^{\text{ж}}) \cdot 0,6 \cdot S \cdot \rho_{\text{ж}} \sqrt{2Hg + \frac{P_4 - P_0}{\rho_{\text{ж}}}}, \quad (3.71)$$

$\text{sign}$  – знак величины, равен 1, если величина больше нуля, -1, если величина меньше нуля, и 0, если величина 0.

В случае, если истечение происходит через трубопровод и количество ОХВ в отсекаемом участке аварийного трубопровода составляет более 20% общего количества выброса, то необходимо рассмотреть стадию истечения из аварийного участка трубопровода после отсечения аварийного участка. Скорость выброса на этой стадии будет составлять

$$q_{\text{выб}}^{\text{отс}} = \begin{cases} 0,6 \cdot S \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \text{sign}(Q_{\text{H}^{\text{отс.тр}}}^{\text{ж}}) \cdot \sqrt{2H_{\text{тр}}^{\text{отс}} g}, & T_4 < T_{\text{кип}}, \\ 0,6 \cdot S \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \text{sign}(Q_{\text{H}^{\text{отс.тр}}}^{\text{ж}}) \cdot \sqrt{2H_{\text{тр}}^{\text{отс}} g + 2 \frac{p_H(T_4) - P_0}{\rho_{\text{ж}}}}, & T_4 \geq T_{\text{кип}} \end{cases}. \quad (3.72)$$

Если истечение из трубопровода после отсечения аварийного участка не рассматривается, то  $q_{\text{выб}}^{\text{отс}} = 0$ .

$$Q_4 = \min \left\{ Q_{\text{H}}^{\text{ж}} + Q_{\text{H}^{\text{тр}}}^{\text{ж}}, (q_4' + q_4'') \cdot t' + (q_{4_{\text{отс}}}^{\text{ж}} + q_{4_{\text{отс}}}'' ) \cdot t'_{\text{отс}} + \frac{T_{\text{п}} - T_{\text{кип}} + |T_{\text{п}} - T_{\text{кип}}|}{\Delta H_{\text{кип}}} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{п}} c_{\text{п}} \rho_{\text{п}}}{\pi}} \frac{F^2}{F'} \sqrt{t_{\text{кип}}} \right\},$$

$$\sqrt{t_{\text{кип}}} = \min \left\{ \frac{T_{\text{п}} - T_{\text{кип}} + |T_{\text{п}} - T_{\text{кип}}|}{2\Delta H_{\text{кип}}} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{п}} c_{\text{п}} \rho_{\text{п}}}{\pi}} \frac{1}{\sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U) p_{\text{H}}}}, \sqrt{\frac{2\sqrt{F'}}{U}} \right\},$$

где  $q_4', q_4''$  – скорости поступления в атмосферу газообразного ОХВ и в виде аэрозольных включений, образующихся при мгновенном вскипании жидкой фазы в случае истечения жидкого ОХВ из разрушенного оборудования в сценарии 4, кг/с;  $q_{4отс}', q_{4отс}''$  – скорости поступления в атмосферу газообразного ОХВ и в виде аэрозольных включений, образующихся при мгновенном вскипании жидкой фазы в случае истечения жидкого ОХВ из разрушенного трубопровода после отсечения аварийного участка в сценарии 4, кг/с (принимается равной 0, если количество ОХВ в отсекаемом участке аварийного трубопровода составляет менее 20% общей массы выброса;  $t'_{отс}$  – составляющая времени формирования первичного облака от начала выброса до окончания формирования первичного облака в сценарии 4;  $t'$  – составляющая времени формирования первичного облака от начала выброса до времени отсечения аварийного участка трубопровода в сценарии 4;  $F'$  – площадь поверхности пролива, принимается равной площади обваловки, а при отсутствии обваловки или незначительной массе выброса определяется по формуле

$$F' = \frac{(q_{выб} - q_4' - q_4'') \min \left\{ t', \frac{Q_H^ж + Q_{НТР}^ж}{q_{выб}} \right\} + (q_{выб}^{отс} - q_{4отс}' - q_{4отс}'') \min \left\{ t'_{отс}, \frac{Q_{НТР}^ж}{q_{выб}^{отс}} \right\}}{0,05\rho_ж}, \quad (3.73)$$

$$t' = \min \{ t_{кип}, t_{отс}, t_{ликв}, t'_{исп} \},$$

$$t'_{отс} = \min \{ t_{кип} - t', t_{ликвид} - t', t'_{исп} - t', t''_{исп} - t' \},$$

$F_{конт}$  – площадь контакта с твердой поверхностью, эта площадь включает как боковую поверхность обваловки, так и подстилающую поверхность; при проливе на неограниченную поверхность  $F_{конт} = F'$ ;

$$t'_{исп} = \frac{(q_{выб} - q_4' - q_4'') \frac{Q_H^ж + Q_{НТР}^ж}{q_{выб}}}{F\sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U)\rho_H} \quad \text{при проливе в обваловку и}$$

$$t'_{исп} = \frac{0,05\rho_ж}{\sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U)\rho_H} \quad \text{при проливе на неограниченную поверхность;}$$

$$t_{\text{исп}}'' = \frac{(q_{\text{выб}} - q_4' - q_4'')t_{\text{отс}} + (q_{\text{выб}}^{\text{отс}} - q_{4\text{отс}}' - q_{4\text{отс}}'') \frac{Q_{\text{Н}^{\text{отс.гр}}}^{\text{ж}}}{q_{\text{выб}}^{\text{отс}}}}{F\sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U)p_{\text{н}}} \text{ при проливе в обваловку и}$$

$$t_{\text{исп}}'' = \frac{0,05\rho_{\text{ж}}}{\sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U)p_{\text{н}}} \text{ при проливе на неограниченную поверхность;}$$

Расход ОХВ во вторичном облаке, образующемся при истечении жидкого ОХВ из разрушенного оборудования, равен:

$$q_4^{\text{ж}} = \min\{q_{\text{выб}}, q_4' + q_4'' + F\sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U) \cdot p_{\text{н}}\}, \quad (3.74)$$

$$q_4' = q_{\text{выб}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{c_p (T_4 - T_{\text{кип}} + |T_4 - T_{\text{кип}}|)}{2\Delta H_{\text{кип}}}\right) \right],$$

$$q_4'' = \min\{q_4', q_{\text{выб}} - q_4'\}.$$

Расход ОХВ во вторичном облаке, образующемся при истечении жидкого ОХВ из разрушенного трубопровода после отсечения аварийного участка:

$$q_4^{\text{отс.выб}} = \min\{q_{\text{выб}}^{\text{отс}}, q_{4\text{отс}}' + q_{4\text{отс}}'' + F\sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U)p_{\text{н}}\}, \quad (3.75)$$

$$q_{4\text{отс}}' = q_{\text{выб}}^{\text{отс}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{c_p (T_4 - T + |T_4 - T_{\text{кип}}|)}{2\Delta H_{\text{кип}}}\right) \right],$$

$$q_{4\text{отс}}'' = \min\{q_{4\text{отс}}', q_{\text{выб}}^{\text{отс}} - q_{4\text{отс}}'\}.$$

Расход ОХВ во вторичном облаке, образующемся при истечении газообразного ОХВ из разрушенного оборудования при наличии пролива в 4-м сценарии, кг/с:

$$\left. \begin{aligned}
& F\sqrt{\mu}10^6(5,83+4,1U) \cdot p_H + 0,8 \cdot S \cdot \min \left\{ \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma-1} P_4 \rho_4 \left[ \left( \frac{P_0}{P_4} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P_0}{P_4} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, \sqrt{P_4 \rho_4 \gamma \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \right\} \\
& \text{или } (t' + t'_{отс} + t_4^{\text{ж}} + t_4^{\text{отсвыб}}) < t_{отс}, \text{ или } (t' + t'_{отс} + t_4^{\text{ж}} + t_4^{\text{отсвыб}}) > t_{отс} \text{ и } Q_{\text{Нрп}}^{\text{ж}} > Q_{\text{Нотс-тр}}^{\text{ж}} \\
& q_4^r = \left\{ F\sqrt{\mu}10^6(5,83+4,1U)p_H + 0,8S \min \left\{ \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma-1} p_H(T_4) \rho_H(p_H(T_4), T_{\text{кип}}) \left[ \left( \frac{P_0}{p_H(T_4)} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P_0}{p_H(T_4)} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, \sqrt{p_H(T_4) \rho_H(p_H(T_4), T_{\text{кип}}) \gamma \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \right\}, \right. \\
& (t' + t'_{отс} + t_4^{\text{ж}} + t_4^{\text{отсвыб}}) > t_{отс}, Q_{\text{Нрп}}^{\text{ж}} = Q_{\text{Нотс-тр}}^{\text{ж}}, T_4 > T_{\text{кип}} \\
& 0, (t' + t'_{отс} + t_4^{\text{ж}} + t_4^{\text{отсвыб}}) > t_{отс}, Q_{\text{Нрп}}^{\text{ж}} = Q_{\text{Нотс-тр}}^{\text{ж}}, T_4 \leq T_{\text{кип}},
\end{aligned} \right\}$$

(3.76)

Расход ОХВ во вторичном облаке, образующемся при истечении газообразного ОХВ из разрушенного оборудования в отсутствие пролива в 4-м сценарии, кг/с:

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
& S_{\max} \sqrt{\mu} 10^{-6} 5,83 p_H + 0,8 \cdot S \cdot \min \left\{ \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma-1} P_4 \rho_4 \left[ \left( \frac{P_0}{P_4} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P_0}{P_4} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, \sqrt{P_4 \rho_4 \gamma \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \right\} \\
& \text{или } (t' + t'_{\text{отс}} + t_4^{\text{ж}} + t_4^{\text{отсвыб}}) < t_{\text{отс}}, \text{ или } (t' + t'_{\text{отс}} + t_4^{\text{ж}} + t_4^{\text{отсвыб}}) > t_{\text{отс}} \text{ и } Q_{\text{НТР}}^{\text{ж}} > Q_{\text{Нотс.тр}}^{\text{ж}} \\
& q_4^{\text{ги}} = \left\{ S_{\max} \sqrt{\mu} 10^{-6} 5,83 p_H + 0,8 S \min \left\{ \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma-1} p_H(T_4) \rho_H(p_H(T_4), T_{\text{кип}})} \left[ \left( \frac{P_0}{p_H(T_4)} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left( \frac{P_0}{p_H(T_4)} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, \right. \\
& \left. \sqrt{p_H(T_4) \rho_H(p_H(T_4), T_{\text{кип}})} \gamma \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right\}, \\
& (t' + t'_{\text{отс}} + t_4^{\text{ж}} + t_4^{\text{отсвыб}}) > t_{\text{отс}}, Q_{\text{НТР}}^{\text{ж}} = Q_{\text{Нотс.тр}}^{\text{ж}}, \text{ и } T_4 \geq T_{\text{кип}} \\
& 0, (t' + t'_{\text{отс}} + t_4^{\text{ж}} + t_4^{\text{отсвыб}}) > t_{\text{отс}}, Q_{\text{НТР}}^{\text{ж}} = Q_{\text{Нотс.тр}}^{\text{ж}}, \text{ и } T_4 = T_{\text{кип}}
\end{aligned} \right\}
\end{aligned}
\tag{3.77}$$

$$q_4'' = F \sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U) \cdot p_H + 5,83 S_{\max} \sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} p_H,$$

Расход ОХВ во вторичном облаке, образующемся при испарении ОХВ из оборудования в 4-м сценарии, кг/с:

$$q_4^e = 5,83 \cdot S_{\max} \sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} \cdot p_H, \tag{3.78}$$

где  $S_{\max}$  – эффективная площадь эмиссии из разгерметизированного оборудования. Определяется с учетом максимальной площади свободной поверхности в оборудовании  $S_{\text{обор}}$  :

$$S_{\max} = \min \left\{ S_{\text{обор}}, \rho_4^e \cdot U \cdot S / (\sqrt{\mu} \cdot 5,83 \cdot 10^{-6} p_H) \right\},$$

$$t_4^{\text{ж}} = \min \left\{ \frac{Q_H^{\text{ж}} + Q_{\text{НТР}}^{\text{ж}}}{q_{\text{выб}}} - t', t_{\text{отс}} - t' \right\},$$

$$t_4^{\text{отс.выб}} = \min \left\{ t_{\text{ликвид}} - t'_{\text{отс}} - t_4^{\text{ж}} - t', \frac{Q_{\text{Нотс.тр}}^{\text{ж}}}{q_{\text{выб}}} - t'_{\text{отс}} \right\},$$

$$t_{\text{исп}} = \frac{q_{\text{выб}} \left( t_4^{\text{ж}} + \min \left\{ t', \frac{Q_{\text{H}}^{\text{ж}} + Q_{\text{H}^{\text{TP}}}^{\text{ж}}}{q_{\text{выб}}} \right\} \right) + q_{\text{выб}}^{\text{отс}} \left( t_4^{\text{отс.выб}} + \min \left\{ t'_{\text{отс}}, \frac{Q_{\text{H}^{\text{отс.тр}}}^{\text{ж}}}{q_{\text{выб}}^{\text{отс}}} \right\} \right) - Q_4 + q_4^{\text{ж}} t_4^{\text{ж}} + q_4^{\text{отс.выб}} t_4^{\text{отс.выб}}}{F \sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U) p_{\text{H}}},$$

где  $t_{\text{исп}}$  – длительность испарения пролива после окончания истечения жидкого ОХВ.

Если пролив происходит в обваловку, то площадь пролива  $F$  совпадает с площадью обваловки, в противном случае площадь пролива определяется как

$$F = \frac{q_{\text{выб}} \left( t_4^{\text{ж}} + \min \left\{ t', \frac{Q_{\text{H}}^{\text{ж}} + Q_{\text{H}^{\text{TP}}}^{\text{ж}}}{q_{\text{выб}}} \right\} \right) + q_{\text{выб}}^{\text{отс}} \left( t_4^{\text{отс.выб}} + \min \left\{ t'_{\text{отс}}, \frac{Q_{\text{H}^{\text{отс.тр}}}^{\text{ж}}}{q_{\text{выб}}^{\text{отс}}} \right\} \right) - Q_4 + q_4^{\text{ж}} t_4^{\text{ж}} + q_4^{\text{отс.выб}} t_4^{\text{отс.выб}}}{0,05 p_{\text{ж}}}$$

$$t_4^{\text{Г}} = \min \left\{ \begin{array}{l} \left[ \begin{array}{l} t_{\text{max}}^{\text{Г}} \text{ при } t_{\text{отс}} - t_4^{\text{ж}} - t_4^{\text{отс.выб}} - t'_{\text{отс}} - t' > t_{\text{max}}^{\text{Г}} \\ \left[ Q_{\text{отс}}^{\text{Г}} + \min \left\{ Q_{\text{тр}}^{\text{ж}}, (Q_{\text{тр}}^{\text{ж}} - Q_{\text{H}^{\text{TP}}}^{\text{ж}}) \right\} \left( 1 - \exp \left( - \frac{c_p (T_4 - T_{\text{кип}} + |T_4 - T_{\text{кип}}|) \right)}{2 \Delta H_{\text{кип}}} \right) \right] \right] + \\ \frac{q_4^{\text{Г}} - F \sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U) p_{\text{H}}}{+ t_{\text{отс}} - t_4^{\text{ж}} - t_4^{\text{отс.выб}} - t'_{\text{отс}} - t', \text{ при } t_{\text{отс}} - t_4^{\text{ж}} - t_4^{\text{отс.выб}} - t'_{\text{отс}} - t' \leq t_{\text{max}}^{\text{Г}} \end{array} \right. \\ \\ \frac{t_{\text{отс}} > t_4^{\text{ж}} + t_4^{\text{отс.выб}} + t'_{\text{отс}} + t'}{\left( Q_{\text{отс}}^{\text{Г}} + (Q_{\text{тр}}^{\text{ж}} - Q_{\text{H}^{\text{TP}}}^{\text{ж}}) \left( 1 - \exp \left( - \frac{c_p (T_4 - T_{\text{кип}} + |T_4 - T_{\text{кип}}|) \right)}{2 \Delta H_{\text{кип}}} \right) \right)} \\ \frac{q_4^{\text{Г}} - F \sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U) p_{\text{H}}}{,} \\ \left. \begin{array}{l} t_{\text{отс}} \leq t_4^{\text{ж}} + t_4^{\text{отс.выб}} + t'_{\text{отс}} + t' \\ \min \text{sum} (t_{\text{ликвид}}, t', t'_{\text{отс}}, t_4^{\text{отс.выб}}, t_4^{\text{ж}}), t_{\text{исп}} \end{array} \right\}$$

$$t_{\text{max}}^{\text{Г}} = \frac{\left( Q_{\text{отс}}^{\text{Г}} + (Q_{\text{тр}}^{\text{ж}} + Q_{\text{H}}^{\text{ж}} - Q_{\text{H}}^{\text{ж}} - Q_{\text{H}^{\text{TP}}}^{\text{ж}}) \left( 1 - \exp \left( - \frac{c_p (T_4 - T_{\text{кип}} + |T_4 - T_{\text{кип}}|) \right)}{2 \Delta H_{\text{кип}}} \right) \right)}{q_4^{\text{Г}} - F \sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U) p_{\text{H}}}$$

$$t_4^{\text{ги}} = \min \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} t_{\text{max}}^{\text{ги}} \text{ при } t_{\text{отс}} - t_4^{\text{ж}} - t_4^{\text{отс.выб}} - t'_{\text{отс}} - t' > t_{\text{max}}^{\text{ги}} \\ \left( Q_{\text{отс}}^{\text{г}} + \min \left\{ Q_{\text{тр}}^{\text{ж}}, (Q_{\text{тр}}^{\text{ж}} - Q_{\text{нтр}}^{\text{ж}}) \right\} \left( 1 - \exp \left( - \frac{c_p (T_4 - T_{\text{кип}} + |T_4 - T_{\text{кип}}|) \right)}{2\Delta H_{\text{кип}}} \right) \right) \right\} \\ \frac{q_4^{\text{г}} - F\sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U)p_{\text{н}}}{q_4^{\text{г}} - F\sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U)p_{\text{н}}} + \\ + t_4^{\text{ж}} - t_4^{\text{отс.выб}} - t'_{\text{отс}} - t' - t_4^{\text{г}}, \text{ при } t_{\text{отс}} - t_4^{\text{ж}} - t_4^{\text{отс.выб}} - t'_{\text{отс}} - t' - t_4^{\text{г}} \leq t_{\text{max}}^{\text{ги}} \\ t_{\text{отс}} > t_4^{\text{ж}} + t_4^{\text{отс.выб}} + t'_{\text{отс}} + t' + t_4^{\text{г}} \\ \left( Q_{\text{отс}}^{\text{г}} + (Q_{\text{тр}}^{\text{ж}} - Q_{\text{нтр}}^{\text{ж}}) \left( 1 - \exp \left( - \frac{c_p (T_4 - T_{\text{кип}} + |T_4 - T_{\text{кип}}|) \right)}{2\Delta H_{\text{кип}}} \right) \right) \\ \frac{q_4^{\text{г}} - F\sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U)p_{\text{н}}}{q_4^{\text{г}} - F\sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U)p_{\text{н}}} - t_4^{\text{г}}, \\ t_{\text{отс}} \leq t_4^{\text{ж}} + t_4^{\text{отс.выб}} + t'_{\text{отс}} + t' + t_4^{\text{г}} \\ \min \text{sum}(t_{\text{ликвид}}, t', t'_{\text{отс}}, t_4^{\text{отс.выб}}, t_4^{\text{ж}}, t_4^{\text{г}}) \end{array} \right.$$

$$t_{\text{max}}^{\text{ги}} = t_{\text{max}}^{\text{г}} - t_4^{\text{г}},$$

$$t_4^{\text{и}} = \frac{t_{\text{исп}} - t_4^{\text{г}} + |t_{\text{исп}} - t_4^{\text{г}}|}{2},$$

$$t_4^{\text{е}} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{Q_{\text{тр}}^{\text{ж}} - Q_{\text{нтр}}^{\text{ж}} + Q_{\text{ж}} - Q_{\text{н}}}{q_4^{\text{е}}} \left( 1 - \exp \left( - \frac{c_p (T_4 - T_{\text{кип}} + |T_4 - T_{\text{кип}}|) \right)}{2\Delta H_{\text{кип}}} \right) - t_4^{\text{г}} - t_4^{\text{ги}} - t_4^{\text{и}}, \\ \min \text{sum}(t_{\text{ликвид}}, t', t'_{\text{отс}}, t_4^{\text{отс.выб}}, t_4^{\text{ж}}, t_4^{\text{г}}, t_4^{\text{ги}}, t_4^{\text{и}}) \end{array} \right.$$

где  $\min \text{sum}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n)$  – разность величины  $\alpha_1$  и суммы  $\alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ , если эта разность величина положительная, и 0 в противном случае.

$$\rho_4^{\text{выб}} = \begin{cases} \rho_{\text{кип}} \frac{Q_4}{Q_4 - q_4 t'}, & \text{если } T_4 > T_{\text{кип}} \text{ или } T_{\text{п}} > T_{\text{кип}} \\ 0,0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases}$$

$$\rho_4^{\text{ж}} = \rho_{\text{кип}} \cdot \frac{q_4^{\text{ж}}}{q_4^{\text{г}} - F\sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U)p_{\text{н}}},$$

$$\rho_4^{\text{отс.выб}} = \rho_{\text{кип}} \cdot \frac{q_4^{\text{отс.выб}}}{q_{4\text{отс}} - F\sqrt{\mu} \cdot 10^{-6} (5,83 + 4,1U)p_{\text{н}}},$$

$$\rho_4^{\text{г}} = \rho_4^{\text{ги}} = \rho_4 \left( \frac{P_0}{P_4} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad \rho_4 = 0,001 \cdot \frac{\mu}{R} \cdot \frac{P_4}{T_4 + 273,15}.$$

$$\rho_4^{\text{и}} = \rho_4^{\text{е}} = \rho_{\text{кип}}, \quad R_4 = \sqrt[3]{\frac{3 Q_4}{4\pi \rho_4^{\text{выб}}}}, \quad R_4^{\text{ж}} = \sqrt{\frac{1 q_4^{\text{ж}}}{\pi \rho_4^{\text{ж}} U}}, \quad R_4^{\text{отс.выб}} = \sqrt{\frac{1 q_4^{\text{отс.выб}}}{\pi \rho_4^{\text{отс.выб}} U}},$$

$$R_4^{\text{ж}} = \sqrt{\frac{1 q_4^{\text{ж}}}{\pi \rho_4^{\text{г}} U}}, \quad R_4^{\text{гн}} = \sqrt{\frac{1 q_4^{\text{гн}}}{\pi \rho_4^{\text{гн}} U}}, \quad R_4^{\text{и}} = 0,5\sqrt{F}, \quad R_4^{\text{е}} = 0,5\sqrt{S}.$$

Определяется высота источника выброса  $h$  (м). Высота выброса задается равной 0, а при наличии обваловки – высоте обваловки над уровнем земли.

### 3.8.2.2. Определение полей концентраций и токсодозы

3.8.2.2.1. Для условий, в которых происходит выброс, определяются шероховатость поверхности  $z_0$ , класс стабильности и величины дисперсии в зависимости от расстояния  $x$ .

Шероховатость поверхности  $z_0$  определяется по таблице 3.18 в зависимости от типа местности, где происходит рассеяние выброса.

Класс стабильности атмосферы определяется по таблице 3.19 в зависимости от скорости ветра и интенсивности теплового потока у поверхности (инсоляция и облачность).

Таблица 3.18.

Шероховатость поверхности  $z_0$  в зависимости от типа местности, где происходит рассеяние

Тип местности	$z_0$ , см
Ровная местность, покрытая снегом	0,1
Ровная местность с высотой травы до 1 см	0,1
Ровная местность с высотой травы до 15 см	1
Ровная местность с высотой травы до 60 см	5
Местность, покрытая кустарником	12
Лес высотой до 10 м	40
Городская застройка	100



Для расчета наихудшего варианта принимается класс стабильности инверсия и скорость ветра 1 м/с.

Таблица 3.19.

Класс стабильности атмосферы

Скорость ветра на высоте 10 м м/с	День			Ночь	
	Инсоляция			Тонкая сплошная обл. или >5/8 обл. покровы	Безоблачно или <3/8 обл. покровы
	интенсивная	умеренная	слабая		
$U \leq 2$	Конвекция	Конвекция	Конвекция	Инверсия	Инверсия
$2 < U \leq 3$	Конвекция	Конвекция	Конвекция	Инверсия	Инверсия
$3 < U \leq 5$	Конвекция	Конвекция	Конвекция	Изотермия	Инверсия
$5 < U \leq 6$	Конвекция	Изотермия	Изотермия	Изотермия	Изотермия
$U > 6$	Изотермия	Изотермия	Изотермия	Изотермия	Изотермия

3.8.2.2.2. Величины дисперсии в зависимости от расстояния  $x$  определяются по следующим формулам:

$$\sigma_x = \frac{C_3 x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}, \quad (3.79)$$

$$\sigma_y = \begin{cases} \sigma_x \cdot \frac{220,2 \cdot 60 + x/U}{220,2 \cdot 60 + 600}, & x/U \geq 600 \\ \sigma_x, & x/U < 600, \end{cases} \quad (3.80)$$

$$\sigma_z = f(z_0, x) \cdot g(x), \quad (3.81)$$

где

$$f(z_0, x) = \begin{cases} \ln[C_1 x^{D_1} (1 + C_2 x^{D_2})], & z_0 < 0,1\text{м}, \\ \ln[C_1 x^{D_1} / (1 + C_2 x^{D_2})], & z_0 \geq 0,1\text{м} \end{cases}, \quad g(x) = \frac{A_1 x^{B_1}}{1 + A_2 x^{B_2}},$$

Коэффициенты  $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, C_3, D_1, D_2$  определяются по таблицам 3.20 и 3.21.

Величина  $\sigma_z$ , рассчитанная по формуле (3.81), не должна превышать величины  $\sigma_z$ , указанной в таблице 3.22. Если это имеет место, то вместо

величины, рассчитанной по формуле (3.81), следует использовать соответствующее данному классу стабильности значение из табл.3.22.

**Таблица 3.20. Величины коэффициентов  $A_1, A_2, B_1, B_2, C_3$  в зависимости от класса стабильности атмосферы**

Класс стабильности	$A_1$	$A_2$	$B_1$	$B_2$	$C_3$
Конвекция	0,112	0,000920	0,920	0,718	0,11
Изотермия	0,098	0,00135	0,889	0,688	0,08
Инверсия	0,0609	0,00196	0,895	0,684	0,06

**Таблица 3.21. Величины коэффициентов  $C_1, C_2, D_1, D_2$  в зависимости от размера шероховатости**

$Z_0$ , см	$C_1$	$C_2$	$D_1$	$D_2$
1	1,56	0,000625	0,048	0,45
4	2,02	0,000776	0,027	0,37
10	2,73	0	0	0
40	5,16	0,0538	-0,098	0,225
100	7,37	0,000233	-0,0096	0,6

Таблица 3.22

Максимальное значение  $\sigma_z$

Класс стабильности атмосферы	$\sigma_z$ , м
Конвекция	640
Изотермия	400
Инверсия	220

Для каждого из этапов выброса по сценарию  $i$  определяются поля концентрации и максимальная концентрация на оси  $x$ .

3.8.2.2.3. Концентрация при прохождении первичного облака вычисляется по формуле

$$C_i(x, y, z, t) = \frac{Q_i}{\left(\frac{8}{3}\pi R_i^3 + (2\pi)^{\frac{3}{2}}\sigma_x\sigma_y\sigma_z\right)} \cdot G_3(x, y, z, t), \quad (3.82)$$

где

$$G_3(x, y, z, t) = \exp\left(-\frac{(x - U \cdot t)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z - h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + h)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right],$$

при вычислениях  $G_3(x, y, z)$ , а также во всех последующих расчетах для мгновенных выбросов, используются значения  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ , вычисляемые по формулам (3.79)-(3.81), для точки, где находится центр облака. Максимальная концентрация при прохождении первичного облака наблюдается на оси  $y = 0, z = 0$  в центре облака и вычисляется по формуле

$$C_{i_{\max}}(x, 0, 0, t = x/U) = \frac{2Q_i}{\left(\frac{8}{3}\pi R_i^3 + (2\pi)^{\frac{3}{2}}\sigma_x\sigma_y\sigma_z\right)} \cdot G_0(x), \quad (3.83)$$

$$G_0(x) = \left\{ \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\}.$$

3.8.2.2.4. Концентрация при прохождении **вторичного** облака, образующегося при истечении **жидкого** ОХВ из разрушенного оборудования, рассчитывается по формуле

$$C_i^*(x, y, z, t) = \begin{cases} \left\{ \frac{q_i^*}{U \cdot (2\pi(R_i^*)^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} \cdot G_H(x, y, z), \right. \\ \left. x \leq x_{\text{гр}}(t_i^*) \text{ при } t > x/U \right. \\ \left. 0, x \leq x_{\text{гр}}(t_i^*) \text{ при } t \leq x/U \text{ или } t > x/U + t_i^* \right. \\ \left. \frac{q_i^* t_i^*}{\left(2\pi(R_i^*)^2 t_i^* U + (2\pi)^{\frac{3}{2}}\sigma_x\sigma_y\sigma_z\right)} \cdot G_3(x, y, z, t), x > x_{\text{гр}}(t_i^*) \right\}, \end{cases} \quad (3.84)$$

$$G_H(x, y, z) = \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z - h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + h)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right],$$

$$x_{гр}(t_i^ж) = \frac{10^{-4}(t_i^ж)^2 U^2 + \sqrt{8\pi C_3^2 (t_i^ж)^2 U^2 + 10^{-8}(t_i^ж)^4 U^4}}{4\pi C_3^2}.$$

Максимальная концентрация на поверхности земли при прохождении этого облака наблюдается на оси  $y = 0, z = 0$  и вычисляется по формуле

$$C_{i\max}^ж(x, 0, 0) = \begin{cases} \frac{2q_i^ж}{U(2\pi(R_i^ж)^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} \cdot G_0(x), x \leq x(t_i^ж) \\ \frac{2q_i^ж t_i^ж}{\left(2\pi(R_i^ж)^2 t_i^ж U + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z\right)} \cdot G_0(x), x > x(t_i^ж) \end{cases}. \quad (3.85)$$

3.8.2.2.5. Концентрация при прохождении **вторичного** облака, образующегося при истечении **жидкого** ОХВ из разрушенного оборудования после отсечения аварийного участка оборудования, рассчитывается по формуле

$$C_i^{\text{отс.выб}}(x, y, z, t) = \begin{cases} 0, t \leq t_i^ж \\ \frac{q_i^{\text{отс.выб}}}{U(2\pi(R_i^{\text{отс.выб}})^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} G_H(x, y, z), x \leq x_{гр}(t_i^{\text{отс.выб}}) \text{ и } t > t_i^ж + \frac{x}{U} \\ 0, x \leq x_{гр}(t_i^{\text{отс.выб}}) \text{ при } t \leq t_i^ж + \frac{x}{U} \text{ или } t > t_i^ж + t_i^{\text{отс.выб}} + \frac{x}{U}, \\ \frac{q_i^{\text{отс.выб}} t_i^{\text{отс.выб}}}{2\pi(R_i^{\text{отс.выб}})^2 t_i^{\text{отс.выб}} U + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} G_3(x, y, z, t - t_i^ж), x > x_{гр}(t_i^{\text{отс.выб}}) \text{ и } t > t_i^ж \end{cases} \quad (3.86)$$

Максимальная концентрация на поверхности земли при прохождении этого облака наблюдается на оси  $y = 0, z = 0$  и вычисляется по формуле

$$C_{i\max}^{\text{отс.выб}}(x, 0, 0) = \begin{cases} \frac{2q_i^{\text{отс.выб}}}{U(2\pi(R_i^{\text{отс.выб}})^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} \cdot G_0(x), x \leq x_{гр}(t_i^{\text{отс.выб}}) \\ \frac{2q_i^{\text{отс.выб}} t_i^{\text{отс.выб}}}{2\pi(R_i^{\text{отс.выб}})^2 t_i^{\text{отс.выб}} U + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot G_0(x), x > x_{гр}(t_i^{\text{отс.выб}}). \end{cases} \quad (3.87)$$

3.8.2.2.6. Концентрация при прохождении **вторичного** облака, образующегося при истечении **газообразного** ОХВ из разрушенного оборудования при наличии пролива, рассчитывается по формуле:

$$C_i^r(x, y, z, t) = \begin{cases} 0, t \leq t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{отс.выб}} \\ \frac{q_i^r}{U(2\pi(R_i^r)^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} G_H(x, y, z), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^r) \text{ и } t > t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{отс.выб}} + \frac{x}{U} \\ 0, x \leq x_{\text{гр}}(t_i^r) \text{ при } t \leq t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{отс.выб}} + \frac{x}{U} \text{ или } t > t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{отс.выб}} + t_i^r + \frac{x}{U}, \\ \frac{q_i^r t_i^r}{2\pi(R_i^r)^2 t_i^r U + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} G_3(x, y, z, t - t_i^{\text{ж}} - t_i^{\text{отс.выб}}), x > x_{\text{гр}}(t_i^r) \text{ и } t > t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{отс.выб}} \end{cases} \quad (3.88)$$

Максимальная концентрация на поверхности земли при прохождении этого облака наблюдается на оси  $y = 0, z = 0$  и вычисляется по формуле

$$C_{i\text{max}}^r(x, 0, 0) = \begin{cases} \frac{2q_i^r}{U(2\pi(R_i^r)^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} \cdot G_0(x), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^r) \\ \frac{2q_i^r t_i^r}{2\pi(R_i^r)^2 t_i^r U + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot G_0(x), x > x_{\text{гр}}(t_i^r). \end{cases} \quad (3.89)$$

3.8.2.2.7. Концентрация при прохождении **вторичного** облака, образующегося при истечении **газообразного** ОХВ из разрушенного оборудования в **отсутствии пролива**, рассчитывается по формуле

$$C_i^{\text{гн}}(x, y, z, t) = \begin{cases} 0, t \leq t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{г}} + t_i^{\text{отс.выб}} \\ \left\{ \begin{array}{l} \frac{q_i^{\text{гн}}}{U(2\pi(R_i^{\text{гн}})^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} G_H(x, y, z), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^{\text{гн}}) \\ \text{и} \quad t > t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{г}} + t_i^{\text{отс.выб}} + \frac{x}{U} \end{array} \right. \\ 0, x \leq x_{\text{гр}}(t_i^{\text{гн}}) \quad \text{при} \quad t \leq t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{г}} + t_i^{\text{отс.выб}} + \frac{x}{U} \\ \text{или} \quad t > t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{отс.выб}} + t_i^{\text{г}} + t_i^{\text{гн}} + \frac{x}{U}, \\ \frac{q_i^{\text{гн}} t_i^{\text{гн}}}{2\pi(R_i^{\text{гн}})^2 t_i^{\text{гн}} U + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} G_3(x, y, z, t - t_i^{\text{ж}} - t_i^{\text{г}} - t_i^{\text{отс.выб}}), \\ x > x_{\text{гр}}(t_i^{\text{гн}}) \text{ и} \quad t > t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{г}} + t_i^{\text{отс.выб}} \end{cases} \quad (3.90)$$

Максимальная концентрация на поверхности земли при прохождении этого облака наблюдается на оси  $y = 0, z = 0$  и вычисляется по формуле

$$C_{i\text{max}}^{\text{гн}}(x, 0, 0) = \begin{cases} \frac{2q_i^{\text{гн}}}{U(2\pi(R_i^{\text{гн}})^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} \cdot G_0(x), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^{\text{гн}}) \\ \frac{2q_i^{\text{гн}} t_i^{\text{гн}}}{2\pi(R_i^{\text{гн}})^2 t_i^{\text{гн}} U + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot G_0(x), x > x_{\text{гр}}(t_i^{\text{гн}}). \end{cases} \quad (3.91)$$

3.8.2.2.8. Концентрация при прохождении **вторичного** облака, образующегося при **испарении ОХВ из пролива**, рассчитывается по формуле

$$C_i^n(x, y, z, t) = \begin{cases} 0, t \leq t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{г}} + t_i^{\text{гн}} + t_i^{\text{отсвыб}} \\ \frac{q_i^n}{2q_i^n / \rho_i^n + 2\pi U \sigma_y \sigma_z} G_n(x, y, z), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^n) \text{ и } t > t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{г}} + t_i^{\text{гн}} + t_i^{\text{отсвыб}} + \frac{x}{U} \\ 0, x \leq x_{\text{гр}}(t_i^n) \text{ при } t \leq t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{г}} + t_i^{\text{гн}} + t_i^{\text{отсвыб}} + \frac{x}{U} \\ \text{или } t > t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{отсвыб}} + t_i^{\text{г}} + t_i^{\text{гн}} + \frac{x}{U}, \\ \frac{q_i^n t_i^n}{2q_i^n t_i^n / \rho_i^n + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} G_3(x, y, z, t - t_i^{\text{ж}} - t_i^{\text{г}} - t_i^{\text{гн}} - t_i^{\text{отсвыб}}), \\ x > x_{\text{гр}}(t_i^{\text{гн}}) \text{ и } t > t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{г}} + t_i^{\text{гн}} + t_i^{\text{отсвыб}} \end{cases} \quad (3.92)$$

Максимальная концентрация на поверхности земли при прохождении этого облака наблюдается на оси  $y = 0, z = 0$  и вычисляется по формуле:

$$C_{i\text{max}}^n(x, 0, 0) = \begin{cases} \frac{2q_i^n}{2q_i^n / \rho_i^n + 2\pi U \sigma_y \sigma_z} \cdot G_0(x), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^n) \\ \frac{2q_i^n t_i^n}{2q_i^n t_i^n / \rho_i^n + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot G_0(x), x > x_{\text{гр}}(t_i^n). \end{cases} \quad (3.93)$$

3.8.2.2.9. Концентрация при прохождении **вторичного** облака, образующегося **при испарении ОХВ из емкости**, рассчитывается по формуле:

$$C_i^e(x, y, z, t) = \begin{cases} 0, t \leq t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{г}} + t_i^{\text{ги}} + t_i^{\text{и}} + t_i^{\text{отс.выб}} \\ \left\{ \begin{array}{l} \frac{q_i^e}{2q_i^e/\rho_i^e + 2\pi U \sigma_y \sigma_z} G_H(x, y, z), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^e) \\ \text{и} \quad t > t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{г}} + t_i^{\text{ги}} + t_i^{\text{и}} + t_i^{\text{отс.выб}} + \frac{x}{U} \end{array} \right. \\ 0, x \leq x_{\text{гр}}(t_i^e) \quad \text{при} \quad t \leq t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{г}} + t_i^{\text{ги}} + t_i^{\text{и}} + t_i^{\text{отс.выб}} + \frac{x}{U} \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{или} \quad t > t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{отс.выб}} + t_i^{\text{г}} + t_i^{\text{ги}} + t_i^{\text{и}} + \frac{x}{U}, \\ \frac{q_i^e t_i^e}{2q_i^e t_i^e/\rho_i^e + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} G_3(x, y, z, t - t_i^{\text{ж}} - t_i^{\text{г}} - t_i^{\text{ги}} - t_i^{\text{и}} - t_i^{\text{отс.выб}}), \\ x > x_{\text{гр}}(t_i^e) \text{ и} \quad t > t_i^{\text{ж}} + t_i^{\text{г}} + t_i^{\text{ги}} + t_i^{\text{и}} + t_i^{\text{отс.выб}} \end{array} \right. \end{cases} \quad (3.94)$$

Максимальная концентрация на поверхности земли при прохождении этого облака наблюдается на оси  $y = 0, z = 0$  и вычисляется по формуле

$$C_{i\text{max}}^e(x, 0, 0) = \begin{cases} \frac{2q_i^e}{2q_i^e/\rho_i^e + 2\pi U \sigma_y \sigma_z} \cdot G_0(x), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^e) \\ \frac{2q_i^e t_i^e}{2q_i^e t_i^e/\rho_i^e + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot G_0(x), x > x_{\text{гр}}(t_i^e). \end{cases} \quad (3.95)$$

Определяется максимально возможная концентрация на расстоянии  $x$  от места аварии при  $i$ -ом сценарии

$$C_i^{\text{max}} = \max(C_{i\text{max}}, C_{i\text{max}}^{\text{ж}}, C_{i\text{max}}^{\text{отс.выб}}, C_{i\text{max}}^{\text{г}}, C_{i\text{max}}^{\text{ги}}, C_{i\text{max}}^{\text{и}}, C_{i\text{max}}^e). \quad (3.96)$$

Концентрация в точке в момент времени  $t$  определяется как

$$C = C_i + C_i^{\text{ж}} + C_i^{\text{отс.выб}} + C_i^{\text{г}} + C_i^{\text{ги}} + C_i^{\text{и}} + C_i^e. \quad (3.97)$$

### 3.8.2.2.10. Определяется поле токсодозы.

Составляющая токсодозы при прохождении первичного облака

$$D_i(x, y, z) = \frac{Q_i (2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_x}{U \left( \frac{8}{3} \pi R_i^3 + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z \right)} \cdot G_H(x, y, z, t). \quad (3.98)$$



Максимальная составляющая токсодозы на поверхности земли при прохождении первичного облака наблюдается на оси  $y = 0, z = 0$  и составляет

$$D_{i \max}(x, 0, 0) = \frac{Q_i (2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_x}{U \left( \frac{8}{3} \pi R_i^3 + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z \right)} \cdot G_0(x). \quad (3.99)$$

Составляющая токсодозы при прохождении вторичного облака, образующегося при истечении жидкого ОХВ из разрушенного оборудования, равна

$$D_i^{\text{ж}}(x, y, z) = \begin{cases} \frac{q_i^{\text{ж}} \min\{t_i^{\text{ж}}, t_{\text{эксп}}\}}{U(2\pi(R_i^{\text{ж}})^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} G_H(x, y, z), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^{\text{ж}}) \\ \frac{q_i^{\text{ж}} (2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_x \min\{t_i^{\text{ж}}, t_{\text{эксп}}\}}{U \left( 2\pi(R_i^{\text{ж}})^2 t_i^{\text{ж}} U + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z \right)} \cdot G_H(x, y, z), x > x_{\text{гр}}(t_i^{\text{ж}}) \end{cases} \quad (3.100)$$

Максимальная составляющая токсодозы на поверхности земли при прохождении этого облака наблюдается на оси  $y = 0, z = 0$  и составляет

$$D_i^{\text{ж}}(x, 0, 0) = \begin{cases} \frac{2q_i^{\text{ж}} \min\{t_i^{\text{ж}}, t_{\text{эксп}}\}}{U(2\pi(R_i^{\text{ж}})^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} G_0(x), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^{\text{ж}}) \\ \frac{2q_i^{\text{ж}} (2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_x \min\{t_i^{\text{ж}}, t_{\text{эксп}}\}}{U \left( 2\pi(R_i^{\text{ж}})^2 t_i^{\text{ж}} U + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z \right)} \cdot G_0(x), x > x_{\text{гр}}(t_i^{\text{ж}}) \end{cases} \quad (3.101)$$

Составляющая токсодозы при прохождении вторичного облака, образующегося при истечении жидкого ОХВ из разрушенного оборудования после отсечения аварийного участка, равна

$$D_i^{\text{отс.выб}}(x, y, z) = \begin{cases} \frac{q_i^{\text{отс.выб}} \min\{t_i^{\text{отс.выб}}, \min\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}\}\}}{U(2\pi(R_i^{\text{отс.выб}})^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} \cdot G_H(x, y, z), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^{\text{отс.выб}}) \\ \frac{q_i^{\text{отс.выб}} (2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_x \min\{t_i^{\text{отс.выб}}, \min\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}\}\}}{U \left( 2\pi(R_i^{\text{отс.выб}})^2 t_i^{\text{отс.выб}} U + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z \right)} \cdot G_H(x, y, z), x > x_{\text{гр}}(t_i^{\text{отс.выб}}) \end{cases} \quad (3.102)$$

Максимальная составляющая токсодозы на поверхности земли при прохождении этого облака наблюдается на оси  $y = 0, z = 0$  и составляет:

$$D_{i \max}^{\text{отс.выб}}(x, 0, 0) = \begin{cases} \frac{2q_i^{\text{отс.выб}} \min\{t_i^{\text{отс.выб}}, \min\{\text{sum}\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}\}\}}{U(2\pi(R_i^{\text{отс.выб}})^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} \cdot G_0(x), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^{\text{отс.выб}}) \\ \frac{2q_i^{\text{отс.выб}} (2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_x \min\{t_i^{\text{отс.выб}}, \min\{\text{sum}\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}\}\}}{U\left(2\pi(R_i^{\text{отс.выб}})^2 t_i^{\text{отс.выб}} U + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z\right)} \cdot G_0(x), x > x_{\text{гр}}(t_i^{\text{отс.выб}}) \end{cases} \quad (3.103)$$

Составляющая токсодозы при прохождении вторичного облака, образующегося при истечении газообразного ОХВ из разрушенного оборудования до испарения пролива, равна:

$$D_i^r(x, y, z) = \begin{cases} \frac{q_i^r \min\{t_i^r, \min\{\text{sum}\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}, t_i^{\text{отс.выб}}\}\}}{U(2\pi(R_i^r)^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} \cdot G_H(x, y, z), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^r) \\ \frac{q_i^r (2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_x \min\{t_i^r, \min\{\text{sum}\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}, t_i^{\text{отс.выб}}\}\}}{U\left(2\pi(R_i^r)^2 t_i^r U + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z\right)} \cdot G_H(x), x > x_{\text{гр}}(t_i^r) \end{cases} \quad (3.104)$$

Максимальная составляющая токсодозы на поверхности земли при прохождении этого облака наблюдается на оси  $y = 0, z = 0$  и составляет:

$$D_{i \max}^r(x, 0, 0) = \begin{cases} \frac{2q_i^r \min\{t_i^r, \min\{\text{sum}\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}, t_i^{\text{отс.выб}}\}\}}{U(2\pi(R_i^r)^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} \cdot G_0(x), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^r) \\ \frac{q_i^r (2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_x \min\{t_i^r, \min\{\text{sum}\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}, t_i^{\text{отс.выб}}\}\}}{U\left(2\pi(R_i^r)^2 t_i^r U + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z\right)} \cdot G_0(x), x > x_{\text{гр}}(t_i^r) \end{cases} \quad (3.105)$$

Составляющая токсодозы при прохождении вторичного облака, образующегося при истечении газообразного ОХВ из разрушенного оборудования после испарения пролива, равна:

$$D_i^{\Gamma H}(x, y, z) = \begin{cases} \frac{q_i^{\Gamma H} \min\{t_i^{\Gamma H}, \min \sum\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}, t_i^{\text{отс.выб}}, t_i^{\Gamma}\}\}}{U(2\pi(R_i^{\Gamma H})^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} \cdot G_H(x, y, z), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^{\Gamma H}) & (3.106) \\ \frac{q_i^{\Gamma H} (2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_x \min\{t_i^{\Gamma H}, \min \sum\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}, t_i^{\text{отс.выб}}, t_i^{\Gamma}\}\}}{U\left(2\pi(R_i^{\Gamma H})^2 t_i^{\Gamma H} U + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z\right)} \cdot G_H(x, y, z), x > x_{\text{гр}}(t_i^{\Gamma H}) \end{cases}$$

Максимальная составляющая токсодозы на поверхности земли при прохождении этого облака наблюдается на оси  $y = 0, z = 0$  и составляет:

$$D_{i \text{ max}}^{\Gamma H}(x, 0, 0) = \begin{cases} \frac{2q_i^{\Gamma H} \min\{t_i^{\Gamma H}, \min \sum\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}, t_i^{\text{отс.выб}}, t_i^{\Gamma}\}\}}{U(2\pi(R_i^{\Gamma H})^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z)} \cdot G_0(x), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^{\Gamma H}) & (3.107) \\ \frac{2q_i^{\Gamma H} (2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_x \min\{t_i^{\Gamma H}, \min \sum\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}, t_i^{\text{отс.выб}}, t_i^{\Gamma}\}\}}{U\left(2\pi(R_i^{\Gamma H})^2 t_i^{\Gamma H} U + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z\right)} \cdot G_0(x), x > x_{\text{гр}}(t_i^{\Gamma H}) \end{cases}$$

Составляющая токсодозы при прохождении вторичного облака, образующегося при испарении ОХВ из пролива, равна

$$D_i^{\text{H}}(x, y, z) = \begin{cases} \frac{q_i^{\text{H}} \min\{t_i^{\text{H}}, \min \sum\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}, t_i^{\text{отс.выб}}, t_i^{\Gamma}, t_i^{\Gamma H}\}\}}{2q_i^{\text{H}} / \rho_i^{\text{H}} + 2\pi U \sigma_y \sigma_z} \cdot G_H(x, y, z), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^{\text{H}}) & (3.108) \\ \frac{q_i^{\text{H}} (2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_x \min\{t_i^{\text{H}}, \min \sum\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}, t_i^{\text{отс.выб}}, t_i^{\Gamma}, t_i^{\Gamma H}\}\}}{U\left(2q_i^{\text{H}} t_i^{\text{H}} / \rho_i^{\text{H}} + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z\right)} \cdot G_H(x, y, z), x > x_{\text{гр}}(t_i^{\text{H}}) \end{cases}$$

Максимальная составляющая токсодозы на поверхности земли при прохождении этого облака наблюдается на оси  $y = 0, z = 0$  и составляет:

$$D_{i \text{ max}}^{\text{H}}(x, 0, 0) = \begin{cases} \frac{2q_i^{\text{H}} \min\{t_i^{\text{H}}, \min \sum\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}, t_i^{\text{отс.выб}}, t_i^{\Gamma}, t_i^{\Gamma H}\}\}}{2q_i^{\text{H}} / \rho_i^{\text{H}} + 2\pi U \sigma_y \sigma_z} \cdot G_0(x), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^{\text{H}}) & (3.109) \\ \frac{2q_i^{\text{H}} (2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_x \min\{t_i^{\text{H}}, \min \sum\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}, t_i^{\text{отс.выб}}, t_i^{\Gamma}, t_i^{\Gamma H}\}\}}{U\left(2q_i^{\text{H}} t_i^{\text{H}} / \rho_i^{\text{H}} + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z\right)} \cdot G_0(x), x > x_{\text{гр}}(t_i^{\text{H}}) \end{cases}$$

Составляющая токсодозы при прохождении вторичного облака, образующегося при испарении ОХВ из емкости, равна:

$$D_i^e(x, y, z) = \begin{cases} \frac{q_i^e \min\{t_i^e, \min\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}, t_i^{\text{отс.выб}}, t_i^{\text{г}}, t_i^{\text{гн}}, t_i^{\text{н}}\}\}}{2q_i^e / \rho_i^e + 2\pi U \sigma_y \sigma_z} \cdot G_H(x, y, z), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^e) \\ \frac{q_i^e (2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_x \min\{t_i^e, \min\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}, t_i^{\text{отс.выб}}, t_i^{\text{г}}, t_i^{\text{гн}}, t_i^{\text{н}}\}\}}{U \left( 2q_i^e t_i^e / \rho_i^e + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z \right)} \cdot G_H(x, y, z), x > x_{\text{гр}}(t_i^e) \end{cases} \quad (3.110)$$

Максимальная составляющая токсодозы на поверхности земли при прохождении этого облака наблюдается на оси  $y = 0, z = 0$  и составляет:

$$D_i^e(x, 0, 0) = \begin{cases} \frac{2q_i^e \min\{t_i^e, \min\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}, t_i^{\text{отс.выб}}, t_i^{\text{г}}, t_i^{\text{гн}}, t_i^{\text{н}}\}\}}{2q_i^e / \rho_i^e + 2\pi U \sigma_y \sigma_z} \cdot G_0(x), x \leq x_{\text{гр}}(t_i^e) \\ \frac{2q_i^e (2\pi)^{\frac{1}{2}} \sigma_x \min\{t_i^e, \min\{t_{\text{эксп}}, t_i^{\text{ж}}, t_i^{\text{отс.выб}}, t_i^{\text{г}}, t_i^{\text{гн}}, t_i^{\text{н}}\}\}}{U \left( 2q_i^e t_i^e / \rho_i^e + (2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z \right)} \cdot G_0(x), x > x_{\text{гр}}(t_i^e) \end{cases} \quad (3.111)$$

Определяется максимальная токсодоза на расстоянии  $x$  от места аварии при  $i$ -ом сценарии:

$$D = D_{i \max} + D_{i \max}^{\text{ж}} + D_{i \max}^{\text{отс.выб}} + D_{i \max}^{\text{г}} + D_{i \max}^{\text{гн}} + D_{i \max}^{\text{н}} + D_{i \max}^e. \quad (3.112)$$

Сравнением с пороговыми и смертельными токсодозами (таблица 3.23) определяются расстояния, соответствующие смертельному поражению и пороговому воздействию.

Таблица 3.23

Свойства ОХВ

Вещество	Молекулярная масса $\mu$	Плотность газа $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Плотность жидкости $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Температура кипения $T_{\text{кип}}$ , °С	Теплоемкость $C_p$ , кДж/кг/°С	Коэффициент $C_p/C_v$ , $\gamma$	Пороговая токсодоза $PC_{50}$ , мг·мин/л	Смертельная токсодоза $PC_{50}$ , мг·мин/л	Теплота испарения $\Delta H_{\text{исп}}$ , кДж/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Аммиак	17,0	0,8	681	-33,4	4,6	1,34	15,0	150	1360
Мышьяковистый водород	77,9	3,5	1640	-62,5	0,5	1,3	0,2	6	242
Фтористый водород	20,4	0,92	989	19,4	1,42	1,3	4,0	40	1560
Хлористый водород	36,5	1,64	1191	-85,1	0,8	1,41	2,0	20	300
Бромистый водород	80,9	3,50	1490	-67,8	0,36	1,42	2,4	24	217
Цианистый водород	27,0	0,9	689	25,6	1,33	1,31	0,2	6	933
Сероводород	34,1	1,5	964	-60,4	1,04	1,3	1,0	15	310
Сероуглерод	76,1	6,0	1263	46,2	0,67	1,24	30,0	500	352
Формальдегид	30	1,03	815	-19,3	1,32	1,3	0,6	6	273
Фосген	98,9	3,48	1420	8,2	0,67	1,3	0,55	3,2	158
Фтор	38,0	1,7	1512	-188,0	3,32	1,3	02	3	727
Хлор	70,1	3,2	1553	-34,1	0,96	1,3	0,6	6	288
Хлорциан	61,5	2,1	1258	12,6	0,73	1,3	0,75	11	208
Окись углерода	28	0,97	1000	-191,6	1,04	1,29	10,0	37,5	216
Окись этилена	44	1,7	882	10,7	1,72	1,3	2,2	25	320

**Таблица 3.24. Значения характеристик подстилающих поверхностей**

Тип поверхности	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/м/с	Теплоемкость, Дж/кг/°С
Бетон	2220	1,42	770
Песок	1380	0,35	840
Лед	920	2,23	2080

**Пример 3.13.** Емкость с газообразным хлором (1т) находится при температуре 6 градусов Цельсия и давлении 1 атм. Емкость расположена в ровной местности (степь), размер шероховатости 0,001 м. Происходит разрыв емкости и выбрасывается весь хлор. Метеоусловия: скорость ветра 8,5 м/с, день. Определить концентрации хлора в атмосфере, а также длину зоны

химического заражения, где возможно смертельное поражение незащищенных людей на открытой местности.

**Решение.** По условиям хранения и характеру разрушения определяем тип сценария аварийной ситуации - 1. По таблице 3.19 определяем условия стабильности атмосферы - изотермия.

По формуле (3.55) определяем количество хлора в первичном облаке  $Q = 1000 \text{ кг}$ .

По таблицам 3.20 и 3.21 находим коэффициенты, используемые при расчете дисперсии.

Класс стабильности	$A_1$	$A_2$	$B_1$	$B_2$	$C_3$
Изотермия	0,098	0,00135	0,889	0,688	0,08

$z_0, \text{ см}$	$C_1$	$C_2$	$D_1$	$D_2$
1	1,56	0,000625	0,048	0,045

Ниже представлена программа расчета, выполненная в окне Mathcad.

Исходные данные:

$$T1 := 6 \quad z0 := 0.01 \quad Q := 1000 \quad h := 0 \quad U := 8.5 \quad \mu := 70.906$$

$$P1 := 1.01325 \cdot 10^5 \quad P_0 := 10^5 \quad \gamma := 1.3 \quad R := 8.314$$

$$a1 := 0.098 \quad a2 := 0.00135 \quad b1 := 0.889 \quad b2 := 0.688$$

$$c1 := 1.56 \quad c2 := 0.000625 \quad c3 := 0.08 \quad d1 := 0.048 \quad d2 := 0.045$$

Результаты расчета:

$$V1 := \frac{10^3 \cdot Q \cdot R \cdot (T1 + 273.15)}{\mu \cdot P1} \quad V1 = 323.034 \quad \rho1 := \frac{Q}{V1} \quad x := 0.. 1000$$

$$\rho1B := \rho1 \cdot \left(\frac{P0}{P1}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad \rho1B = 3.064 \quad Ri := \sqrt[3]{\frac{3}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{Q}{\rho1B}} \quad Ri = 4.271$$

$$\sigma_x(x) := \frac{c3 \cdot x}{\sqrt{1 + 0.0001 \cdot x}} \quad \sigma_{xx}(x) := \frac{220.2 \cdot 60 + \frac{x}{U}}{220.2 \cdot 60 + 600} \cdot \sigma_x(x) \quad y(x) := \frac{x}{U}$$

$$g(x) := \frac{a1 \cdot x^{b1}}{1 + a2 \cdot x^{b2}} \quad \sigma_y(x) := \begin{cases} \sigma_x(x) & \text{if } y(x) < 600 \\ \sigma_{xx}(x) & \text{if } y(x) \geq 600 \end{cases}$$

$$f(x) := \begin{cases} \ln \left[ c1 \cdot x^{d1} \cdot (1 + c2 \cdot x^{d2}) \right] & \text{if } z0 < 0.1 \\ \ln \left[ c1 \cdot \frac{x^{d1}}{(1 + c2 \cdot x^{d2})} \right] & \text{if } z0 \geq 0.1 \end{cases} \quad \sigma_z(x) := f(x) \cdot g(x)$$

Максимальная концентрация при прохождении первичного облака:

$$Go(x) := \exp\left(\frac{-h^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right)$$

$$C_{\max}(x) := \frac{2 \cdot Q \cdot 10^3}{\frac{8}{3} \cdot \pi \cdot Ri^3 + (2 \cdot \pi)^2 \cdot \sigma_x(x) \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot Go(x)$$

Максимальная составляющая токсодозы на поверхности земли при прохождении первичного облака:

$$D_{\max}(x) := \frac{2 \cdot Q \cdot (2 \cdot \pi)^{\frac{1}{2}} \cdot \sigma_x(x) \cdot Go(x) \cdot 10^3}{U \cdot \left[ \frac{8}{3} \cdot \pi \cdot Ri^3 + (2 \cdot \pi)^{\frac{3}{2}} \cdot \sigma_x(x) \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \right] \cdot 60}$$

Пороговая токсодоза:  $D_{\max}(640) = 0.606$  (мг мин/л)

Смертельная токсодоза:  $D_{\max}(187) = 6.02$  (мг мин/л)

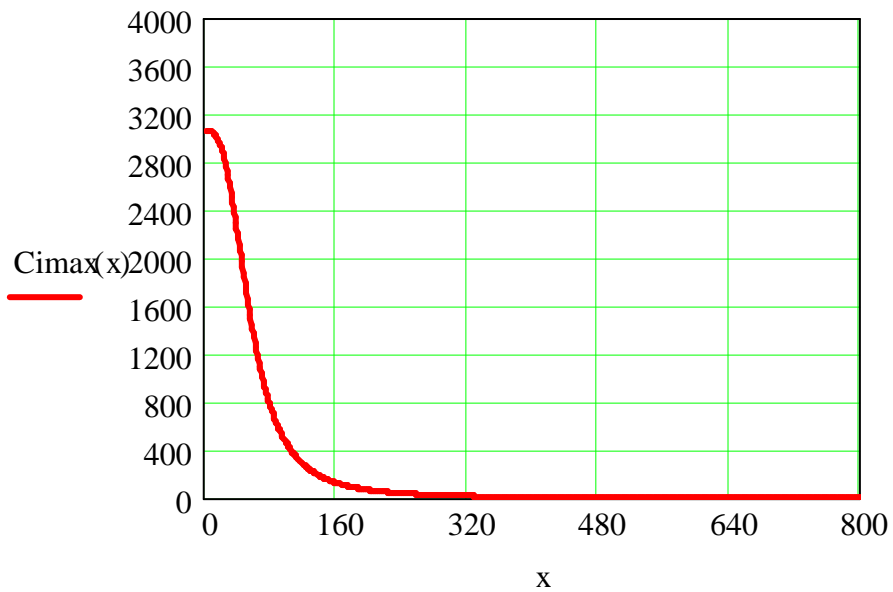


Рис.3.43. Максимальная концентрация на оси облака (в направлении по ветру) при выбросе 1 т хлора.

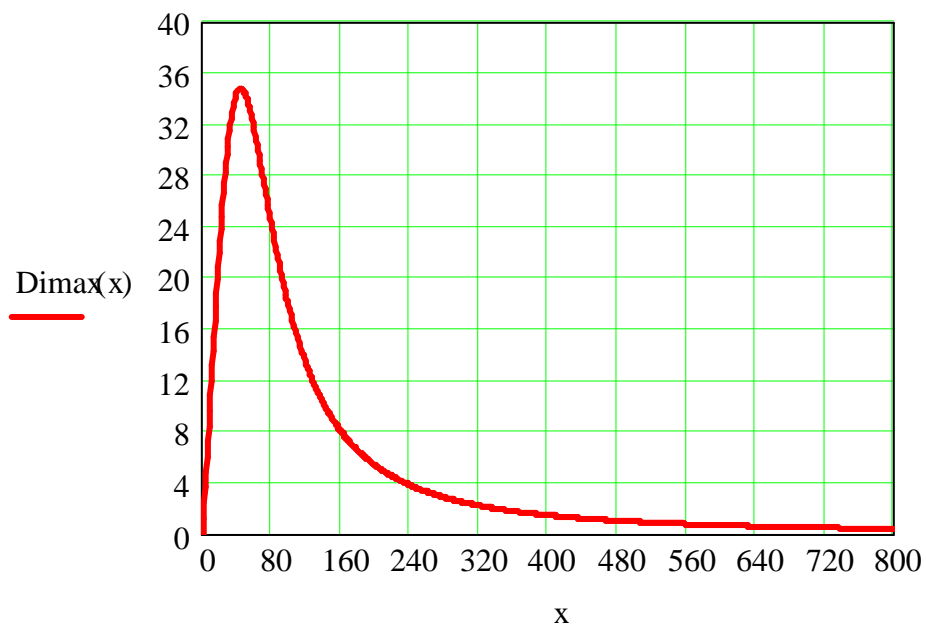


Рис.3.44. Токсодоза на оси облака

Вероятность поражения хлором можно вычислить, зная значения пробит-функции:

$$x := 0..150 \quad \tau := 0,1..50$$



$$C_{ppm}(x) := C_{imax}(x) \cdot \frac{(273.15 + T1)}{12.187 \cdot \mu} \quad Pr(\tau, x) := -8.29 + 0.92 \cdot \ln(C_{ppm}(x)^2 \cdot \tau)$$

$$P_{por}(\tau, x) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr(\tau, x) - 5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

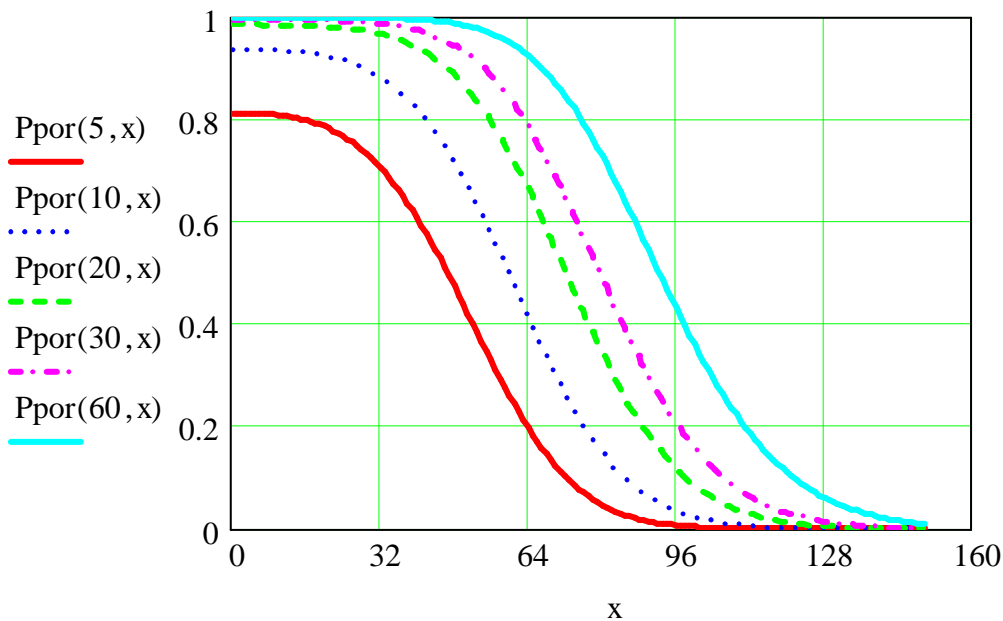


Рис.3.45. Вероятность поражения хлором (контейнер) на различных расстояниях и времени экспозиции (5, 10, 20, 30, 60 мин.).

Концентрация при прохождении первичного облака во времени вычисляется как:

$$t := 80..150$$

$$x := 1000 \quad y := 0 \quad z := 0$$

$$G3x(t) := \exp\left[\frac{-(x - U \cdot t)^2}{2 \cdot \sigma_x(x)^2} - \frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x)^2}\right] \cdot \left[ \exp\left[\frac{-(z - h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z + h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] \right]$$

$$C_{ix}(t) := \frac{Q \cdot 10^3}{\frac{8}{3} \cdot \pi \cdot Ri^3 + (2 \cdot \pi)^2 \cdot \sigma_x(x) \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot G3x(t)$$

$$x := 1000 \quad y := 50 \quad z := 0$$

$$G3y(t) := \exp\left[\frac{-(x - U \cdot t)^2}{2 \cdot \sigma_x(x)^2} - \frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x)^2}\right] \cdot \left[ \exp\left[\frac{-(z - h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z + h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] \right]$$

$$Ciy(t) := \frac{Q \cdot 10^3}{\frac{8}{3} \cdot \pi \cdot Ri^3 + (2 \cdot \pi)^{\frac{3}{2}} \cdot \sigma_x(x) \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot G3y(t)$$

$$x := 1000 \quad y := 50 \quad z := 20$$

$$G3z(t) := \exp\left[\frac{-(x - U \cdot t)^2}{2 \cdot \sigma_x(x)^2} - \frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x)^2}\right] \cdot \left[ \exp\left[\frac{-(z - h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z + h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] \right]$$

$$Ciz(t) := \frac{Q \cdot 10^3}{\frac{8}{3} \cdot \pi \cdot Ri^3 + (2 \cdot \pi)^{\frac{3}{2}} \cdot \sigma_x(x) \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot G3z(t)$$

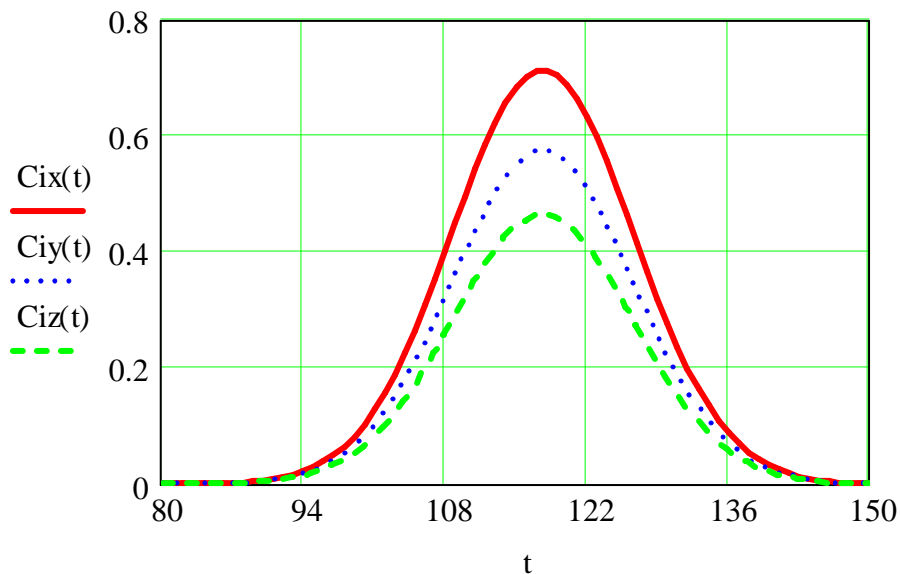


Рис.3.46. Зависимости концентрации при прохождении первичного облака от времени в точках  
 $(x = 1000, y = 0, z = 0)$ ;  $(x = 1000, y = 50, z = 0)$ ;  $(x = 1000, y = 50, z = 20)$ .

**Пример 3.14.** Емкость со сжиженным аммиаком (30 т) находится при температуре 30 град. Емкость с аммиаком расположена в ровной местности (степь), размер шероховатости 0,003. Аммиак находится в равновесии со своими парами (12 атм). Количество аммиака в газовой фазе в емкости незначительно. Весь находящийся в емкости аммиак выбрасывается в окружающую среду. Метеоусловия: скорость ветра 1 м/с. Определить концентрации аммиака в атмосфере, а также длину зоны химического заражения, где возможно смертельное поражение незащищенных людей на открытой местности. Сценарий 3 (полное разрушение емкости, содержащей ОХВ в жидком состоянии). Инверсия.

Исходные данные:

$$T3 := 30 \quad z0 := 0.003 \quad Q := 30000 \quad h := 0 \quad U := 1 \quad \mu := 17 \quad Qh := 30000 \quad Tr := 30$$

$$Po := 101325 \quad \gamma := 1.34 \quad R := 8.314 \quad \rho g := 681 \quad a1 := 0.0609 \quad a2 := 0.00196$$

$$b1 := 0.895 \quad b2 := 0.684 \quad P3 := 12 \cdot Po \quad Tk := -33.4 \quad TB := 20$$

$$c1 := 1.56 \quad c2 := 0.000625 \quad c3 := 0.06 \quad d1 := 0.048 \quad d2 := 0.45 \quad Cp := 4.6 \cdot 10^3$$

$$\Delta H := 1360 \cdot 10^3 \quad \lambda p := 1.42 \quad cp := 770 \quad pp := 2220 \quad \alpha := 0.1$$

Для сценария 3 характеристики выброса рассчитываются следующим образом:

$$Q3g_{\text{gaz}} := Q \cdot \left[ 1 - \exp \left[ - \left[ \frac{Cp \cdot (T3 - Tk + |T3 - Tk|)}{2 \cdot \Delta H} \right] \right] \right]$$

$$Q3g := \min(Q3g_{\text{gaz}}, Q - Q3g_{\text{gaz}}) \quad F := \frac{Q - Q3g_{\text{gaz}} - Q3g}{0.05 \cdot \rho g} \quad Fk := F \quad F = 540.956$$

$$Ph := 760 \cdot \exp \left[ \Delta H \cdot 17 \cdot 0.001 \cdot \frac{\left( \frac{1}{Tk + 273.15} - \frac{1}{TB + 273.15} \right)}{R} \right]$$

$$qi := (5.83 + 4.1U) \cdot 10^{-6} \cdot Ph \cdot \sqrt{\mu}$$

$$t_t := \min \left[ \frac{(T_p - T_k + |T_p - T_k|)}{2 \cdot \Delta H} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_p \cdot c_p \cdot \rho_p}{\pi}} \cdot \frac{1}{q_i}, \sqrt{\frac{2\sqrt{F}}{U}} \right]$$

$$Q_{3i} := \min \left[ \frac{(T_p - T_k + |T_p - T_k|)}{\Delta H} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_p \cdot c_p \cdot \rho_p}{\pi}} \cdot \frac{Fk^2}{F} \cdot t_t, Q - Q_{3g} - Q_{3g} \right]$$

$$Q_{gaz} := \alpha \cdot 0.001 \cdot \frac{\mu}{R} \cdot \frac{V_3 \cdot P_3}{T_3 + 273.15} \quad Q_3 := Q_{3g} + Q_{3g} + Q_{3i} + Q_{gaz}$$

Расход ОХВ во вторичном облаке и длительность испарения ОХВ из пролива:

$$q_{3i} := F \cdot q_i \quad t_{3i} := \frac{(Q - Q_3)}{q_{3i}} \quad \rho_k := 0.001 \cdot \frac{\mu}{R} \cdot \frac{P_o}{T_3 + 273.15} \quad \rho_{3i} := \rho_k$$

$$\rho_{3B} := \begin{cases} \left( \rho_k \cdot \frac{Q_3}{Q_{3g} + Q_{3i} + Q_{gaz}} \right) & \text{if } T_3 > T_k \\ \left[ 0.001 \cdot \frac{\mu}{R} \cdot \frac{P_3}{T_3 + 273.15} \cdot \left( \frac{P_o}{P_3} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right] & \text{if } T_3 < T_k \end{cases}$$

$$R_3 := \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \cdot \frac{Q_3}{\rho_{3B}}} \quad R_{3i} := 0.5 \cdot \sqrt{F} \quad R_3 = 12.658$$

Максимальная концентрация при прохождении первичного облака, образующегося при истечении жидкого ОХВ на поверхности земли на оси  $y = 0, z = 0$ , мг/л:

$$x := 0..1500$$

$$\sigma_x(x) := \frac{c_3 \cdot x}{\sqrt{1 + 0.0001 \cdot x}} \quad \sigma_{xx}(x) := \frac{220.2 \cdot 60 + \frac{x}{U}}{220.2 \cdot 60 + 600} \cdot \sigma_x(x) \quad y(x) := \frac{x}{U}$$

$$g(x) := \frac{a_1 \cdot x^{b_1}}{1 + a_2 \cdot x^{b_2}} \quad \sigma_y(x) := \begin{cases} \sigma_x(x) & \text{if } y(x) < 600 \\ \sigma_{xx}(x) & \text{if } y(x) \geq 600 \end{cases}$$

$$f(x) := \begin{cases} \ln \left[ c1 \cdot x^{d1} \cdot (1 + c2 \cdot x^{d2}) \right] & \text{if } z0 < 0.1 \\ \ln \left[ c1 \cdot \frac{x^{d1}}{(1 + c2 \cdot x^{d2})} \right] & \text{if } z0 \geq 0.1 \end{cases} \quad \sigma_z(x) := f(x) \cdot g(x)$$

Максимальная концентрация при прохождении первичного облака, образующегося при истечении жидкого ОХВ на поверхности земли на оси  $y = 0, z = 0$ :

$$Go(x) := \exp \left( \frac{-h^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2} \right)$$

$$C_{\max}(x) := \frac{2 \cdot Q3 \cdot 10^3}{\frac{8}{3} \cdot \pi \cdot R3^2 + (2 \cdot \pi)^{\frac{3}{2}} \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot Go(x)$$

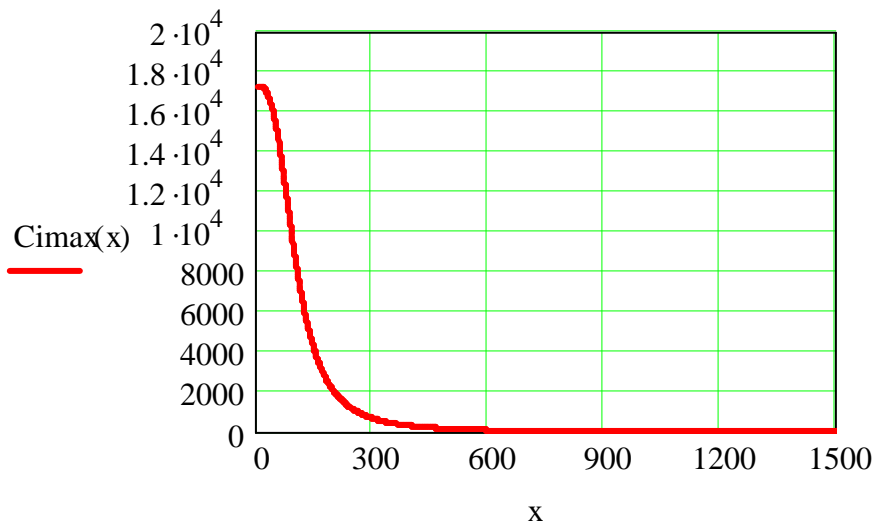


Рис.3.47. Максимальная концентрация на оси первичного облака (в направлении по ветру) при выбросе 30 т аммиака .

Максимальная составляющая токсодозы на поверхности земли при прохождении первичного облака, мг мин/л:

$$\text{Dimax}(x) := \frac{2 \cdot Q3 \cdot (2 \cdot \pi)^{\frac{1}{2}} \cdot 10^3 \cdot \sigma_x(x)}{U \cdot \left[ \left( \frac{8}{3} \right) \cdot \pi \cdot R3^2 + (2 \cdot \pi)^{\frac{3}{2}} \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \right] \cdot 60} \cdot G_0(x)$$

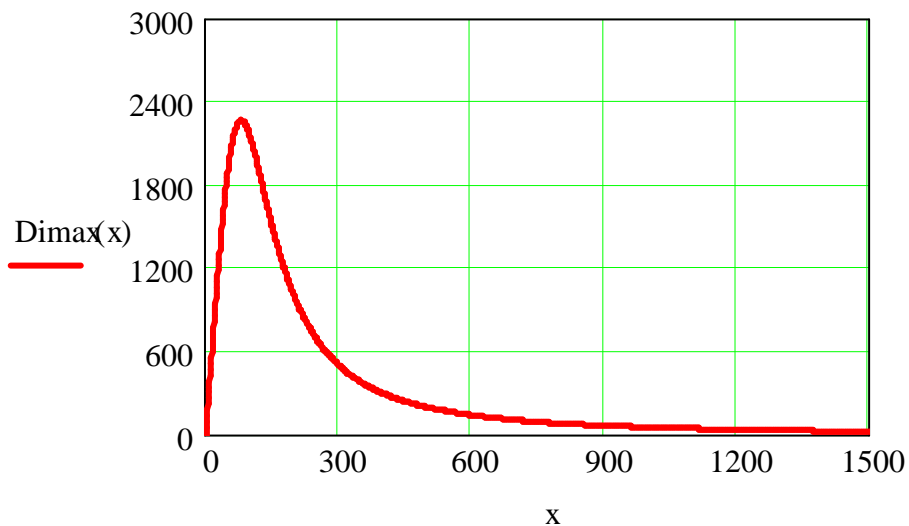


Рис.3.48. Токсодоза на оси первичного облака в направлении по ветру при выбросе 30 т аммиака.

Пороговая токсодоза  $\text{Dimax}(1917) = 15.004$  (мг мин/л)

Смертельная токсодоза  $\text{Dimax}(582) = 150.143$  (мг мин/л)

Зависимость концентрации от времени при прохождении первичного облака:

$t := 800.. 1200$

$x := 1000$   $y := 0$   $z := 0$

$$\sigma_x(x) := \frac{c3 \cdot x}{\sqrt{1 + 0.0001 \cdot x}} \quad \sigma_{xx}(x) := \frac{220.2 \cdot 60 + \frac{x}{U}}{220.2 \cdot 60 + 600} \cdot \sigma_x(x)$$

$$f(x) := \begin{cases} \ln\left[c1 \cdot x^{d1} \cdot (1 + c2 \cdot x^{d2})\right] & \text{if } z0 < 0.1 \\ \ln\left[c1 \cdot \frac{x^{d1}}{(1 + c2 \cdot x^{d2})}\right] & \text{if } z0 \geq 0.1 \end{cases} \quad \sigma_z(x) := f(x) \cdot g(x)$$

$$G3x(t) := \exp\left[\frac{-(x - U \cdot t)^2}{2 \cdot \sigma_x(x)^2} - \frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x)^2}\right] \cdot \left[ \exp\left[\frac{-(z - h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z + h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] \right]$$

$$Cix(t) := \frac{Q3 \cdot 10^3}{\frac{8}{3} \cdot \pi \cdot R3^3 + (2 \cdot \pi)^2 \cdot \sigma_x(x) \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot G3x(t)$$

$$x := 1000 \quad y := 50 \quad z := 0$$

$$G3y(t) := \exp\left[\frac{-(x - U \cdot t)^2}{2 \cdot \sigma_x(x)^2} - \frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x)^2}\right] \cdot \left[ \exp\left[\frac{-(z - h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z + h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] \right]$$

$$Ciy(t) := \frac{Q3 \cdot 10^3}{\frac{8}{3} \cdot \pi \cdot R3^3 + (2 \cdot \pi)^2 \cdot \sigma_x(x) \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot G3y(t)$$

$$x := 1000 \quad y := 50 \quad z := 20$$

$$G3z(t) := \exp\left[\frac{-(x - U \cdot t)^2}{2 \cdot \sigma_x(x)^2} - \frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x)^2}\right] \cdot \left[ \exp\left[\frac{-(z - h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z + h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] \right]$$

$$Ciz(t) := \frac{Q3 \cdot 10^3}{\frac{8}{3} \cdot \pi \cdot R3^3 + (2 \cdot \pi)^2 \cdot \sigma_x(x) \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot G3z(t)$$

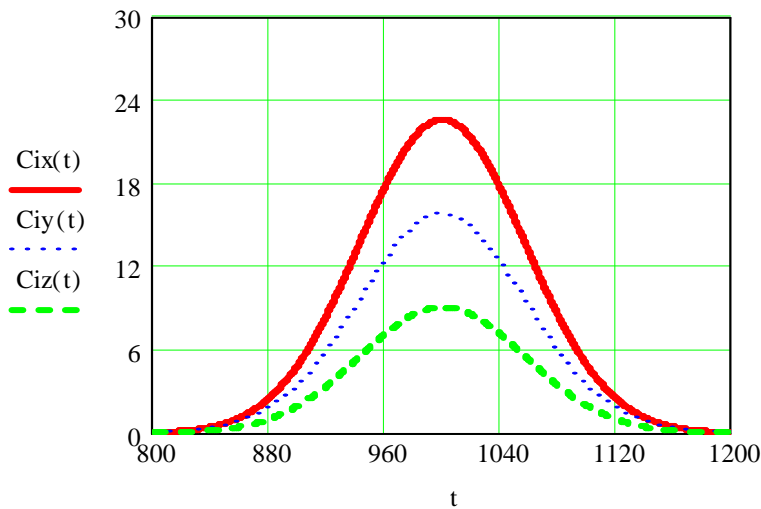


Рис.3.49. Зависимости концентрации в точках (1000,0,0), (1000,50,0), (1000,50,20) от времени t при выбросе 30 т аммиака при прохождении первичного облака.

Максимальная концентрация при прохождении вторичного облака, образующегося при испарении жидкого ОХВ на поверхности земли на оси  $y = 0, z = 0$ :

$$x := 0.. 1500$$

$$x_{grti} := \frac{10^{-4} \cdot (t3i)^2 \cdot U^2 + \sqrt{8 \cdot \pi \cdot c3^2 \cdot (t3i)^2 \cdot U^2 + 10^{-8} \cdot (t3i)^2 \cdot U^4}}{4 \cdot \pi \cdot c3^2}$$

$$C_{imaxi}(x) := \begin{cases} \left( \frac{2 \cdot q3i \cdot 10^3}{2 \cdot \frac{q3i}{\rho3i} + 2 \cdot \pi \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot U} \cdot G_0(x) \right) & \text{if } x \leq x_{grti} \\ \left[ \frac{2 \cdot q3i \cdot t3i \cdot 10^3}{2 \cdot \frac{q3i \cdot t3i}{\rho3i} + (2 \cdot \pi)^{\frac{3}{2}} \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot \sigma_x(x)} \cdot G_0(x) \right] & \text{if } x > x_{grti} \end{cases}$$

Максимальная составляющая токсодозы на поверхности земли при прохождении вторичного облака на оси  $y = 0, z = 0$ :



$$Dimax_i(x) := \begin{cases} \left[ \frac{2 \cdot q_{3i} \cdot 10^3 \cdot t_{3i}}{\left( 2 \cdot \frac{q_{3i}}{\rho_{3i}} + 2 \cdot \pi \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot U \right) \cdot 60} \cdot Go(x) \right] & \text{if } x \leq x_{grti} \\ \left[ \frac{2 \cdot q_{3i} \cdot t_{3i} \cdot 10^3 \cdot (2 \cdot \pi)^{\frac{1}{2}} \cdot \sigma_x(x)}{U \cdot \left[ 2 \cdot \frac{q_{3i} \cdot t_{3i}}{\rho_{3i}} + (2 \cdot \pi)^{\frac{3}{2}} \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot \sigma_x(x) \right] \cdot 60} \cdot Go(x) \right] & \text{if } x > x_{grti} \end{cases}$$

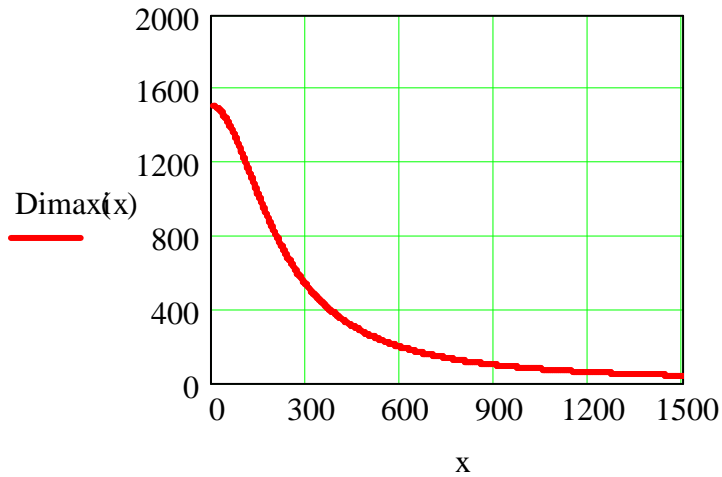


Рис.3.50. Токсодоза на оси вторичного облака (в направлении по ветру) при выбросе 30 т аммиака на стадии испарения пролива

Пороговая токсодоза  $Dimax_i(2590) = 14.997$  (мг мин/л)

Смертельная токсодоза  $Dimax_i(707) = 149.823$  (мг мин/л)

Максимальная токсодоза на расстоянии x от места аварии:

$$D(x) := Dimax(x) + Dimax_i(x)$$

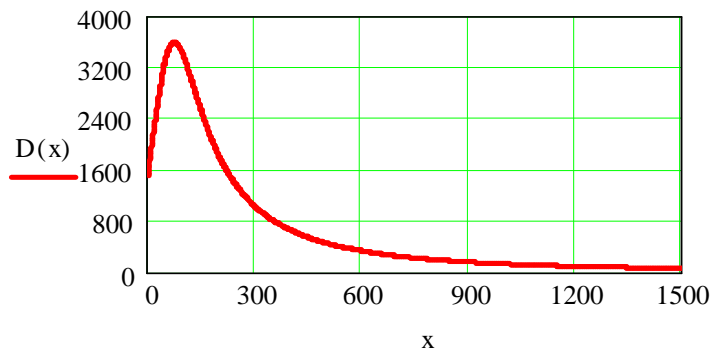


Рис. 3.51. Токсодоза на оси облака (в направлении по ветру) при выбросе 30 т аммиака за всю аварию

По значению смертельной токсодозы для аммиака 150 мг·мин/л определяем протяженность зон порогового и смертельного поражения:

$$\text{Пороговая токсодоза } D(3275) = 15 \quad (\text{мг мин/л})$$

$$\text{Смертельная токсодоза } D(945.8) = 149.985 \quad (\text{мг мин/л})$$

Ниже представлены зависимости вероятности поражения аммиаком от времени экспозиции на различных расстояниях от места аварии, а также зависимости территориального и индивидуального рисков поражения аммиаком (с вероятностью выброса аммиака в атмосферу  $P_a = 3,7 \cdot 10^{-3}$ , вероятностью нахождения человека в данной точке пространства  $P_n = 0,225$  и с условной вероятностью смертельного результата  $P_{sk} = 0,35$ ).

Вероятность поражения аммиаком:

$$x := 0.. 250 \quad \tau := 1.. 60$$

$$C(x) := C_{\text{imax}}(x) + C_{\text{imaxi}}(x) \quad C_{\text{ppm}}(x) := C(x) \cdot \frac{(273.15 + T_p)}{12.187 \cdot \mu}$$

$$Pr(\tau, x) := -35.9 + 1.85 \cdot \ln(C_{\text{ppm}}(x)^2 \cdot \tau)$$

$$P_{\text{por}}(\tau, x) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr(\tau, x)-5} \exp\left(\frac{-t^2}{2}\right) dt$$

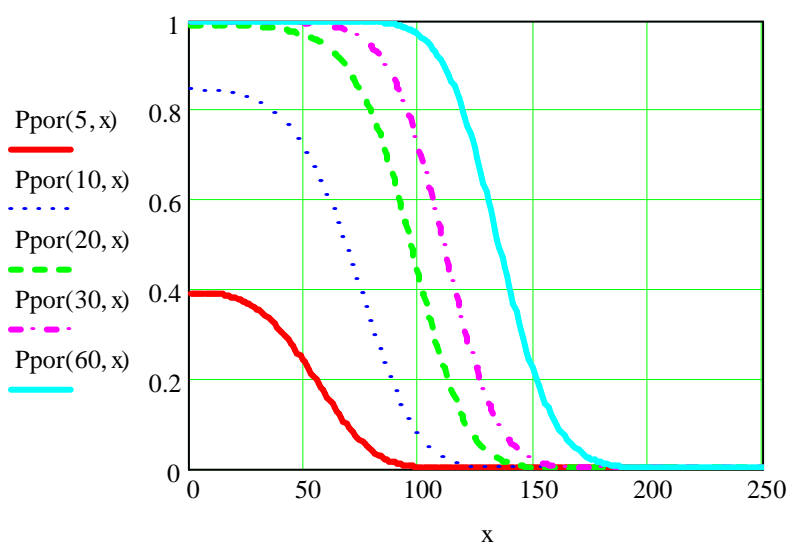


Рис.3.52. Вероятность поражения аммиаком (30т) на различных расстояниях и времени экспозиции (5, 10, 20, 30, 60 мин.).

$$R_t(\tau, x) := P_{\text{por}}(\tau, x) \cdot P_{\text{ск}} \cdot P_a \quad R_i(\tau, x) := R_t(\tau, x) \cdot P_n$$

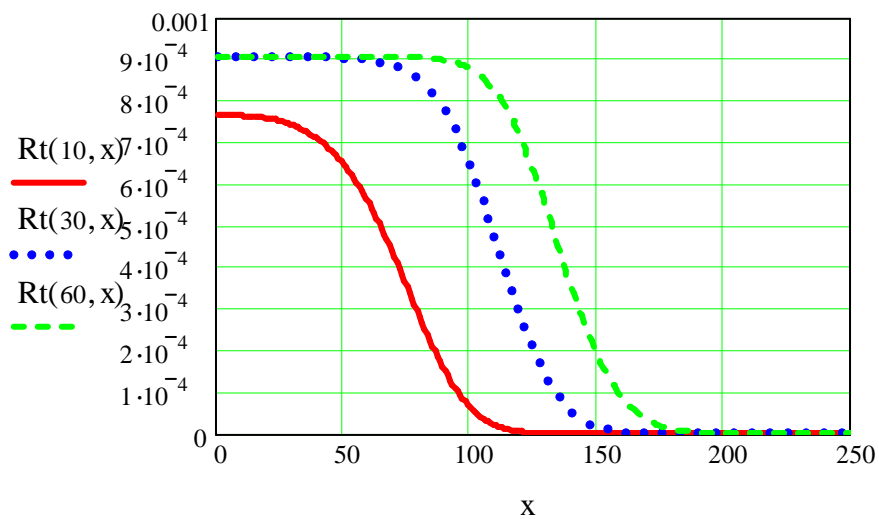


Рис.3.53. Зависимости территориального риска от расстояния при различном времени экспозиции

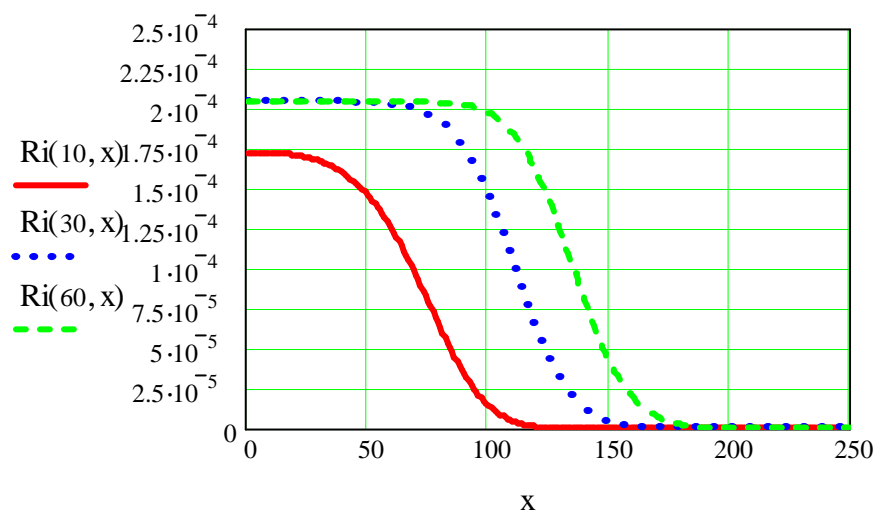


Рис.3.54. Зависимости индивидуального риска от расстояния при различном времени экспозиции

Концентрация при прохождении вторичного облака, образующегося при испарении ОХВ из пролива:

$$t := 800..1200 \quad x := 1000 \quad y := 0 \quad z := 0$$

$$\sigma_x(x) := \frac{c_3 \cdot x}{\sqrt{1 + 0.0001 \cdot x}} \quad \sigma_{xx}(x) := \frac{220.2 \cdot 60 + \frac{x}{U}}{220.2 \cdot 60 + 600} \cdot \sigma_x(x)$$

$$g(x) := \frac{a1 \cdot x^{b1}}{1 + a2 \cdot x^{b2}} \quad \sigma_y(x) := \begin{cases} \sigma_x(x) & \text{if } \frac{x}{U} < 600 \\ \sigma_{xx}(x) & \text{if } \frac{x}{U} \geq 600 \end{cases}$$

$$f(x) := \begin{cases} \ln[c1 \cdot x^{d1} \cdot (1 + c2 \cdot x^{d2})] & \text{if } z0 < 0.1 \\ \ln\left[c1 \cdot \frac{x^{d1}}{(1 + c2 \cdot x^{d2})}\right] & \text{if } z0 \geq 0.1 \end{cases} \quad \sigma_z(x) := f(x) \cdot g(x)$$

$$G_n(x) := \exp\left(\frac{-y^2}{2 \cdot \sigma_y(x)^2}\right) \cdot \left[ \exp\left[\frac{-(z-h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z+h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] \right]$$

$$G_{3x}(t) := \exp\left[\frac{-(x-U \cdot t)^2}{2 \cdot \sigma_x(x)^2} - \frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x)^2}\right] \cdot \left[ \exp\left[\frac{-(z-h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z+h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] \right]$$

$$C_{ix}(t) := \begin{cases} 0 & \text{if } t \leq 0 \\ \left( \frac{q_{3i} \cdot 10^3}{2 \cdot \frac{q_{3i}}{\rho_{3i}} + 2 \cdot \pi \cdot U \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot G_n(x) \right) & \text{if } x \leq x_{grti} \\ 0 & \text{if } t \geq \frac{x}{U} \\ \left[ \frac{q_{3i} \cdot t_{3i} \cdot 10^3}{2 \cdot q_{3i} \cdot \frac{t_{3i}}{\rho_{3i}} + (2 \cdot \pi)^2 \cdot \sigma_x(x) \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot G_{3x}(t) \right] & \text{if } x \geq x_{grti} \end{cases}$$

$$x := 1000 \quad y := 50 \quad z := 0$$

$$G_{3y}(t) := \exp\left[\frac{-(x-U \cdot t)^2}{2 \cdot \sigma_x(x)^2} - \frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x)^2}\right] \cdot \left[ \exp\left[\frac{-(z-h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z+h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2}\right] \right]$$

$$C_{iiy}(t) := \begin{cases} 0 & \text{if } t \leq 0 \\ \left( \frac{q_{3i} \cdot 10^3}{2 \cdot \frac{q_{3i}}{\rho_{3i}} + 2 \cdot \pi \cdot U \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot G_n(x) \right) & \text{if } x \leq x_{grti} \\ 0 & \text{if } t \geq \frac{x}{U} \\ \left[ \frac{q_{3i} \cdot t_{3i} \cdot 10^3}{2 \cdot q_{3i} \cdot \frac{t_{3i}}{\rho_{3i}} + (2 \cdot \pi)^{\frac{3}{2}} \cdot \sigma_x(x) \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot G_{3y}(t) \right] & \text{if } x \geq x_{grti} \end{cases}$$

$$x := 1000 \quad y := 50 \quad z := 20$$

$$G_{3z}(t) := \exp \left[ \frac{-(x - U \cdot t)^2}{2 \cdot \sigma_x(x)^2} - \frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y(x)^2} \right] \cdot \left[ \exp \left[ \frac{-(z - h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2} \right] + \exp \left[ \frac{-(z + h)^2}{2 \cdot \sigma_z(x)^2} \right] \right]$$

$$C_{iiz}(t) := \begin{cases} 0 & \text{if } t \leq 0 \\ \left( \frac{q_{3i} \cdot 10^3}{2 \cdot \frac{q_{3i}}{\rho_{3i}} + 2 \cdot \pi \cdot U \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot G_n(x) \right) & \text{if } x \leq x_{grti} \\ 0 & \text{if } t \geq \frac{x}{U} \\ \left[ \frac{q_{3i} \cdot t_{3i} \cdot 10^3}{2 \cdot q_{3i} \cdot \frac{t_{3i}}{\rho_{3i}} + (2 \cdot \pi)^{\frac{3}{2}} \cdot \sigma_x(x) \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot G_{3z}(t) \right] & \text{if } x \geq x_{grti} \end{cases}$$

Суммарные концентрации:

$$C_x(t) := C_{ix}(t) + C_{iix}(t) \quad C_y(t) := C_{iy}(t) + C_{iyy}(t) \quad C_z(t) := C_{iz}(t) + C_{iiz}(t)$$

Ниже представлены зависимости концентрации в точке (1000,0,0) от времени  $t$  в первичном, вторичном облаке и суммарная при выбросе 30 т аммиака.

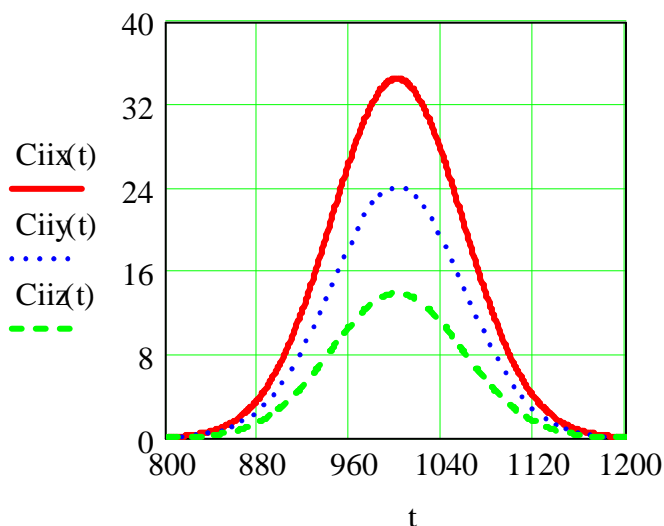
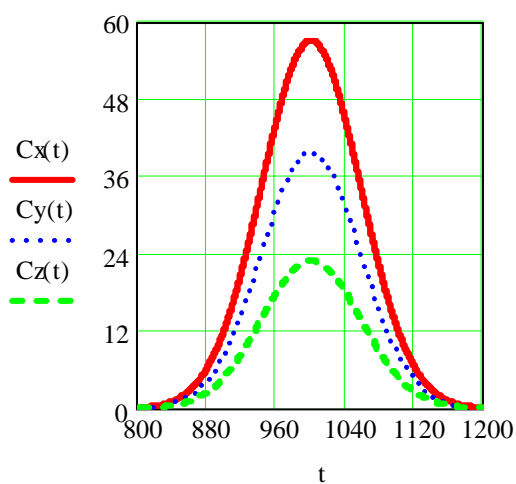
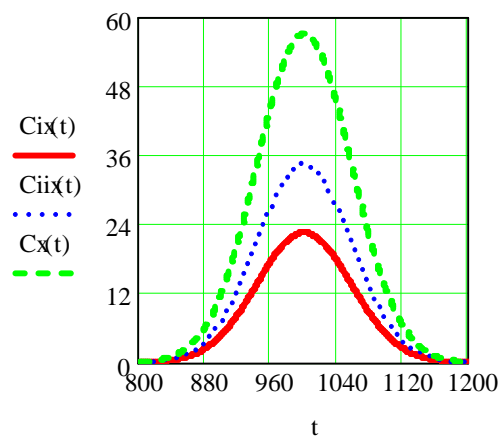


Рис.3.55. Зависимости концентрации в точках  $(1000,0,0)$ ,  $(1000,50,0)$ ,  $(1000,50,20)$  от времени  $t$  при выбросе 30 т аммиака при прохождении вторичного облака.



а)



б)

Рис.3.56. Суммарные зависимости концентраций в точках  $(1000,0,0)$ ,  $(1000,50,0)$ ,  $(1000,50,20)$  от времени  $t$  при выбросе 30 т аммиака а) и б) зависимость концентрации в точке  $(1000,0,0)$  от времени  $t$  в первичном, вторичном облаке и суммарная при выбросе 30 т аммиака.

### **3.9. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий**

В мероприятиях, связанных с охраной окружающей среды, особое место занимает защита атмосферного воздуха от загрязнений. На основе научных и проектных проработок для каждого предприятия регламентирован допустимый выброс загрязняющих веществ. За превышение допустимых выбросов загрязняющих веществ и аварийное загрязнение окружающей среды с объединений, предприятий и организаций предусмотрено взимание повышенной платы. Установление обоснованных нормативов платы за природные ресурсы, а также нормативов оплаты за выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду требует обоснованного подхода к определению и распределению количеств выделяющихся вредных веществ от технологического оборудования, трубопроводов и транспорта.

В атмосферном воздухе под действием внешних и внутренних факторов постоянно протекают гидродинамические, тепловые, электромагнитные, химические и фотохимические процессы, от которых зависят температура, давление, скорость перемещения и химический состав воздуха.

Атмосферный воздух никогда не бывает абсолютно чистым. Общее количество загрязнений, находящихся постоянно в атмосферном воздухе над планетой, составляет примерно несколько десятков миллионов тонн, что обусловлено как производственной деятельностью человека, так и естественными процессами, протекающими в природе. Естественное загрязнение атмосферы происходит в результате пыльных бурь, вулканической деятельности, лесных пожаров и т.п.

Искусственное загрязнение атмосферы происходит в результате практической деятельности человека. До 70% всех загрязнений приходится на долю автомобильного транспорта. Автомобильные выхлопные газы представляют собой смесь примерно 200 веществ. Практически во всех отраслях промышленности имеются выбросы вредных веществ в

атмосферный воздух. В атмосферу попадают аэрозольные частицы, газообразные вещества и пары (оксиды углерода, серы, азота, сероводород, сероуглерод, углеводороды, кислоты, щелочи, нитриты, нитраты, соединения свинца, железа, фтора, неприятно пахнущие вещества, радиоактивные вещества и др).

Атмосферные загрязнения не имеют границ. Например, известно, что пыль может переноситься на расстояние более 6000 км, дальность распространения выбросов промышленных предприятий достигает сотен километров.

Искусственное загрязнение воздушного бассейна существенно изменяет природный состав атмосферного воздуха. В результате загрязнения атмосферы изменяются климатические и микроклиматические условия и, как следствие этого, происходит увеличение средней температуры воздуха, уменьшения видимости, увеличением осадков и облачности, изменением циркуляции воздуха.

### **3.9.1. Рассеивание вредных веществ в атмосферном воздухе**

В настоящее время единственным документом по расчетам рассеивания является "Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий ОНД 86 /63/", которая охватывает как расчеты рассеивания за пределами зоны аэродинамической тени промышленной площадки, так и в пределах зоны аэродинамической промплощадки.

При расчетах рассеивания вредных веществ в атмосферном воздухе соблюдаются следующие общие положения.

1. Для определения опасности загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха выбросами вредных веществ рассчитывают наибольшую концентрацию этих веществ в расчетной точке (на промышленной площадке или в жилом районе), соответствующей наиболее неблагоприятным метеорологическим условиям (когда скорость ветра достигает опасного



значения  $U_m$  и наблюдается интенсивный вертикальный турбулентный обмен).

2. Наибольшая допустимая концентрация  $C$  каждого вредного вещества в расчетной точке приземного слоя атмосферы на промышленной площадке в местах организованного и неорганизованного воздухозабора системами вентиляции и кондиционированного воздуха определяется по формуле, мг/м<sup>3</sup>:

$$C \leq 0.8 \cdot \text{ПДК}_{\text{р.з.}};$$

в населенных местах – по формуле:

$$C \leq \text{ПДК}_{\text{н.м.}},$$

где  $\text{ПДК}_{\text{р.з.}}$  – предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны;

$\text{ПДК}_{\text{н.м.}}$  – предельно допустимая концентрация в воздухе для населенных мест.

Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны ( $\text{ПДК}_{\text{р.з.}}$ ) – это концентрации, которые при ежедневной (кроме выходных дней) работе в продолжении 8 часов или при другой длительности, но не превышающей 41 часа в неделю, в течение всего рабочего стажа, не могут вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего или будущего поколений.

Предельно допустимая концентрация вредных веществ в воздухе для населенных мест ( $\text{ПДК}_{\text{н.м.}}$ ) – максимальные концентрации, отнесенные к определенному периоду усреднения (30 мин, 24ч, 1 месяц, 1 год) и не оказывающие при регламентированной вероятности их появления ни прямого, ни вредного косвенного воздействия на организм человека, включая отдаленные последствия для настоящего и последующих поколений, не снижающих работоспособности человека и не ухудшающие его самочувствия.

3. В приведенных формулах используются максимальные часовые количества вредных веществ. Разовые концентрации, найденные из проб, взятых в течение 20 минут, пересчитывают в часовые.
4. Приземные максимальные концентрации вредных веществ на территории санитарных охранных зон курортов, в местах размещения крупных санаториев и домов отдыха, зонах отдыха, городов с населением более 200 тыс. человек не должны превышать  $0,8 \cdot \text{ПДК}$ .
5. Если при выбросах в атмосферу вредные вещества полностью или частично превращаются в более токсичные, то в расчетах необходимо учитывать образовавшиеся вещества.
6. Нормы предназначены для расчета приземных концентраций в двухметровом слое над поверхностью земли, а также вертикального распределения концентраций.
7. При одновременном присутствии в атмосфере нескольких ( $n$ ) вредных веществ, обладающих суммирующим действием, для каждой группы указанных вредных веществ вредного однонаправленного действия рассчитывается безразмерная суммарная концентрация  $q$ , которая не должна превышать 1:

$$q = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \leq 1, \quad (3.113)$$

где  $C_1, C_2, \dots, C_n$  – концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе в одной и той же точке местности,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $\text{ПДК}_1, \text{ПДК}_2, \dots, \text{ПДК}_n$  – соответствующие максимальные разовые предельно допустимые концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе,  $\text{мг}/\text{м}^3$ .

К вредным веществам однонаправленного действия, как правило, относят вещества близкие по химическому строению и характеру биологического воздействия на организм человека.

8. В зависимости от высоты  $H$  устья источника выброса вредного вещества над уровнем земной поверхности указанный источник относится к одному из следующих четырех классов: 1) высокие источники,  $H \geq 50\text{м}$ ; 2) источники

средней высоты,  $H = 10 \dots 50 \text{ м}$ ; 3) низкие источники,  $H = 2 \dots 10 \text{ м}$ ; 4) наземные источники,  $H \leq 2 \text{ м}$ .

Газы, выбрасываемые из трубы в атмосферу, поднимаются над верхним срезом трубы. Подъем газов обеспечивается направленной вверх скоростью, а также подъемом теплых газов, выпускаемых в более холодный окружающий воздух. Высота подъема газов зависит от турбулентности, возрастающей с увеличением скорости протекания газа в трубе, от плотности газа, уменьшающейся с ростом температуры, а также от горизонтального движения ветра, уменьшающего действие вертикальной скорости и эффекта подъема.

Примесь, выброшенная в атмосферу из источников, рассеивается и переносится в воздухе постоянно существующими в атмосфере турбулентными вихрями разных масштабов. Интенсивность атмосферной турбулентности и, следовательно, интенсивность диффузии примеси в разных погодных условиях различны и определяются главным образом двумя факторами: вектором скорости ветра и вертикальным температурным градиентом.

Температурный градиент, характеризующий изменение температуры воздуха по вертикали, определяется степенью нагретости поверхности земли и прилегающего к ней слоя воздуха. Чем сильнее нагрета земля, тем интенсивнее вертикальное перемещение воздуха. Если нагретый воздух расширяется адиабатически (без обмена теплом с окружающими массами воздуха), то температура его повышается  $\approx 1^\circ \text{C}$  на 100 м, и воздух обладает теми же свойствами, что и окружающие массы воздуха и, следовательно, не будет иметь дополнительного ускорения. Такое состояние атмосферы называется нейтральным.

Если температура окружающего воздуха понижается с высотой так, что ее вертикальный градиент больше адиабатического (что бывает при сильно нагретой солнцем поверхности земли), то движущийся снизу объем воздуха получает ускорение. Нагретые конвекционные струи поднимаются вверх, а

взамен их вниз опускаются холодные струи воздуха. Такие условия называются неустойчивыми конвективными.

Если вертикальный градиент температуры воздуха близок к нулю или становится отрицательным, т.е. температура с высотой возрастает, то вертикально поднимающийся объем воздуха оказывается холоднее окружающих масс, и его движение затухает. Такие условия называются устойчивыми инверсионными.

Для количественного выражения состояния устойчивости атмосферы обычно используют соотношение вертикального градиента температуры и скорости ветра, либо в виде безразмерного критерия устойчивости Ричардсона, либо в виде удобных эмпирических его аналогов, например, практический критерий стратификации А. Кроме того, состояние атмосферы характеризуется такими показателями: неустойчивость – очень сильная, умеренная, слабая; безразличное состояние; устойчивость – слабая, умеренная, сильная. Рассеяние примеси в условиях каждого класса устойчивости атмосферы имеет свои особенности, формирующие характерный вид дымовой струи. Наиболее неблагоприятна в гигиеническом отношении задымляющая форма струи, при которой падение температуры воздуха обычно начинается вблизи земли и распространяется на некоторую высоту (зимой – сильнее, летом – слабее). В этих условиях выбрасывание из трубы вещества в большой концентрации тепловыми вихрями приносятся к земле вдоль всей струи. Задымляющая струя дает наиболее значительную среднюю наземную концентрацию вредных веществ и она принята за расчетную как наиболее неблагоприятная и дающая наибольшую приземную концентрацию.

**Роль особенностей рельефа.** Под влиянием неровностей рельефа изменяется турбулентный режим воздушных потоков и, следовательно, характер рассеяния, а также поле концентраций примеси вблизи земли; в сложных формах рельефа возникает местная циркуляция воздуха,

образуются восходящие и нисходящие потоки, особым образом изменяется направление ветра.

Для учета влияния рельефа и водоемов на значения концентраций, вычисленных для условия ровного места, вводят безразмерный коэффициент  $\eta$ , который принимается равным 1, если в радиусе 50 высот труб от источника перепад отметок местности не превышает 50 м на 1 км. В других случаях поправку на рельеф устанавливают на основе картографического материала, освещающего рельеф местности в радиусе 50 высот труб от источника, но не менее 2 км.

Если в окрестности рассматриваемого источника выбросов (предприятия) можно выделить отдельные изолированные препятствия, вытянутые в одном направлении (гряды, гребень, ложбина, уступ), то коэффициент  $\eta$  принимают по формуле:

$$\eta = 1 + \varphi_1 \cdot \frac{|x_0|}{a_0} \cdot (\eta_m - 1), \quad (3.114)$$

где  $x_0$  – расстояние от середины препятствия в случае гряды или ложбины и от верхней кромки склона в случае уступа до источника;  $a_0$  – полуширина гряды, гребня, ложбины или протяженность бокового склона уступа;  $\eta_m$  – определяется по таблице /63/ в зависимости от рельефа местности; значение функции  $\varphi_1$  определяется в зависимости от отношения  $|x_0|/a_0$  по графикам, соответствующим различным формам рельефа.

Ориентировочно поправку на рельеф можно определить, исходя из следующих соображений:

при уклонах до  $0,1 - 0,15^\circ$  и перепадах до 100 м поправка составляет 1,3 – 1,5;

при расположении предприятия вблизи горной гряды с уклонами местности  $0,15 - 0,25^\circ$  поправка равна 2;

если предприятие расположено в котловине или ущелье глубиной 100-200 м с уклоном  $0,2 - 0,3^\circ$  и более поправка на рельеф равна 3.

### 3.9.2. Расчет загрязнения атмосферы выбросами одиночного источника

Максимальное значение приземной концентрации вредного вещества  $C_m$  (мг/м<sup>3</sup>) при выбросе газовой смеси из одиночного точечного источника достигается при неблагоприятных метеорологических условиях на расстоянии  $x_m$  (м) от источника и определяется по формуле:

$$C_m = \begin{cases} \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}}, & \text{горячие выбросы} \\ \frac{A \cdot M \cdot F \cdot n \cdot \eta}{H^{\frac{4}{3}}} \cdot K, & \text{холодные выбросы,} \end{cases} \quad (3.115)$$

где  $A$  - коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы для неблагоприятных условий;  $M$  (г/с) - количество вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени в соответствии с нормативными документами;  $F$  - безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе. Величина безразмерного коэффициента  $F$ : 1) для газообразных вредных веществ (сернистого газа, сероуглерода и т. п.) и мелкодисперсных аэрозолей (пыли, золы и т.п., скорость упорядоченного оседания которых практически равна нулю) - **1**; 2) для пыли и золы, если средний эксплуатационный коэффициент очистки равен не менее 90% - **2**; 3) до 90% - **2,5**; менее 75% - **3**;  $m, n$  - коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса;  $H$  (м) - высота источника выброса над уровнем земли (для наземных источников при расчетах принимается  $H=2$  м);  $\eta$  - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км,  $\eta=1$ ;  $\Delta T$  - разность между температурой выбрасываемой газовой смеси  $T_r$  и температурой окружающего атмосферного воздуха  $T_b, ^\circ\text{C}$  (берется равной средней максимальной температуре наружного воздуха наиболее жаркого месяца); горячими

считаются выбросы, если величина  $\Delta T > 0$ ; холодными выбросами считаются выбросы, если разность температур  $\Delta T \cong 0$ , у таких выбросов температура газа не оказывает существенного влияния на подъем и рассеивание вредных веществ в атмосфере;  $V_1$  – расход газовой смеси, определяемый по формулам, м<sup>3</sup>/с:

$$V_1 = \begin{cases} \frac{\pi D^2}{4} \cdot \omega_0, & \text{для круглого устья} \\ L \cdot B \cdot \omega_0, & \text{для источника с прямоугольным устьем,} \end{cases} \quad (3.116)$$

где  $D$  – диаметр устья источника выброса, м;  $\omega_0$  – средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника выброса, м/с;  $L$  – длина устья, м;  $B$  – ширина устья, м; Эффективный диаметр источника с прямоугольным устьем определяется как:

$$D_3 = \frac{2 \cdot L \cdot B}{L + B} \quad \text{или} \quad D_3 = \frac{2 \cdot L \cdot V_1}{L^2 \cdot \omega_0 + V_1};$$

$$K = \frac{D}{8 \cdot V_1} = \frac{1}{7,1 \cdot \sqrt{\omega_0 \cdot V_1}}.$$

Значение коэффициента  $A$ , зависящее от температурной стратификации атмосферы и определяющий условия вертикального и горизонтального рассеивания вредных веществ в атмосферном воздухе для неблагоприятных условий, при которых концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе достигают максимального значения: для субтропической зоны - 240; для Казахстана, Нижнего Поволжья, Кавказа, Молдавии, Сибири, Дальнего Востока и остальных районов Средней Азии - 200; для севера, Северозапада европейской территории СНГ, среднего Поволжья, Урала, Украины (для расположенных на Украине источников высотой менее 200 м в зоне от 50 до 52° с.ш. – 180, а южнее 50° с.ш. – 200) - 160; для Центральной части европейской территории - 140.

Значения мощности выброса  $M$  и расхода газовой смеси  $V_1$  при проектировании предприятий определяются расчетом в технологической части проекта или принимаются в соответствии с действующими для данного производства (процесса) нормативами. В расчете принимаются

сочетания  $M$  и  $V_1$ , реально имеющие место в течении года при установленных (обычных) условиях эксплуатации предприятия, при которых достигается максимальное значение  $C_m$ .

Значения коэффициентов  $m$  и  $n$  определяются в зависимости от параметров  $f$  и  $v_m$ :

$$v_m = \begin{cases} 0.65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \Delta T}{H}}, & \text{горячие выбросы} \\ 11.3 \cdot \frac{\omega_0 \cdot D}{H}, & \text{холодные выбросы} \end{cases}; \quad f = \begin{cases} 10^3 \cdot \frac{\omega_0^2 \cdot D}{H^2 \cdot \Delta T} \\ 800 \cdot v_m^3 \end{cases} \quad (3.117)$$

Коэффициент  $m$  определяется в зависимости от значения  $f$  по формулам:

$$m = \begin{cases} \frac{1}{0.67 + 0.1 \cdot \sqrt{f} + 0.34 \cdot \sqrt[3]{f}}, & \text{если } f < 100 \\ \frac{1.47}{\sqrt[3]{f}}, & \text{если } f \geq 100 \text{ или } \Delta T \approx 0 \end{cases} \quad (3.118)$$

Коэффициент  $n$  в зависимости от  $v_m$  определяется по формулам:

$$n = \begin{cases} 3, & \text{если } v_m \leq 0.3 \\ \left(3 - \sqrt{(v_m - 0.3) \cdot (4.36 - v_m)}\right), & \text{если } 0.3 < v_m \leq 2 \\ 1, & \text{если } v_m > 2 \end{cases} \quad (3.119)$$

В случае предельно малых опасных скоростей ветра расчет  $C_m$  производят по формуле:

$$C_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m' \cdot \eta}{H^{\frac{7}{3}}}, \quad (3.120)$$

где

$$m' = \begin{cases} 2.86 \cdot m, & f < 100, v_m < 0.5 \\ 0.9, & f \geq 100, v_m < 0.5 \end{cases}$$

Расстояние  $X_m$  от источника выбросов, на котором приземная концентрация при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения  $C_m$ , определяется по формулам:



$$X_m = \begin{cases} d \cdot H, & \text{если } F < 2 \\ \frac{5-F}{4} \cdot d \cdot H, & \text{если } F > 2, \end{cases} \quad (3.121)$$

где безразмерный коэффициент  $d$  находится по формулам:

$$d = \begin{cases} 2,48 \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f}), v_m \leq 0,5, f < 100 \\ 4,95 \cdot v_m \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f}), 0,5 < v_m \leq 2, f < 100 \\ 7 \cdot \sqrt{v_m} \cdot (1 + 0,28 \cdot \sqrt[3]{f}), v_m > 2, f < 100 \\ 5,7, v_m \leq 0,5, f > 100 \\ 11,4 \cdot v_m, 0,5 < v_m \leq 2, f > 100 \\ 16 \cdot \sqrt{v_m}, v_m > 2, f > 100 \end{cases} \quad (3.122)$$

Значение опасной скорости  $u_m$  на уровне флюгера (10 м от уровня земли), при которой достигается наибольшее значение приземной концентрации вредных веществ  $C_m$ , определяется по формулам:

$$u_m = \begin{cases} 0,5, \text{при } v_m \leq 0,5 \text{ и } f < 100 \\ v_m, \text{при } 0,5 < v_m \leq 2 \text{ и } f < 100 \\ v_m \cdot (1 + 0,12 \cdot \sqrt{f}), \text{при } v_m > 2 \text{ и } f < 100 \\ 0,5, \text{при } v_m \leq 0,5 \text{ и } f \geq 100 \\ v_m, \text{при } 0,5 < v_m \leq 2 \text{ и } f \geq 100 \\ 2,2 \cdot v_m, \text{при } v_m > 2 \text{ и } f \geq 100 \end{cases} \quad (3.123)$$

Максимальное значение приземной концентрации вредного вещества  $C_{\text{му}}$  ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) при неблагоприятных метеорологических условиях и скорости ветра  $u$  ( $\text{м}/\text{с}$ ), определяется по формуле:

$$C_{\text{му}} = r \cdot C_m, \quad (3.124)$$

где  $r$  – безразмерная величина, определяемая в зависимости от отношения  $u/u_m$ , по формулам:

$$r = \begin{cases} 0,67 \cdot \left(\frac{u}{u_m}\right) + 1,67 \cdot \left(\frac{u}{u_m}\right)^2 - 1,34 \cdot \left(\frac{u}{u_m}\right)^3, & \text{при } \frac{u}{u_m} \leq 1 \\ \frac{3 \cdot \left(\frac{u}{u_m}\right)}{2 \cdot \left(\frac{u}{u_m}\right)^2 - \left(\frac{u}{u_m}\right) + 2}, & \text{при } \frac{u}{u_m} > 1 \end{cases} \quad (3.125)$$

Расстояние от источника выброса  $X_{mu}$  (м), на котором при скорости ветра  $u$  и неблагоприятных метеорологических условиях приземная концентрация вредных веществ достигает максимального значения  $C_{mu}$ , определяется по формуле:

$$X_{mu} = p \cdot X_m, \quad (3.126)$$

где  $p$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения  $u/u_m$  по формулам:

$$p = \begin{cases} 3, & \text{при } \frac{u}{u_m} \leq 0,25 \\ 8,43 \cdot \left(1 - \frac{u}{u_m}\right)^5 + 1, & \text{при } 0,25 < \frac{u}{u_m} \leq 1 \\ 0,32 \cdot \left(\frac{u}{u_m}\right) + 0,68, & \text{при } \frac{u}{u_m} > 1 \end{cases} \quad (3.127)$$

При опасной скорости ветра  $u_m$  приземная концентрация вредных веществ  $C$  в атмосфере по оси факела выброса на различных расстояниях  $X$  от источника выброса определяется как:

$$C = S_1 \cdot C_m, \quad (3.128)$$

где  $S_1$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения  $X/X_m$  и коэффициента  $F$  по формулам:

$$S_1 = \begin{cases} 3 \cdot (x/x_m)^4 - 8 \cdot (x/x_m)^3 + 6 \cdot (x/x_m)^2, & \text{при } x/x_m \leq 1 \\ \frac{1}{0,13 \cdot (x/x_m)^2 + 1}, & \text{при } 1 < x/x_m \leq 8 \\ \frac{x/x_m}{3,58 \cdot (x/x_m)^2 - 35,2 \cdot (x/x_m) + 120}, & \text{при } F \leq 1,5 \text{ и } x/x_m > 8 \\ \frac{1}{0,1 \cdot (x/x_m)^2 + 2,47 \cdot (x/x_m) - 17,8}, & \text{при } F > 1,5 \text{ и } x/x_m > 8 \end{cases} \quad (3.129)$$

Для низких и наземных источников (высотой  $H$  не более 10 м) при значениях  $x/x_m < 1$  величина  $S_1$  заменяется на величину  $S_1^H$ , определяемую в зависимости от  $X/X_m$  и  $H$  по формуле:

$$S_1^H = 0,125 \cdot (10 - H) + 0,125 \cdot (H - 2) \cdot S_1, \text{ при } 2 \leq H < 10.$$

Искомые значения концентраций вредного вещества определяются путем умножения  $C_{\text{му}}$  на  $S_1$ .

Значение приземной концентрации вредных веществ в атмосфере  $C_y$  ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) на расстоянии  $y$  (м) по перпендикуляру к оси факела выброса определяется по формуле:

$$C_y = S_2 C, \quad (3.130)$$

где  $S_2$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от скорости ветра  $u$  (м/с) и отношения  $y/x$  по значению аргумента  $t_y$ :

$$t_y = \begin{cases} \frac{u \cdot y^2}{x^2}, & u \leq 5; \\ \frac{5y^2}{x^2}, & u > 5 \end{cases} \quad (3.131)$$

по формуле 
$$S_2 = \frac{1}{(1 + 5 \cdot t_y + 12,8 \cdot t_y^2 + 17 \cdot t_y^3 + 45,1 \cdot t_y^4)^2}.$$

Максимальная концентрация,  $C_{\text{mx}}$ , достигающая на расстоянии  $x$  от источника выброса на оси факела при скорости ветра  $u_{\text{mx}}$ , определяется формулой

$$C_{\text{mx}} = S_1' \cdot C_m. \quad (3.132)$$

Скорость ветра  $u_{mx}$  при этом рассчитывается по формуле

$$u_{mx} = f_1 \cdot u_m, \quad (3.133)$$

где безразмерный коэффициент  $f_1$  определяется как

$$f_1 = \begin{cases} 1, & x/x_m \leq 1; \\ \frac{0,75 + 0,25 \cdot x/x_m}{1 + (x/9x_m)}, & 1 < x/x_m \leq 8; \\ 0,25, & 8 < x/x_m < 80; \\ 1,0, & x/x_m \geq 80 \end{cases} \quad (3.134)$$

Безразмерный коэффициент  $S_1'$  находится в зависимости от отношения  $x/x_m$ :

$$S_1' = \begin{cases} 3 \cdot (x/x_m)^4 - 8 \cdot (x/x_m)^3 + 6 \cdot (x/x_m)^2, & \text{при } x/x_m \leq 1 \\ \frac{1,1}{0,1 \cdot (x/x_m)^2 + 1}, & \text{при } 1 < x/x_m \leq 8 \\ \frac{2,55}{0,13 \cdot (x/x_m)^2 + 9}, & \text{при } 8 < x/x_m \leq 24 \\ \frac{x/x_m}{4,75 \cdot (x/x_m)^2 - 140 \cdot (x/x_m) + 1435}, & \text{при } F \leq 1,5 \text{ и } 24 < x/x_m \leq 80 \\ \frac{2,26}{0,1 \cdot (x/x_m)^2 - 7,41 \cdot (x/x_m) - 160}, & \text{при } F > 1,5 \text{ и } 24 < x/x_m \leq 80 \\ \frac{x/x_m}{3,58 \cdot (x/x_m)^2 - 35,2 \cdot (x/x_m) + 120}, & \text{при } F \leq 1,5 \text{ и } x/x_m > 80 \\ \frac{1}{0,1 \cdot (x/x_m)^2 + 2,47 \cdot (x/x_m) - 178}, & \text{при } F > 1,5 \text{ и } x/x_m > 80 \end{cases}$$

Если рассчитанная скорость ветра  $u_{mx} < 0,5$  или  $u_{mx} > u^*$  ( $u^*$  – значение скорости ветра, превышающее в данной местности в среднем многолетнем режиме в 5% случаев), то величина  $C_{mx}$  определяется как максимальное значение из концентраций на расстоянии  $x$ , рассчитанных при трех скоростях ветра:  $0,5$ ,  $u_m$ ,  $u^*$ ; соответствующая  $C_{mx}$  скорость ветра принимается за  $u_{mx}$ .

Расчеты распределения концентраций  $C_z$  на разных высотах  $z$  над подстилающей поверхностью при  $x < x_{mu}$  производят по формуле:

$$C_z = r \cdot C_m \cdot S_z \cdot S_2, \quad (3.135)$$

где коэффициент  $S_z$  определяется в зависимости от параметров  $b_1, b_2$

$$S_z = \begin{cases} S_1(b_1) \cdot \frac{[1 + 0,1(b_2 - 1)]}{[b_1^3 + 0,1(b_2 - 1)^2]} \cdot \left[ 1 + \frac{(b_2 + 0,2)(b_1^3 - 1)}{b_2 + (b_2 + 0,2)(1 + 0,1(b_2 - 1)^2)} \right], & b_1 \leq 1; \\ S_1(b_1), & b_1 > 1. \end{cases}$$

Здесь

$$b_1 = \frac{x}{x_{\text{му}}}; \quad b_2 = \frac{z}{(1 + 5d_2) \cdot H}; \quad d_2 = \begin{cases} 0,06 \cdot v_m \sqrt[3]{f/u} + 0,034(v_m/u)^3, & f < 100 \\ 0,28 \cdot v_m/u + 0,034(v_m/u)^3, & f \geq 100. \end{cases}$$

Решение обратных задач по определению мощности выброса  $M$  и высоты  $H$ , соответствующих заданному уровню максимальной приземной концентрации  $C_m$  при прочих фиксированных параметрах выброса, находится следующим образом.

Мощность выброса  $M$ , соответствующая заданному значению максимальной концентрации  $C_m$ , определяется как:

$$M = \begin{cases} \frac{C_m \cdot H^2}{A \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta} \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}, & f < 100 \\ \frac{C_m \cdot H^3}{A \cdot F \cdot n \cdot \eta} \cdot \frac{8V_1}{D}, & f \geq 100 \quad \text{или} \quad \Delta T \approx 0. \end{cases} \quad (3.136)$$

Высота источника, соответствующая заданному значению  $C_m$  в случае  $\Delta T \approx 0$  определяется по формуле

$$H = \left( \frac{A \cdot M \cdot F \cdot D \cdot \eta}{8 \cdot V_1 \cdot C_m} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (3.137)$$

Если вычисленному значению  $H$  соответствует  $v_m < 2\text{ м/с}$ , то  $H$  уточняется методом последовательных приближений по соотношению

$$H_{i+1} = H_i \cdot \left( \frac{n_i}{n_{i-1}} \right)^{\frac{3}{4}}, \quad (3.138)$$

где  $n_i$  и  $n_{i-1}$  - значения, определяемые по вышеприведенным формулам коэффициента  $n$ , полученные по значениям  $H_i$  и  $H_{i-1}$  (при  $i=1$  принимается  $n_0 = 1$ ).

Формулы для  $H$  используются также для определения  $H$  и при  $\Delta T > 0$ .

Если при этом выполняется условие  $H \leq \omega_0 \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot D}{\Delta T}}$ , то найденное значение

$H$  является точным. Если же  $H > \omega_0 \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot D}{\Delta T}}$ , то для определения

предварительного значения высоты  $H$  используется формула

$$H = \sqrt{\frac{A \cdot M \cdot F \cdot \eta}{C_m \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}}}. \quad (3.139)$$

По найденному значению  $H$  определяются  $f, v_m$  и устанавливаются в первом приближении произведение коэффициентов  $m$  и  $n$ . Дальнейшее уточнение значения  $H$  выполняется по формуле

$$H_{i+1} = H_i \cdot \sqrt{\frac{m_i \cdot n_i}{m_{i-1} \cdot n_{i-1}}}, \quad (3.140)$$

где при  $i=1$  принимается  $m_0 = n_0 = 1$ , а величина  $H_0$  определяется по вышеприведенной формуле.

Уточнение значения  $H$  производится до тех пор, пока два последовательных найденных значения  $H$  ( $H_i, H_{i+1}$ ) будут различаться менее чем на 1м.

При полной нагрузке оборудования средняя концентрация  $\bar{C}_m$  ( $\text{г/м}^3$ ) в устье источника, равная  $\bar{C}_m = \frac{M}{V_1}$ , определяется по формулам:

$$\bar{C}_m = \begin{cases} \frac{C_m \cdot H^2}{A \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta} \cdot \sqrt[3]{\frac{\Delta T}{V_1^2}} & \text{при } f < 100 \\ \frac{8 \cdot C_m \cdot H^4}{A \cdot F \cdot n \cdot D \cdot \eta} & \text{при } f \geq 100 \text{ или } \Delta T \approx 0, \end{cases} \quad (3.141)$$

где  $C_m$  ( $\text{мг/м}^3$ ) - соответствующая  $\bar{C}_m$  максимальная приземная концентрация.

При расчете рассеивания выбросов от линейного источника длиной  $L$  наибольшая концентрация вредной примеси  $C_m$  достигается в случае ветра вдоль источника на расстоянии  $x_m$  от проекции его центра на земную

поверхность. При рассмотрении аэрационного фонаря как линейного источника значения  $C_m$  и расстояния  $x_m$  определяются по формулам:

$$\begin{aligned} C_m &= S_3 \cdot C'_m; \\ x_m &= \frac{L}{2} + S_4 \cdot x'_m, \end{aligned} \quad (3.142)$$

где значения  $C'_m, x'_m$ , а также соответствующее им значение  $u'_m$  принимаются равными максимальной концентрации  $C_m$ , расстоянию  $x_m$  и опасной скорости  $u_m$  для одиночного источника той же мощности  $M$  с круглым устьем диаметром  $D_3$  и расходом выбрасываемой газовой смеси  $V_1$ .

Безразмерные коэффициенты  $S_3$  и  $S_4$  определяются по формулам:

$$\begin{aligned} S_3 &= \frac{1 + 0,45 \cdot L/x'_m}{1 + 0,45 \cdot L/x'_m + 0,1 \cdot (L/x'_m)^2}; \\ S_4 &= \frac{1}{1 + 0,6 \cdot L/x'_m}. \end{aligned} \quad (3.143)$$

Значение максимальной концентрации вредных веществ при ветре, направленном поперек линейного источника, определяется по формуле:

$$C_m = \epsilon_1 C'_m, \quad (3.144)$$

где

$$\epsilon_1 = \begin{cases} 0,923 \cdot \alpha, & \alpha \leq 0,255 \\ \frac{1,13 \cdot \alpha^2}{(\alpha + 0,3)^2}, & 0,255 < \alpha \leq 2,32 \\ \frac{\alpha^2}{(\alpha + 0,7)^2}, & \alpha > 2,32, \end{cases} \quad \text{где} \quad \alpha = \begin{cases} \frac{x'_m}{L \cdot \sqrt{u'_m}}, & u'_m \leq 5, \\ 45 \cdot \frac{x'_m}{L}, & u'_m > 5 \end{cases}$$

Расстояние от линейного источника  $x_m$ , на котором достигается максимальная приземная концентрация вредных веществ  $C_m$ , определяется по формуле

$$x_m = \epsilon_2 x'_m, \quad (3.145)$$

где

$$\epsilon_2 = \begin{cases} 3, & \alpha \leq 0,25, \\ \frac{1,5}{\sqrt{\alpha}}, & 0,25 < \alpha < 2,25, \\ 1, & \alpha > 2,25. \end{cases}$$

Распределение концентраций вредных веществ  $C$  на расстоянии  $x$  от центра линейного источника при ветре скоростью  $u$ , направленном поперек линейного источника, определяется по формуле:

$$C = S_1 \cdot S_6 \cdot r \cdot C'_m, \quad (3.146)$$

где безразмерный коэффициент  $S_6$  определяется как:

$$S_6 = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{x}{L}\right)^2 \cdot \frac{1}{u}}, & \left(\frac{x}{L}\right)^2 \cdot \frac{1}{u} < 0,5, \\ \frac{1}{1 + \frac{0,7}{\left(\frac{x}{L}\right)^2 \cdot \frac{1}{u}}}, & \left(\frac{x}{L}\right)^2 \cdot \frac{1}{u} \geq 0,5. \end{cases}$$

При расчетах начало координат располагается в центре линейного источника, ось  $x$  направлена вдоль, а ось  $y$  – перпендикулярно направлению ветра.

Концентрация вредных веществ  $C_y$  на расстоянии  $y$  от оси факела определяется по формуле:

$$C_y = \frac{r \cdot S_1}{2} \cdot \left[ \left(1 + \frac{2 \cdot y}{L}\right) \cdot S_6 + \left(1 - \frac{2 \cdot y}{L}\right) \cdot S_6 \right] \cdot C'_m \quad (3.147)$$

### 3.9.3. Расчет загрязнения атмосферы выбросами группы источников

Приземная концентрация вредных веществ  $C$  ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) в любой точке местности при наличии  $N$  источников определяется как сумма концентраций веществ от отдельных источников при заданных направлении и скорости ветра:

$$C = \sum_{i=1}^N C_i, \quad (3.148)$$



где  $C_i$  – концентрации вредного вещества соответственно от первого, второго, N-го источников, расположенных с наветренной стороны при рассматриваемом направлении ветра.

Когда известно, что имеются неучтенные (фоновые) источники выброса того же вредного вещества или веществ, обладающих с ним суммирующим эффектом (другие предприятия города, промрайона, транспорт, отопление и т.п.), в правой части добавляется слагаемое  $C_\phi$ , характеризующее фоновое загрязнение от неучтенных источников.

Если рассчитанная концентрация  $C$  удовлетворяет неравенству  $C > 0,1 \cdot q_0$ , где

$$q_0 = \frac{10^3 \sum_{i=1}^N M_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^N V_{li} \cdot C_i},$$

а  $M_i, V_{li}$  – мощность выброса и расход газовой смеси i-го источника, то при расчете приземной концентрации используется формула:

$$C = \frac{q_0 \sum_{i=1}^N C_i}{q_0 + \sum_{i=1}^N C_i}. \quad (3.149)$$

В случае использования алгоритма объединения группы из N точечных источников значения  $C_m = C_{mo}, x_m = x_{mo}, u_m = u_{mo}$ , а также координаты размещения  $x_u = x_{uo}, y_u = y_{uo}$  для условного источника, заменяющего объединяемую группу, определяются по формулам:

$$\begin{aligned} C_{mo} &= \sum_{i=1}^N C_{mi}; x_{mo} = \frac{1}{C_{mo}} \cdot \sum_{i=1}^N C_{mi} \cdot x_{mi}; u_{mo} = \frac{1}{C_{mo}} \cdot \sum_{i=1}^N C_{mi} \cdot u_{mi}; \\ x_{uo} &= \frac{1}{C_{mo}} \cdot \sum_{i=1}^N C_{mi} \cdot x_{ui}; y_{uo} = \frac{1}{C_{mo}} \cdot \sum_{i=1}^N C_{mi} y_{ui}, \end{aligned} \quad (3.150)$$

где индексом i обозначены отдельные источники, объединяемые в группу.

Если рассматриваются мелкие источники, для каждого из которых выполняется хотя бы одно из условий:

$$\frac{C_m}{\text{ПДК}} \leq 0,2; \quad \frac{C_m x_m}{\text{ПДК}} \leq 120,$$

то объединение таких источников осуществляется при одновременном выполнении условий:

$$L_m \leq 0,15 \cdot l_{\min}, \quad \frac{\Delta x_m}{x_{\text{мо}}} \leq 0,3, \quad \frac{\Delta u_m}{u_{\text{мо}}} \leq 0,3,$$

где  $l_{\min}$  (м) – минимальное расстояние от объединяемых источников до узлов расчетной сетки точек;  $L_m$  (м) – максимальное расстояние между двумя из объединяемых источников;  $\Delta x_m$  (м),  $\Delta u_m$  (м/с) – соответственно максимальные отклонения величин  $x_{\text{mi}}$  от  $x_{\text{мо}}$  и  $u_{\text{mi}}$  от  $u_{\text{мо}}$ .

Если условия  $\frac{C_m}{\text{ПДК}} \leq 0,2; \quad \frac{C_m x_m}{\text{ПДК}} \leq 120$  одновременно не выполнены, то

объединение таких источников осуществляется при одновременном выполнении условий:

$$L_m \leq 0,06 \cdot l_{\min}, \quad \frac{\Delta x_m}{x_{\text{мо}}} \leq 0,09, \quad \frac{\Delta u_m}{u_{\text{мо}}} \leq 0,03.$$

При равенстве нулю  $\Delta x_m$  и  $\Delta u_m$  числовой коэффициент при  $l_{\min}$  следует увеличить в 1,7 раза. В 1,7 раза увеличиваются также коэффициенты при  $x_{\text{мо}}$  и  $u_{\text{мо}}$  (при одинаковых  $x_{\text{mi}}$  и  $u_{\text{mi}}$  и  $L_m \leq H$ ).

При проектировании, реконструкции предприятий, зданий и сооружений предусматривают объединение нескольких (одиночных) источников выбросов вредных веществ в одну трубу. Кроме того, под одной группой понимается  $N$  одиночных близко расположенных источников, равной высоты с одинаковыми диаметрами устьев, одинаковыми температурами газовоздушной смеси и скоростями выхода в атмосферу. Под величиной  $M$  (г/с) понимается суммарное количество вредного вещества, выбрасываемого всеми источниками в атмосферу  $M = M_1 + M_2 + \dots + M_n$ .

Значение максимальной суммарной концентрации  $C_m$  от  $N$  расположенных на площадке близко друг от друга одиночных источников,

имеющих равные значения высоты, диаметр устья, скорости выхода в атмосферу и температуры газовой смеси, определяется по формуле:

$$C_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{H^2} \cdot \sqrt[3]{\frac{N}{V \cdot \Delta T}}, \quad (3.151)$$

где  $M$  (г/с) – суммарная мощность выброса всеми источниками в атмосферу;  
 $V$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) – суммарный расход выбрасываемой всеми источниками газовой смеси, определяемый по формуле:

$$V = V_1 \cdot N. \quad (3.152)$$

Значение параметра  $v_m$  определяется по формуле

$$v_m = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V \cdot \Delta T}{N \cdot H}}. \quad (3.153)$$

Значение параметра  $K$  (холодные выбросы) преобразуется к виду:

$$K = \frac{N \cdot D}{8 \cdot V} = \frac{1}{7,1} \cdot \sqrt{\frac{N}{\omega_0 \cdot V}}. \quad (3.154)$$

Значение максимальной приземной концентрации вредных веществ  $C_m$  при выбросах через много ствольную трубу ( $N$  стволов), расстояние  $x_m$ , на котором достигается максимальная концентрация  $C_m$ , опасная скорость ветра  $u_m$ , определяются по формулам:

$$\begin{aligned} C_m &= C_m'' + d_1 \cdot (C_m' - C_m''); \\ x_m &= x_m'' + d_1 \cdot (x_m' - x_m''); \\ u_m &= u_m'' + d_1 \cdot (u_m' - u_m''), \end{aligned} \quad (3.155)$$

где  $C_m'$  – максимальная приземная концентрация, определяемая при значениях параметров выброса для одного ствола и мощности выброса  $M$ , равной суммарной мощности выброса всех стволов;  $x_m', u_m'$  – соответственно расстояние, на котором наблюдается максимальная концентрация вредных веществ  $C_m$ , и опасная скорость ветра  $u_m$  при параметрах выброса одного ствола;  $C_m''$  – максимальная приземная концентрация при мощности выброса  $M$ , равной суммарной мощности выброса из всех стволов, диаметре  $D$ ,

равном эффективному диаметру источника выброса  $D_э$ , который определяется по формуле:

$$D_э = D\sqrt{N}, \quad (3.156)$$

и расходе выходящей газовой смеси равной  $V_{1э} = \frac{\pi D_э^2}{4} \cdot \omega_0$ ;

$x_m'', u_m''$  – расстояние, соответствующее максимальной концентрации  $C_m''$  и опасная скорость ветра;  $d_1$  – безразмерный коэффициент, определяемый по формуле

$$d_1 = \frac{1 - D}{d_2 H - D},$$

где  $l$  – среднее расстояние между центрами устьев стволов;  $D$  – диаметр устья ствола;  $d_2$  – безразмерный коэффициент, определенный ранее.

При  $l \geq d_2 H$  для многоствольной трубы в расчетах принимается:

$$C_m = C_m', \quad x_m = x_m', \quad u_m = u_m'.$$

Если многоствольная труба представляет собой трубу, разделенную на секторы, то расчеты выполняются так же, как и для одноствольной трубы, а эффективный диаметр определяется как:

$$D_э = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}, \text{ где } S - \text{ суммарная площадь устьев всех действующих стволов.}$$

В случае многоствольной трубы выброс  $M$  из всех стволов, соответствующий  $C_m$ , при  $l < d_2 H$  определяется по формуле:

$$M = \frac{C_m}{q_m'' + d_1(q_m' - q_m'')}, \quad (3.157)$$

где  $q_m', q_m''$  – приземные максимальные концентрации при  $M=1$  г/с, рассчитанные соответственно при значениях параметров  $D$  и  $V_1$  и при их эффективных значениях  $D_э$  и  $V_{1э}$ .

При одновременном присутствии в атмосфере нескольких  $n$  вредных веществ, обладающих суммирующим действием, безразмерная суммарная концентрация (для каждой группы указанных вредных веществ

однонаправленного действия) не должна превышать единицы при расчете по формуле:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \leq 1,$$

где  $C_i$  – концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе в одной и той же точке местности, мг/м<sup>3</sup>;  $\text{ПДК}_i$  – максимальные разовые предельно допустимые концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе.

Для веществ, обладающих суммацией вредного действия, безразмерная суммарная концентрация  $q$  или приведенная к одному веществу суммарная концентрация  $S$  рассчитывается с использованием для каждого источника значений мощности  $M_q$  или  $M$  соответственно:

$$M_q = \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{\text{ПДК}_i},$$

$$M = M_1 + \sum_{i=2}^n M_i \cdot \frac{\text{ПДК}_1}{\text{ПДК}_i},$$

где  $M_1, M_2, \dots, M_n$  – мощности выброса каждого из  $n$  веществ;  $\text{ПДК}_1, \text{ПДК}_2, \dots, \text{ПДК}_n$  – максимальные разовые предельно допустимые концентрации этих веществ. В остальном расчетная схема остается без изменений.

К вредным веществам однонаправленного действия, как правило, относят вещества близкие по химическому строению и характеру биологического воздействия на организм человека. Например: ацетон и фенол; ацетон, акролеин, фталевый ангидрид; мышьяковистый ангидрид и ацетат свинца; мышьяковистый ангидрид и германий; озон, диоксид азота и формальдегид; оксид углерода, диоксид азота, формальдегид, гексан; диоксид серы и аэрозоль серной кислоты; диоксид серы и никель металлический; диоксид серы и сероводород; диоксид серы и диоксид азота; диоксид серы, оксид углерода, фенол и пыль конверторного производства; диоксид серы и

фтористый водород; оксид углерода и пыль цементного производства; этилен, пропилен, бутилен и амилен.

**Пример 3.15.** Промышленная котельная расположена в ровной открытой местности. Происходит выброс двуокиси серы  $M_{SO_2} = 12$  (г/с), выброс окислов азота (в пересчете на двуокись азота)  $M_{NO_2} = 0,2$  (г/с), выброс золы – 2,6 (г/с). Максимальные разовые предельно допустимые концентрации (ПДК), мг/м<sup>3</sup>: двуокиси серы – 0,5; золы – 0,5; окислов азота – 0,085. Высота дымовых труб 35 м. Температура газовой смеси – 125 °С. Температура окружающего воздуха – 25 °С.

Рассчитать концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе в районе источников их выброса при неблагоприятных метеорологических условиях.

Ниже представлена программа расчета в MathCad, предусматривающая выбросы вредных веществ из горячих и холодных источников (одного и многих) с круглым или прямоугольным (шахта) устьем.

$I = 1$  - горячий источник,  $I = 0$  - холодный источник;  $II = 1$  - круглое устье,  $II = 0$  - фонарь;  $N$  - количество источников;  $M$  - количество вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в соответствии с нормативными документами;  $F$  - безразмерный коэффициент (1- для газообразных ве-в, 2,2.5,3 - пыль, зола);  $U$  - скорость ветра;  $B$  - ширина устья фонаря;  $L$  - длина устья фонаря;  $\omega_0$  - средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника выброса;  $\eta$  - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности;  $D$  - диаметр устья трубы.

$I := 1$   $II := 1$   $n1 := 2$   $i := 0.. n1$   $N := 1$   $A := 200$

$M_0 := 12$   $M_1 := 0.2$   $M_2 := 2.6$   $PDK_0 := 0.5$   $PDK_1 := 0.085$   $PDK_2 := 0.5$

$L := 2$   $H := 35$   $F_0 := 1$   $F_1 := 1$   $F_2 := 3$   $U := 0.6$   $B := 0.8$

$\omega_0 := 7$   $D := 1.4$   $T_g := 125$   $T_b := 25$   $\Delta T := T_g - T_b$   $\eta := 1$

Эквивалентный диаметр:

$$De := \frac{2 \cdot L \cdot v1}{L^2 \cdot \omega_0 + v1} \quad D := \begin{cases} D & \text{if } I1 = 1 \\ De & \text{if } I1 = 0 \end{cases}$$

Расход газовой смеси:

$$v1 := \begin{cases} \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \omega_0 \right) & \text{if } I1 = 1 \\ (L \cdot B \cdot \omega_0) & \text{if } I1 = 0 \end{cases} \quad v := v1 \cdot N \quad K := \frac{N \cdot D}{8 \cdot v}$$

$$vm := \begin{cases} \left( 0.65 \cdot \sqrt[3]{\frac{v1 \cdot \Delta T}{H \cdot N}} \right) & \text{if } I = 1 \\ \left( 1.3 \cdot \frac{\omega_0 \cdot D}{H} \right) & \text{if } I = 0 \end{cases} \quad f := \begin{cases} \frac{10^3 \cdot \omega_0^2 \cdot D}{H^2 \cdot \Delta T} & \text{if } I = 1 \\ [800 \cdot (vm)^3] & \text{if } I = 0 \end{cases}$$

$$m := \begin{cases} \frac{1}{0.67 + 0.1 \cdot \sqrt{f} + 0.34 \cdot \sqrt[3]{f}} & \text{if } f < 100 \\ \frac{1.47}{\sqrt[3]{f}} & \text{if } f \geq 100 \end{cases} \quad K := \frac{1}{7.1} \cdot \sqrt{\frac{N}{\omega_0 \cdot v}}$$

$$n := \begin{cases} 3 & \text{if } vm \leq 0.3 \\ \left[ \left[ 3 - \sqrt{(vm - 0.3) \cdot (4.36 - vm)} \right] \right] & \text{if } 0.3 < vm \leq 2 \\ 1 & \text{if } vm > 2 \end{cases}$$

Максимальная приземная концентрация при неблагоприятных метеоусловиях:

$$Cm_i := \begin{cases} \frac{A \cdot M_i \cdot F_i \cdot m \cdot n \cdot \eta}{H^2} \cdot \sqrt[3]{\frac{N}{v \cdot \Delta T}} & \text{if } I = 1 \\ \left( \frac{A \cdot M_i \cdot F_i \cdot n \cdot \eta}{\frac{4}{H^3}} \cdot K \right) & \text{if } I = 0 \end{cases} \quad CC := \sum_{i=0}^2 \frac{Cm_i}{PDK_i}$$

$$CC = 0.652$$

$$U_m := \begin{cases} 0.5 & \text{if } (v_m \leq 0.5 \wedge f < 100) \\ v_m & \text{if } 0.5 < v_m \leq 2 \wedge f < 100 \\ \lceil v_m \cdot (1 + 0.12 \cdot \sqrt{f}) \rceil & \text{if } v_m > 2 \wedge f < 100 \\ 0.5 & \text{if } (v_m \leq 0.5 \wedge f \geq 100) \\ v_m & \text{if } 0.5 < v_m \leq 2 \wedge f \geq 100 \\ (2.2 \cdot v_m) & \text{if } v_m > 2 \wedge f \geq 100 \end{cases} \quad U_m = 2.22$$

Безразмерный параметр:

$$r := \begin{cases} \left[ \left[ 0.67 \cdot \frac{U}{U_m} + 1.67 \cdot \left( \frac{U}{U_m} \right)^2 - 1.34 \cdot \left( \frac{U}{U_m} \right)^3 \right] \right] & \text{if } \frac{U}{U_m} \leq 1 \\ \left[ \frac{3 \cdot \frac{U}{U_m}}{2 \cdot \left( \frac{U}{U_m} \right)^2 - \left( \frac{U}{U_m} \right) + 2} \right] & \text{if } \frac{U}{U_m} > 1 \end{cases} \quad r = 0.277$$

Максимальная приземная концентрация вредного вещества при неблагоприятных метеоусловиях и скорости ветра, отличная от опасной на расстоянии X:

$$C_{mu_i} := r \cdot C_{m_i} \quad C_{mu_i} =$$

0.052
$8.594 \cdot 10^{-4}$
0.034

Безразмерный коэффициент d:

$$d := \begin{cases} \lceil 4.95 \cdot v_m \cdot (1 + 0.28 \cdot \sqrt[3]{f}) \rceil & \text{if } 0.5 < v_m \leq 2 \wedge I = 1 \\ \lceil 7 \cdot \sqrt{v_m} \cdot (1 + 0.28 \cdot \sqrt[3]{f}) \rceil & \text{if } (v_m > 2 \wedge I = 1) \\ \lceil \lceil 2.48 \cdot (1 + 0.28 \cdot \sqrt[3]{f}) \rceil \rceil & \text{if } v_m \leq 0.5 \wedge I = 1 \\ (11.4 \cdot v_m) & \text{if } (v_m \leq 2 \wedge I = 0) \\ (16.1 \cdot \sqrt{v_m}) & \text{if } (v_m > 2 \wedge I = 0) \\ 5.7 & \text{if } v_m \leq 0.5 \wedge I = 0 \end{cases} \quad d = 12.297$$



Расстояние  $X_m$ , где концентрация вредного вещества равна  $C_m$ :

$$X_{m_i} := \begin{cases} (d \cdot H) & \text{if } F_i < 2 \\ \left( \frac{5 - F_i}{4} \cdot d \cdot H \right) & \text{if } F_i > 2 \end{cases} \quad X_{m_i} = \begin{array}{|c|} \hline 430.398 \\ \hline 430.398 \\ \hline 215.199 \\ \hline \end{array}$$

Безразмерная величина  $S3$  (для аэроционного фонаря):

$$S3_i := \frac{1 + 0.45 \cdot \frac{L}{X_{m_i}}}{1 + 0.45 \cdot \frac{L}{X_{m_i}} + 0.1 \cdot \left( \frac{L}{X_{m_i}} \right)^2}$$

Максимальная концентрация при ветре вдоль аэроционного фонаря составит:

$$C_{B_i} := S3_i \cdot C_{m_i}$$

Находим безразмерную величину  $S1$  при опасной скорости ветра:

$$X := 0..3000 \quad i := 0..2$$

$$S1(i, X) := \begin{cases} \left[ \left[ 3 \cdot \left( \frac{X}{X_{m_i}} \right)^4 - 8 \cdot \left( \frac{X}{X_{m_i}} \right)^3 + 6 \cdot \left( \frac{X}{X_{m_i}} \right)^2 \right] \right] & \text{if } \frac{X}{X_{m_i}} \leq 1 \\ \frac{1.13}{0.13 \cdot \left( \frac{X}{X_{m_i}} \right)^2 + 1} & \text{if } 1 < \frac{X}{X_{m_i}} \leq 8 \\ \frac{\frac{X}{X_{m_i}}}{3.58 \cdot \left( \frac{X}{X_{m_i}} \right)^2 - 35.2 \cdot \frac{X}{X_{m_i}} + 120} & \text{if } \left( \frac{X}{X_{m_i}} > 8 \wedge F_i \leq 1.5 \right) \\ \frac{1}{0.1 \cdot \left( \frac{X}{X_{m_i}} \right)^2 + 2.47 \cdot \frac{X}{X_{m_i}} - 17.8} & \text{if } \left( \frac{X}{X_{m_i}} > 8 \wedge F_i > 1.5 \right) \end{cases}$$

$$\alpha_i := \begin{cases} \frac{Xm_i}{L \cdot \sqrt{Um}} & \text{if } Um \leq 5 \\ \left( \left( 45 \cdot \frac{Xm}{L} \right) \right) & \text{if } Um > 5 \end{cases}$$

$$\varepsilon_{1i} := \begin{cases} ((0.923 \cdot \alpha_i)) & \text{if } \alpha_i \leq 0.255 \\ \frac{1.13 \cdot (\alpha_i)^2}{(\alpha_i + 0.3)^2} & \text{if } 0.255 < \alpha_i \leq 2.32 \\ \frac{(\alpha_i)^2}{(\alpha_i)^2 + 0.7} & \text{if } \alpha_i > 2.32 \end{cases}$$

Значение максимальной концентрации вредных веществ при ветре, направленном поперек линейного источника:

$$CCm_i := \varepsilon_{1i} \cdot Cm_i$$

$$\varepsilon_{2i} := \begin{cases} 3 & \text{if } \alpha_i \leq 0.25 \\ \frac{1.5}{\sqrt{\alpha_i}} & \text{if } 0.25 < \alpha_i < 2.25 \\ 1 & \text{if } \alpha_i > 2.25 \end{cases}$$

$$XXm_i := \varepsilon_{2i} \cdot Xm_i$$

Для аэроционного фонаря:

$$S6(X) := \begin{cases} \sqrt{\left[ \left( \frac{X}{L} \right)^2 \cdot \frac{1}{U} \right]} & \text{if } \left[ \left( \frac{X}{L} \right)^2 \cdot \frac{1}{U} \right] < 0.5 \\ \frac{1}{1 + \frac{0.7}{\left( \frac{X}{L} \right)^2 \cdot \frac{1}{U}}} & \text{if } \left[ \left( \frac{X}{L} \right)^2 \cdot \frac{1}{U} \right] \geq 0.5 \end{cases}$$

Распределение концентраций вредных веществ на расстоянии X от центра линейного источника при ветре скоростью u, направленном поперек линейного источника:

$$C_n(i, X) := S1(i, X) \cdot S6(X) \cdot r \cdot C_{m_i}$$

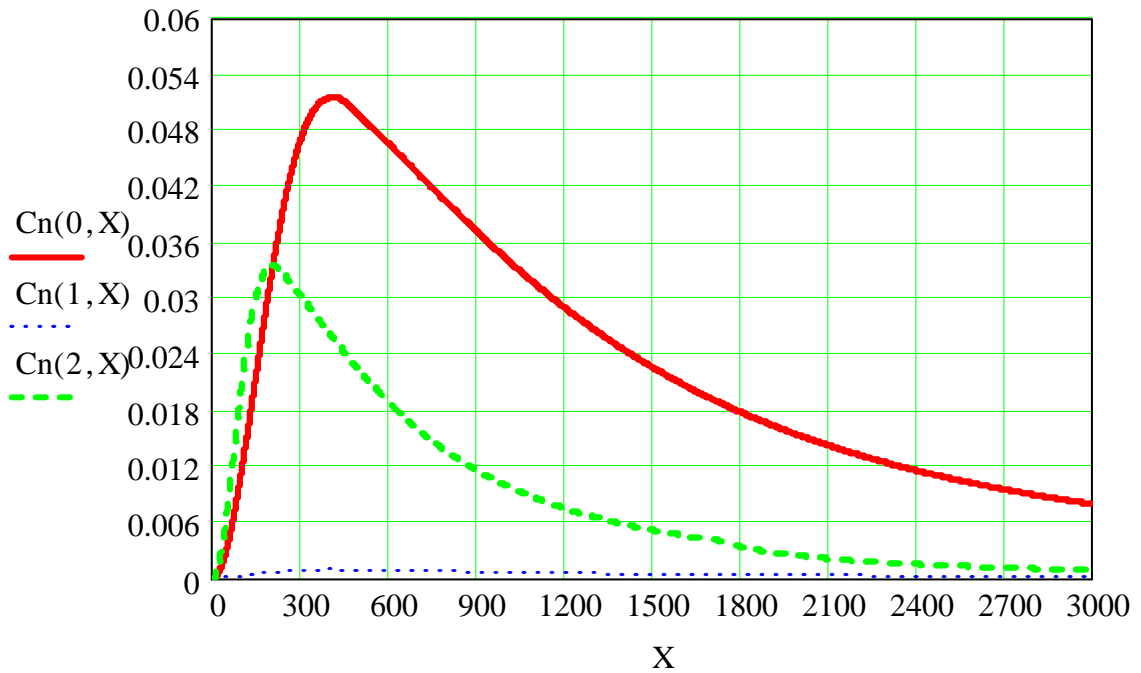


Рис.3.57. Распределение концентраций вредных веществ на расстоянии X от центра линейного источника

Максимальная приземная концентрация  $C_n$  при ветре, направленном поперек устья на расстоянии X равна (для одного и многих источников с круглым устьем):

$$C(i, X) := S1(i, X) \cdot C_{m_i} \quad CS(X) := \sum_{i=0}^1 C(i, X)$$

Находим безразмерную величину:

$$P := \begin{cases} 3 & \text{if } \frac{U}{U_m} \leq 0.25 \\ \left[ \left[ 8.43 \cdot \left( 1 - \frac{U}{U_m} \right)^5 + 1 \right] \right] & \text{if } 0.25 < \frac{U}{U_m} \leq 1 \\ \left[ \left[ 0.32 \cdot \left( \frac{U}{U_m} \right) + 0.68 \right] \right] & \text{if } \frac{U}{U_m} > 1 \end{cases} \quad P = 2.745$$

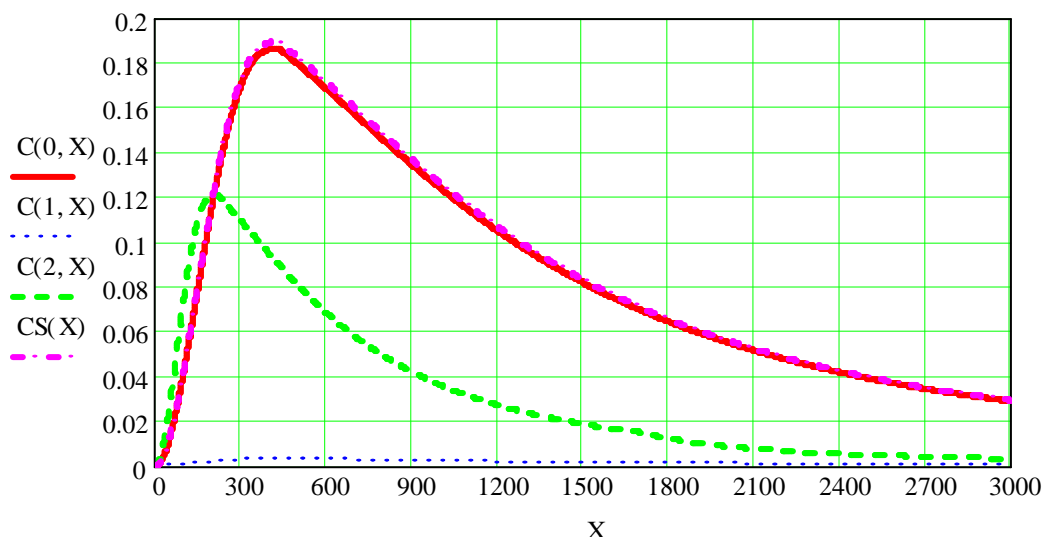


Рис.3.58. Распределение концентраций двуокиси серы, окислов азота, золы и суммарная концентрация для веществ однонаправленного действия в зависимости от расстояния.

Расстояние от источника выброса, на котором при скорости и неблагоприятных метеоусловиях концентрация вредного вещества достигает максимального значения:

$$X_{mu_j} := P \cdot X_{mj} \quad X_{mu} = \begin{pmatrix} 1.181 \times 10^3 \\ 1.181 \times 10^3 \\ 590.637 \end{pmatrix}$$

Значение приземной концентрации вредных веществ в атмосфере  $C_y$  на расстоянии  $y$  ( $y = 50$ ) по перпендикуляру к оси факела выброса:

$$ty(X) := \begin{cases} \frac{U \cdot y^2}{X^2} & \text{if } U \leq 5 \\ \frac{5 \cdot y^2}{X^2} & \text{if } U > 5 \end{cases}$$

$$S2(X) := \frac{1}{(1 + 5 \cdot ty(X) + 12.8 \cdot ty(X)^2 + 17 \cdot ty(X)^3 + 45.1 \cdot ty(X)^4)^2}$$

$$C_y(i, X) := S2(X) \cdot C(i, X)$$

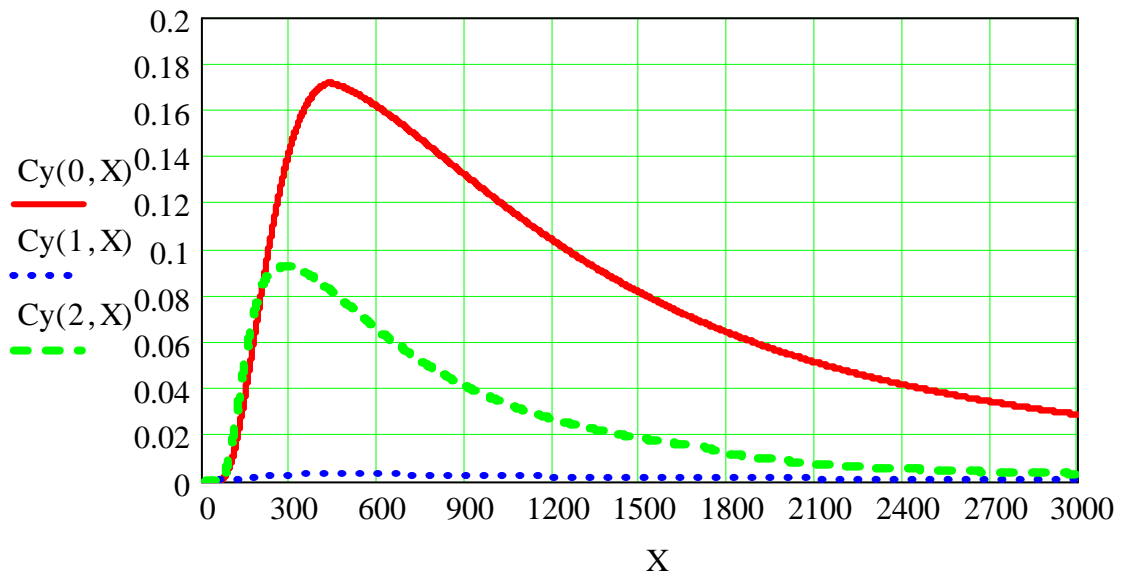


Рис.3.59. Зависимость приземной концентрации двуокиси серы, окислов азота, золы в атмосфере ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) на расстоянии  $y$  ( $y = 50 \text{ м}$ ) по перпендикуляру к оси факела выброса

Распределение концентраций  $C_z$  ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) на разных высотах  $z$  ( $\text{м}$ ) над подстилающей поверхностью при  $X < X_{\text{mu}}$  производится по формуле:

$$C_z(i, X) := r \cdot C_{m_i} \cdot S_z(i, X) \cdot S2(X)$$

$$b1(i, X) := \frac{X}{X_{\text{mu}_i}}$$

$$d2 := \begin{cases} \left[ \left[ 0.06 \cdot v_m \cdot \frac{\sqrt[3]{f}}{U} + 0.034 \left( \frac{v_m}{U} \right)^3 \right] \right] & \text{if } f < 100 \\ \left[ \left[ 0.28 \cdot \frac{v_m}{U} + 0.034 \cdot \left( \frac{v_m}{U} \right)^3 \right] \right] & \text{if } f \geq 100 \end{cases}$$

$$S01(i,X) := \begin{cases} \left[ \left[ 3 \cdot \left( \frac{X}{X\mu_i} \right)^4 - 8 \cdot \left( \frac{X}{X\mu_i} \right)^3 + 6 \cdot \left( \frac{X}{X\mu_i} \right)^2 \right] \right] & \text{if } \frac{X}{X\mu_i} \leq 1 \\ \frac{1.13}{0.13 \cdot \left( \frac{X}{X\mu_i} \right)^2 + 1} & \text{if } 1 < \frac{X}{X\mu_i} \leq 8 \\ \frac{\frac{X}{X\mu_i}}{3.58 \cdot \left( \frac{X}{X\mu_i} \right)^2 - 35.2 \cdot \frac{X}{X\mu_i} + 120} & \text{if } \frac{X}{X\mu_i} > 8 \wedge F_i \leq 1.5 \\ \frac{1}{0.1 \cdot \left( \frac{X}{X\mu_i} \right)^2 + 2.47 \left( \frac{X}{X\mu_i} \right) - 17.8} & \text{if } \frac{X}{X\mu_i} > 8 \wedge F_i > 1.5 \end{cases}$$

$$z := 20 \quad b2 := \frac{z}{(1 + 5 \cdot d2) \cdot H_1 \ddot{e} \ddot{e}_1}$$

$$Sz(i,X) := \begin{cases} \left[ \left[ S01(i,X) \cdot \frac{[1 + 0.1 \cdot (b2 - 1)^2]}{[b1(i,X)^3 + 0.1 \cdot (b2 - 1)^2]} \cdot \left[ 1 + \frac{(b2 + 0.2) \cdot (b1(i,X)^3 - 1)}{b2 + (b2 + 0.2) \cdot [1 + 0.1 \cdot (b2 - 1)^2]} \right] \right] \right] & \text{if } b1(i,X) \leq 1 \\ S01(i,X) & \text{if } b1(i,X) > 1 \end{cases}$$

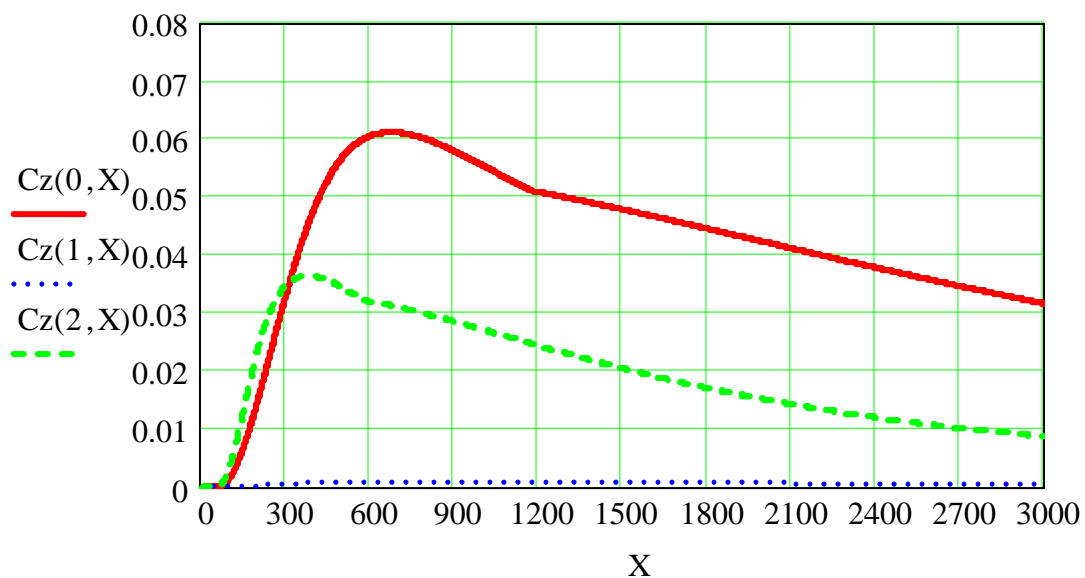


Рис.3.60. Распределение концентраций  $C_z$  ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) на разных высотах  $z$  (м) над подстилающей поверхностью ( $z = 20$ ).

## Характеристика и признаки объектов чрезвычайных ситуаций

**Потенциально опасный объект** — объект, на котором используются, изготавливаются, перерабатываются, хранятся или транспортируются радиоактивные, пожаровзрывоопасные, химические вещества и биологические препараты, гидротехнические и транспортные сооружения, транспортные средства, а также другие объекты, которые создают реальную угрозу возникновения ЧС.

**Промышленная авария** — авария на промышленном объекте, в технической системе или на промышленной установке.

**Промышленная безопасность** в чрезвычайных ситуациях — состояние защиты населения, производственного персонала, объектов хозяйственной деятельности и окружающей среды от опасностей, которые возникают при промышленных авариях и катастрофах в зонах ЧС.

**Радиационная авария** — авария на радиационно-опасном объекте, который приводит к выливу или выбросу радиоактивных веществ (РВ) и (или) ионизирующих излучений выше предусмотренных проектом для нормальной эксплуатации данного объекта границы в объемах, которые превышают установленные границы безопасности его эксплуатации.

**Радиоактивное загрязнение** — загрязнение поверхности земли, атмосферы, воды или продовольствия, пищевого сырья, кормов и разных предметов РВ в объемах, которые превышают уровень, установленный нормами радиационной безопасности и правилами работ с РВ.

**Радиационно-опасный объект** — объект, на котором хранят, перерабатывают, используют или транспортируют РВ, при аварии на котором или его разрушении может возникнуть облучение ионизирующим излучением или радиоактивное загрязнение людей, сельскохозяйственных животных и растений, объектов хозяйственной деятельности, а также окружающей среды.

**Зона радиоактивного загрязнения** — территория или акватория, в границах которой имеется радиоактивное загрязнение.

**Режим радиационной защиты** — порядок действия населения и использования средств и способов защиты в зоне радиоактивного загрязнения с целью уменьшения воздействия ионизирующего облучения на людей.

**Радиационный контроль** — контроль за соблюдением норм радиационной безопасности и основных санитарных правил работы с РВ и другими источниками ионизирующего излучения, а также получение информации об уровнях облучения людей и об обстановке на объекте и в окружающей среде.

**Химическая авария** — авария на химически опасном объекте (ХОО), которая приводит к разливу или выбросу опасных химических веществ (ОХВ), способных привести к гибели или химическому заражению людей, продовольствия, пищевого сырья и кормов, сельскохозяйственных животных и растений или к химическому заражению окружающей среды.

**Опасное химическое вещество** — химическое вещество, которое прямым или опосредованным действием на человека может привести к острым и хроническим заболеваниям или к его гибели.

**Выброс опасного химического вещества** — выход (вылив) за короткий срок при разгерметизации технологических установок, емкостей для хранения или транспортирования опасного химического вещества или продуктов его переработки в объемах, которые могут привести к химической аварии.

**Химически опасный объект** — объект, на котором хранят, перерабатывают, используют или транспортируют ОХВ, при аварии на котором или при его разрушении может произойти гибель или химическое заражение людей, сельскохозяйственных животных и растений, объектов хозяйственной деятельности, а также окружающей среды.

**Зона химического заражения** — территория или акватория, в границы которой распространены или занесены опасные ХВ в концентрациях или объемах, создающих опасность для жизни и здоровья людей, сельскохозяйственных животных и растений в течение определенного времени.

**Биологическая авария** — авария, которая сопровождается распространением опасных биологических веществ в объемах, которые создают опасность для



жизни и здоровья людей, для сельскохозяйственных животных и растений, а также служат причиной ущерба окружающей среды.

**Опасное биологическое вещество** — биологическое вещество природного или искусственного происхождения, которое оказывает неблагоприятное влияние на людей, сельскохозяйственных животных и растений в случае столкновения с ними, а также на окружающую природную среду.

**Зона биологического заражения** — территория или акватория, в границах которой распространены или занесены опасные биологические вещества, биологические средства поражения людей и животных или патогенные микроорганизмы, которые создают опасность для жизни и здоровья людей, для сельскохозяйственных животных и растений, а также для окружающей среды.

**Гидродинамическая авария** — авария на гидротехническом сооружении, которая связана с распространением с большой скоростью воды и создающая опасность возникновения техногенной ЧС.

**Гидродинамически опасный объект** — сооружение или образование природы, создающее разность уровней воды до и после его и которое, в случае разрушения, может привести к образованию прорывной волны и зоны затопления, к гибели людей, сельскохозяйственных животных и растений, нанести вред объектам хозяйственной деятельности и окружающей природной среде.

**Волна прорыва** — волна, образующаяся во фронте потока воды, которая направляется в проран и имеющая, как правило, значительную высоту и скорость движения, обладающая значительной разрушительной силой.

**Зона затопления** — территория, на которой возникает затопление местности вследствие разрушения или повреждения гидротехнических сооружений.

**Зона катастрофического затопления** — местность в нижнем бьефе, которая может быть затоплена в случае разрушения сооружения или образования прорана в плотине гидродинамически опасного объекта при наибольшем расчетном уровне воды в верхнем бьефе, на которую распространяется волна прорыва, вызывающая массовые потери людей, разрушение зданий или объектов и уничтожение материальных ценностей.

**Пожар** — неконтролируемый процесс горения, который сопровождается уничтожением материальных ценностей и создающий опасность жизни и здоровью людей.

**Пожарная безопасность** — состояние защиты населения, объектов хозяйственной деятельности и другого назначения, а также окружающей среды от опасных факторов и действий пожара.

**Обеспечение пожарной безопасности** — принятие и соблюдение нормативных правовых актов, правил и требований пожарной безопасности, а также выполнение противопожарных мероприятий.

**Пожарная опасность** — возможность возникновения или развития пожара, которая находится в каком-либо веществе, образовании или процессе.

**Требования пожарной безопасности** — специальные условия или правила организационного и (или) технического характера, которые установлены с целью обеспечения пожарной безопасности специально уполномоченным государственным органом в действующем законодательстве или нормативных технических документах.

**Противопожарные мероприятия** — мероприятия организационного и (или) технического характера, которые направлены на соблюдение противопожарного режима, создание условий для заблаговременного предотвращения и (или) быстрого тушения пожара.

**Пожарная охрана** — главная часть системы пожарной безопасности, которая соединяет органы управления, силы и средства, создающиеся в установленном порядке с целью защиты жизни и здоровья людей, объектов хозяйственной деятельности и окружающей среды от ЧС, вызванных пожарами.

**Пожаровзрывоопасный объект** — объект, который вырабатывает, использует, перерабатывает, хранит или транспортирует легковоспламеняющиеся и пожаровзрывоопасные вещества, создающие реальную угрозу возникновения техногенной ЧС.

**Взрыв** — процесс физических и химических превращений веществ, который быстро протекает и сопровождается выделением значительного

количества энергии в ограниченном объеме, вследствие чего в окружающем пространстве возникает и распространяется взрывная волна, которая может привести или приводит к возникновению техногенной чрезвычайной ситуации.

**Взрывоопасное вещество** — вещество, которое может взорваться при действии пламени или чувствительное к сотрясению или трению больше, чем динитробензол.

**Транспортная авария** — авария на транспорте, которая повлекла за собой гибель людей, причинила пострадавшим тяжелые телесные повреждения, уничтожение и повреждение транспортных сооружений и средств или ущерб окружающей среде.

**Опасный груз** — опасное вещество, материал, изделия и отходы производства, которые вследствие их специфических свойств при транспортировании или перегрузке могут создать угрозу жизни и здоровью людей, вызвать загрязнение окружающей среды, повреждение и уничтожение транспортных сооружений, средств и другого имущества.

**Катастрофа поезда** — столкновение пассажирского или грузового поезда с другим поездом или подвижным составом, схождение подвижного состава поезда с рельс на перегонах и станциях, вследствие чего погибли и (или) ранены люди, разбиты локомотив или вагоны до состояния исключения из имущества, или произошла полная остановка движения на данном участке, превышающая нормативное время для ликвидации последствий столкновения или схождения подвижного состава.

**Железнодорожная авария** — авария на железной дороге, которая повлекла за собой повреждение одной или нескольких единиц подвижного состава железной дороги до состояния капитального ремонта и (или) гибель одного или нескольких человек, причинила пострадавшим телесные повреждения разной тяжести или полную остановку движения на аварийном участке на время, которое превышает нормативное для ликвидации последствий аварии.

**Безопасность дорожного движения** — состояние процесса дорожного движения, которое отображает степень защиты его участников и общество от дорожно-транспортных происшествий и их последствий.

**Дорожно-транспортное происшествие** — транспортная авария, которая возникла в процессе дорожного движения с участием транспортного средства и повлекла за собой гибель людей и (или) причинила пострадавшим тяжелые телесные повреждения, повреждение транспортных средств, путей, сооружений, грузов или другой материальный ущерб.

**Авария на магистральном трубопроводе** — авария на трассе трубопровода, которая связана с выбросом и выливом под давлением под давлением опасных химических или пожаровзрывоопасных веществ, которые содействуют возникновению техногенной ЧС.

**Авария на подземном сооружении** — опасное событие в подземной шахте, горной выработке, подземном складе или хранилище, в транспортном туннеле или рекреационной (место отдыха) пещере, которая связана с внезапным или частичным разрушением сооружений, создающих угрозу жизни и здоровью людей, которые находятся в них и (или) приводят к материальному ущербу.

**Авиационная катастрофа** — опасное событие на воздушном судне, во время полета или в процессе эвакуации, которое привело к гибели или исчезновению без вести людей, причинению пострадавшим телесных повреждений, уничтожению или повреждению судна и материальных ценностей, которые перевозятся на нем.

**Водная катастрофа** — опасное событие на морском или речном судне, во время плавания или в процессе эвакуации, которое привело к гибели или исчезновению без вести людей, причинению пострадавшим телесных повреждений, уничтожению или повреждению судна и материальных ценностей, которые перевозятся на нем, а также нанесению ущерба окружающей среде.

**Поражающие факторы** источников техногенных чрезвычайных ситуаций классифицируют по генезису и механизму действия.

Поражающие факторы источников чрезвычайных техногенных ситуаций по генезису разделяют на факторы: прямого действия или первичные; побочного действия или вторичные.

Первичные факторы поражения непосредственно вызываются возникновением источника техногенного НС.

Вторичные факторы поражения вызываются изменениями объектов окружающей природной среды первичными факторами поражения.

Поражающие факторы источников техногенных чрезвычайных ситуаций по механизму действия разделяют на факторы: физического действия: химического действия.

К поражающим факторам физического действия относят: воздушную ударную волну: волну давления в грунте; сейсмическую взрывную волну: волну прорыва гидротехнических сооружений; обломки или осколки: экстремальный нагрев среды: тепловое излучение; ионизирующее излучение. К факторам поражения химического действия относят токсичное действие опасных химических веществ.

**Природные чрезвычайные** ситуации характеризуются следующими сроками и определениями:

**Опасное геологическое явление** — событие геологического происхождения или следствие действия геологических процессов, возникающих в земной коре под действием разных природных и геодинамических факторов или их комбинаций, которые оказывают или могут оказать поражающее действие на людей, сельскохозяйственных животных и растения, объекты экономики и окружающую природную среду.

**Сейсмическая безопасность** — состояние защиты населения, объектов экономики и окружающей природной среды от опасности, которая возникает от последствий землетрясения.

**Обеспечение сейсмической безопасности** — принятие и соблюдение правовых норм, выполнение экологических и сейсмических защитных правил и требований, а также выполнение комплекса организационных, прогнозных, инженерных, технических, сейсмических защитных и специальных мероприятий, которые

направлены на обеспечение защиты от действия поражающих факторов землетрясения людей, объектов хозяйственной деятельности и окружающей среды.

**Сейсмическое районирование** — выделение областей, районов или отдельных участков местности на поверхности Земли по степени потенциальной сейсмической опасности, которое проводится на базе комплексного анализа геологических и геофизических данных.

**Сейсмическая область** — горная складчатая область или активная платформа, в границах которой могут пройти землетрясения, степень потенциальной опасности которых характеризуется макросейсмической интенсивностью и максимально возможным ускорением колебания грунта при землетрясении.

**Сейсмическая волна** — упругие колебания, которые распространяются в Земле от эпицентров землетрясений и взрывов.

**Сейсмическая шкала** — шкала для оценки интенсивности землетрясения на поверхности Земли.

**Землетрясение** — подземные толчки и колебания земной поверхности, которые возникают вследствие внезапных смещений и разрывов в земной коре или верхней части мантии Земли, передающиеся на большие расстояния в виде упругих колебаний.

**Эпицентр землетрясения** — область возникновения подземного удара в толще земной поверхности или верхней мантии, которая является причиной землетрясения.

**Вулкан** — геологическое образование, возникающее над каналами и трещинами в земной коре, по которым на земную поверхность выливается лава, пепел, горячие газы, пары воды и обломки горных пород.

**Обвал** — отрыв и падение больших масс горных пород на крутых и обрывистых склонах гор, речных долин и морского побережья, которые возникают главным образом за счет ослабления связей горных пород под влиянием процессов выветривания, деятельности поверхностных и подземных вод.

**Сдвиг** — перемещение масс горных пород по склону под действием собственного веса и дополнительной нагрузки вследствие подмывания склона, переувлажнения, сейсмических толчков и других процессов.

**Противооползневая защита** — комплекс охранительных, ограничительных и инженерно-технических мероприятий, направленных на предотвращение возникновения и развития сдвижного процесса, защиту людей и территорий от сдвигов, а также на своевременное информирование органов исполнительной власти или местного самоуправления и населения об угрозе его возникновения.

**Опасное гидрологическое явление** — событие гидрологического происхождения или результат гидрологических процессов, которые возникают под действием разных природных или гидродинамических факторов или их комбинаций, которые оказывают или могут оказать поражающее действие на людей, сельскохозяйственных животных и растения, объекты экономики и окружающую среду.

**Наводнение** — ежегодное затопление от продолжительного подъема уровня воды территории местности, которая прилегает к реке, озеру или водохранилищу, повторяющееся в один и тот же период сезона.

**Паводок** — фаза водного режима реки, которая может многократно повторяться в разные сезоны года, характеризующаяся интенсивным, кратковременным увеличением уровня воды, вызванным дождем или интенсивным таянием снега во время оттепели.

**Подтопление** — повышение уровня грунтовых вод, которые затрудняют нормальное использование территории, строительство и эксплуатацию расположенных на ней объектов.

**Зона затопления** — территория, которая покрывается водой в результате превышения приток воды в сравнении с пропускной возможностью русла.

**Зона возможного затопления** — территория, в границах которой возможно или прогнозируется возникновение зоны затопления.

**Зона катастрофического затопления** — зона затопления, на которой произошла гибель людей, сельскохозяйственных животных и растений,

повреждение или уничтожение материальных ценностей, а также нанесен ущерб окружающей природной среде.

**Зона возможного катастрофического затопления** — зона возможного затопления, на которой можно ожидать гибель людей, сельскохозяйственных животных и растений, повреждение или уничтожение материальных ценностей, а также нанесение ущерба окружающей среде.

**Сель (селевой поток)** — отвесный русловый поток, который возникает внезапно, состоит из воды, песка, грязи и обломков горных пород и характеризуется резким подъемом уровня воды, волновым движением, коротким сроком действия, значительным эрозионным и кумулятивным эффектом, создающий угрозу жизни и здоровью людей, ущерб объектам и окружающей среде.

**Селеопасная территория** — территория, которая характеризуется интенсивностью развития селевых процессов, создающих опасность для людей, объектов экономики и окружающей среды.

**Защита против селя** — комплекс охранительных, ограничительных и инженерно-технических мероприятий, направленных на предотвращение возникновения и развития селевых процессов, защиту людей и территорий от сдвигов, а также своевременное информирование органов исполнительной власти и местного самоуправления и населения об угрозе возникновения селей.

**Лавина** — быстрое, внезапно возникающее движение снега и (или) льда вниз по крутым склонам гор, которое представляет угрозу жизни и здоровью людей и служит причиной ущерба объектам экономики и окружающей среде.

**Лавиноопасная территория** — горная местность, на которой есть реальная потенциальная опасность схода лавин, которые могут создать угрозу жизни и здоровью людей и нанести ущерб объектам экономики и окружающей среде.

**Противолавинная защита** — комплекс охранительных, ограничительных и инженерно-технических мероприятий, направленных на предотвращение возникновения процессов, которые образуют лавины, а также



на своевременное информирование органов исполнительной власти или местного самоуправления и населения об угрозе возникновения лавин.

**Опасное метеорологическое явление** — природные процессы и явления, которые возникают в атмосфере под действием разных природных факторов и их комбинаций, и могут создать угрозу жизни и здоровью людей и нанести ущерб объектам экономики и окружающей среде.

**Сильный ветер** — движение воздуха над земной поверхностью со скоростью более 14 м/с.

**Вихрь** — атмосферное образование с вращательным движением воздуха вокруг вертикальной или наклоненной оси.

**Ураган** — ветер разрушительной силы и большой продолжительности, скорость которого превышает 32 м/с.

**Циклон** — атмосферное образование со сниженным давлением воздуха и ураганскими скоростями ветра, которое возникает в тропических широтах и вызывает большие разрушения и гибель людей.

**Шторм** — продолжительный очень сильный ветер со скоростью больше 20 м/с, вызывающий сильное волнение на море и разрушения на суше.

**Смерч** — сильный, маленький по масштабам атмосферный вихрь диаметром до 1000 м, в котором воздух вращается со скоростью до 100 м/с и имеет большую разрушительную силу.

**Шквал** — резкое не продолжительное усиление ветра до 20-30 м/с и больше, сопровождающееся изменением его направления, которое связано с конвекционными процессами.

**Продолжительный дождь** — редкие атмосферные осадки, которые выпадают непрерывно или почти непрерывно на протяжении нескольких суток и могут вызвать наводнения, затопления и подтопления.

**Гроза** — атмосферное явление, которое связано с развитием сильных кучевых дождевых туч, сопровождающееся многократными электрическими разрядами между тучами и земной поверхностью, звуковыми явлениями, сильными осадками, нередко с градом.

**Град** — атмосферные осадки, которые выпадают в теплое время года, в виде частиц плотного льда диаметром от 5 мм до 15 см, обычно вместе с ливневым дождем при грозе.

**Снег** — твердые атмосферные осадки, которые состоят из ледяных кристалликов или снежинок разной формы, выпадающие из туч при температуре воздуха ниже 0°C.

**Гололедица** — пласт плотного льда, который образуется на земной поверхности и на предметах при намерзании переохлажденных капель дождя или тумана.

**Сильный снегопад** — продолжительное интенсивное выпадение снега из туч, которое приводит к значительному ухудшению видимости и препятствует движению транспорта.

**Сильная пурга** — перенос снега над поверхностью земли сильным ветром, возможно в соединении с выпадением снега, который приводит к значительному ухудшению видимости и заносу транспортных средств.

**Туман** — сосредоточение продуктов конденсации в виде капель или кристаллов в воздухе непосредственно над поверхностью земли, которое сопровождается значительным ухудшением видимости.

**Пыльная буря** — перенесение большого количества пыли или песка сильным ветром, сопровождающееся ухудшением видимости, выдуванием верхнего слоя грунта вместе с семенами и молодыми растениями, засыпанием посевов и транспортных магистралей.

**Засуха** — комплекс метеорологических факторов в виде продолжительного отсутствия осадков в сочетании с высокой температурой и понижением влажности воздуха, приводящих к нарушению водного баланса растений и вызывающих их увядание или гибель.

**Природный пожар** — неконтролируемый процесс горения, которое стихийно возникает и распространяется в окружающей среде, сопровождается интенсивным выделением тепла, дыма и световым излучением, создает опасность

для людей и наносит ущерб объектам хозяйственной деятельности и окружающей среде.

**Лесной пожар** — неконтролируемый процесс горения в лесах, который возникает стихийно или вследствие пренебрежительного обращения людей с огнем и распространяется по территории леса.

**Степной пожар** — неконтролируемый процесс горения, который возникает стихийно или вследствие искусственного пала в степи.

**Торфяной пожар** — загорание торфяного болота, осушенного или природного, при перегреве его поверхности лучами солнца или вследствие пренебрежительного обращения людей с огнем.

**Зона пожара** — территория, в границах которой в результате стихийного бедствия, аварии, катастрофы или неосторожного действия людей возникает и распространяется пожар.

**Биологически-социальная чрезвычайная ситуация** — состояние, при котором в результате возникновения источника биологически-социальной чрезвычайной ситуации на определенной территории нарушаются нормальные условия жизни людей, существования сельскохозяйственных животных и растений, возникает угроза жизни и здоровью людей, широкого распространения инфекционных заболеваний, потери сельскохозяйственных животных и растений.

**Источник биологически-социальной чрезвычайной ситуации** — особенно опасная или широко распространенная инфекционная заболеваемость людей, сельскохозяйственных животных и растений, в результате которой на определенной территории возникла или может возникнуть биологически-социальная чрезвычайная ситуация.

**Биологическая безопасность** — состояние защиты людей, сельскохозяйственных животных и растений, окружающей природной среды от опасности, которая вызвана или может быть вызвана источником биологически-социальной ЧС. Особо опасная инфекция — состояние заражения организма людей или животных, которое проявляется в виде инфекционных

заболеваний, прогрессирующих во времени и в пространстве и вызывает тяжелые последствия для здоровья людей и сельскохозяйственных животных или их гибель.

**Возбудитель инфекционного заболевания** — патогенный микроорганизм, имеющий эволюционное приспособление к паразитированию в организме человека или животного и потенциально способный вызвать заболевание инфекционной болезнью.

**Источник возбудителя инфекционной болезни** — организм зараженного человека или животного, в котором идет природный процесс сохранения, размножения и выделения во внешнюю среду возбудителя инфекционной болезни.

**Карантин** — система временных организационных, режимных, ограничительных, административных, хозяйственных, санитарных, эпидемических, гигиенических, лечебных и профилактических мероприятий, направленных на предупреждение распространения инфекционной болезни и обеспечение локализации эпидемического, эпизоотического или эпифитотического очагов и последующую их ликвидацию.

**Обсервация** — режимные и ограничительные мероприятия, которые предусматривают вместе с усилением медицинского и ветеринарного надзора и проведения противоэпидемических, лечебных, профилактических, ветеринарных и санитарных мероприятий, ограничение передвижения и перемещения людей или сельскохозяйственных животных во всех близлежащих с зоной карантина административно-территориальных образованиях, которые создают зону обсервации.

**Эпидемия** — массовое, прогрессирующее во времени и в пространстве в границах определенного региона распространение инфекционной болезни людей, которое значительно превышает обычно регистрируемый на данной территории уровень заболеваемости.

**Очаг эпидемии** — место заражения и пребывания людей, которые заболели инфекционной болезнью, или территория, в границах которой за определенный

отрезок времени возможно заражение людей и сельскохозяйственных животных возбудителями инфекционной болезни.

**Эпизоотия** — прогрессирующее во времени и в пространстве в границах определенного региона распространение инфекционной болезни среди большого количества одного или нескольких видов сельскохозяйственных животных, которое значительно превышает обычно регистрируемый на данной территории уровень заболеваемости.

**Панзоотия** — массовое одновременное распространение инфекционной болезни сельскохозяйственных животных с высоким уровнем заболеваемости на большой территории с охватом целых регионов, нескольких государств или материков.

**Энзоотия** — одновременное распространение инфекционной болезни среди сельскохозяйственных животных в определенной местности, населенном пункте или на объекте хозяйственной деятельности, природные и хозяйственно-экономические условия которых исключают распространение данной болезни.

**Эпизоотичный очаг** — место нахождения источника возбудителя инфекционной болезни сельскохозяйственных животных, которые изолированы таким образом, что становится невозможным передача возбудителя животным, восприимчивым к нему.

**Эпифитотия** — массовое, прогрессирующее во времени и в пространстве инфекционное заболевание сельскохозяйственных растений и (или) резкое повышение численности вредителей растений, которое сопровождается массовой гибелью сельскохозяйственных культур и снижением их производительности.

**Энфитотия** — одновременное распространение инфекционной заболеваемости среди сельскохозяйственных растений в определенной местности, населенном пункте или на объекте хозяйственной деятельности, природные и хозяйственно-экономические условия которых исключают распространение данной болезни.

**Панфитотия** — массовое заболевание растений и резкое увеличение вредителей сельскохозяйственных растений на территории целых регионов, нескольких государств или материков.

**Авария** - повреждения, выход из строя, разрушение, которое произошло по техногенным (конструктивным, производственным, технологическим, эксплуатационным) или естественным причинам.

**Безопасность** - отсутствие недопустимого риска, связанного с возможностью нанесения какого-либо вреда для жизни, здоровья и имущества граждан, а также для окружающей природной среды.

**Граничное состояние** - состояние, при котором конструкция, основание (здание или сооружение в целом) перестают удовлетворять заданным эксплуатационным требованиям или требованиям при выполнении работ.

**Диагностика здания (сооружения)** - процесс установления технического состояния здания (сооружения).

**Диагностическая процедура** - прием, при помощи которого получают информацию о техническом состоянии объекта диагностики.

**Дефект** - отклонение качества, формы или фактических размеров элементов и конструкций от требований нормативно-технической или проектной документации, которое возникает при проектировании, изготовлении, транспортировке и монтаже.

**Долговечность** - свойство строительного объекта длительное время сохранять работоспособное состояние при установленной системе технического обслуживания и принятом порядке проведения ремонтов.

**Класс капитальности** - относительный уровень капитальности для гидротехнических и некоторых других видов сооружений.

**Надежность** - свойство строительного объекта выполнять заданные функции в течение необходимого промежутка времени.

**Обеспеченность значения величин** - для случайных величин (когда неблагоприятным является превышение любого значения - достоверность

непревышения этого значения, а для тех величин, для которых неблагоприятным является снижение - достоверность непонижения).

**Обследование** - процесс получения качественных и количественных показателей эксплуатационной годности здания (сооружения), его частей и конструкций путем визуального осмотра, инструментальных измерений в натуре и лабораторных определений.

**Обследование предварительное** - вид обследования, при котором в качестве основного метода определения показателей эксплуатационной годности используют анализ технической документации и внешний осмотр здания (сооружения) и его частей экспертами. При визуальном обследовании определяют, главным образом, качественные показатели эксплуатационной годности.

**Обследование детальное** - вид обследования, при котором в качестве основного метода определения показателей эксплуатационной годности используют инструментальные тесты конструкций и материалов зданий (сооружений).

**Обследования специальные** - вид обследований, при которых в качестве основных методов определения показателей эксплуатационной годности, используются специальные изыскания, исследования, натурные или модельные испытания и т.п.

**Обследование сплошное** - вид обследования, при котором обследованию подлежат все конструктивные элементы здания (сооружения).

**Обследование выборочное** - вид обследования, при котором обследованию подлежат только отдельные, наиболее изношенные конструктивные элементы здания (сооружения).

**Обследование плановое** - обследование, которое выполняется в сроки, заранее определенные регламентом эксплуатации здания (сооружения).

**Обследование внеочередное** - обследование, которое выполняется вследствие возникновения любых нарушений эксплуатационного регламента.

**Повреждение** - отклонение от первичного уровня качества элементов и конструкций, которое возникает во время его эксплуатации или аварии.

**Паспортизация технического состояния здания (сооружения)** - это обследование, диагностика и оценка технического состояния объекта Специализированной организацией и определение на этом основании категории его технического состояния с последующим составлением Паспорта технического состояния здания (сооружения).

**Расчетная ситуация** - комплекс условий, учитывающихся в расчетах, определяющих расчетные требования к конструкции.

**Ремонт** - комплекс операций по восстановлению состояния объекта и (или) увеличения его долговечности.

**Техническое состояние здания (сооружения)** - совокупность качественных и количественных показателей, которые характеризуют эксплуатационную годность здания и его частей по сравнению с предельно допустимыми значениями.

**Техническое обслуживание** - комплекс мероприятий по контролю и поддержанию работоспособного или исправного состояния, который заключается, как правило, в осмотре, уходе и периодическом ремонте.

**Уровень ответственности зданий (сооружений)** - относительный уровень капитальности зданий (сооружений) в зависимости от их отказов.

**Эксплуатация здания или сооружения** - использование здания (сооружения) согласно его функциональному назначению и проведению необходимых мероприятий для сохранения состояния конструкций, при котором они способны выполнять заданные функции с параметрами, определенными требованиями технической документации.

**Эксплуатация нормальная** - эксплуатация осуществляется (без ограничений) в соответствии с предусмотренными в нормах или заданиях на проектирование технологических или бытовых условий.



**Авария** - повреждения, выход из строя, разрушение, которое произошло по техногенным (конструктивным, производственным, технологическим, эксплуатационным) или естественным причинам.

**Безопасность** - отсутствие недопустимого риска, связанного с возможностью нанесения какого-либо вреда для жизни, здоровья и имущества граждан, а также для окружающей природной среды.

**Граничное состояние** - состояние, при котором конструкция, основание (здание или сооружение в целом) перестают удовлетворять заданным эксплуатационным требованиям или требованиям при выполнении работ.

**Диагностика здания (сооружения)** - процесс установления технического состояния здания (сооружения).

**Диагностическая процедура** - прием, при помощи которого получают информацию о техническом состоянии объекта диагностики.

**Дефект** - отклонение качества, формы или фактических размеров элементов и конструкций от требований нормативно-технической или проектной документации, которое возникает при проектировании, изготовлении, транспортировке и монтаже.

**Долговечность** - свойство строительного объекта длительное время сохранять работоспособное состояние при установленной системе технического обслуживания и принятом порядке проведения ремонтов.

**Класс капитальности** - относительный уровень капитальности для гидротехнических и некоторых других видов сооружений.

**Надежность** - свойство строительного объекта выполнять заданные функции в течение необходимого промежутка времени.

**Обеспеченность значения величин** - для случайных величин (когда неблагоприятным является превышение любого значения - достоверность непревышения этого значения, а для тех величин, для которых неблагоприятным является снижение - достоверность непонижения).

**Обследование** - процесс получения качественных и количественных показателей эксплуатационной годности здания (сооружения), его частей и конструкций путем визуального осмотра, инструментальных измерений в натуре и лабораторных определений.

**Обследование предварительное** - вид обследования, при котором в качестве основного метода определения показателей эксплуатационной годности используют анализ технической документации и внешний осмотр здания (сооружения) и его частей экспертами. При визуальном обследовании определяют, главным образом, качественные показатели эксплуатационной годности.

**Обследование детальное** - вид обследования, при котором в качестве основного метода определения показателей эксплуатационной годности используют инструментальные тесты конструкций и материалов зданий (сооружений).

**Обследования специальные** - вид обследований, при которых в качестве основных методов определения показателей эксплуатационной годности, используются специальные изыскания, исследования, натурные или модельные испытания и т.п.

**Обследование сплошное** - вид обследования, при котором обследованию подлежат все конструктивные элементы здания (сооружения).

**Обследование выборочное** - вид обследования, при котором обследованию подлежат только отдельные, наиболее изношенные конструктивные элементы здания (сооружения).

**Обследование плановое** - обследование, которое выполняется в сроки, заранее определенные регламентом эксплуатации здания (сооружения).

**Обследование внеочередное** - обследование, которое выполняется вследствие возникновения любых нарушений эксплуатационного регламента.

**Повреждение** - отклонение от первичного уровня качества элементов и конструкций, которое возникает во время его эксплуатации или аварии.

**Паспортизация технического состояния здания (сооружения)** - это обследование, диагностика и оценка технического состояния объекта Специализированной организацией и определение на этом основании категории его технического состояния с последующим составлением Паспорта технического состояния здания (сооружения).

**Расчетная ситуация** - комплекс условий, учитывающихся в расчетах, определяющих расчетные требования к конструкции.

**Ремонт** - комплекс операций по восстановлению состояния объекта и (или) увеличения его долговечности.

**Техническое состояние здания (сооружения)** - совокупность качественных и количественных показателей, которые характеризуют эксплуатационную годность здания и его частей по сравнению с предельно допустимыми значениями.

**Техническое обслуживание** - комплекс мероприятий по контролю и поддержанию работоспособного или исправного состояния, который заключается, как правило, в осмотре, уходе и периодическом ремонте.

**Уровень ответственности зданий (сооружений)** - относительный уровень капитальности зданий (сооружений) в зависимости от их отказов.

**Эксплуатация здания или сооружения** - использование здания (сооружения) согласно его функциональному назначению и проведению необходимых мероприятий для сохранения состояния конструкций, при котором они способны выполнять заданные функции с параметрами, определенными требованиями технической документации.

**Эксплуатация нормальная** - эксплуатация осуществляется (без ограничений) в соответствии с предусмотренными в нормах или заданиях на проектирование технологических или бытовых условий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. Маршалл. Основные опасности химических производств. М.: Мир, 1989.- 670 с.
2. Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. М.: Изд-во ВИНТИ, 1998.- вып. N2.
3. Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. М.: Изд-во ВИНТИ, 1999.- вып. N3.
4. Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. М.: Изд-во ВИНТИ, 1999.- вып. N8.
5. Егоров А.Ф. Савицкая Т.В. и др. Современное состояние проблемы контроля, прогнозирования и управления качеством атмосферного воздуха.- М.: ВИНТИ, вып. N12, 2000.- 73 с.
6. Абросимов А.А. Экологические аспекты производства и применения нефтепродуктов,- Барс.1999.-732 с.
7. Рева Г.В., Врублевський В.К., Ксьонзенко В.П., Мариніч І.В. Український соціум: загрози екстремальних ситуацій. Київ: Інтеллект, 2003.- 432 с.
8. Плотинский Ю.М. Теоретические и эмпирические модели социальных процессов. – М.: Логос,1998.- С.187.
9. Катаев С.Л. Позитивне аспекты трансформационного кризиса// Соціологічна наука і освіта в Україні.-2000.-Вип.1.- С.96.
10. Жулинський М. Україна: перспективи ліберальної демократії// Дзеркало тижня.-2001.-N37/-22-28 вересня.
11. Дзеркало тижня. - 2001.-N39 .- 6-12 жовтня.
12. Rothkopf D/ In Prise of Cultural Smperaism? // Foreign Polisy/-1997.-N107.- Summer.- p.39.
13. Вебер М. История государства: Очерк общей социальной и экономической истории.- Пг: Наука и школа.1923.- С.221.
14. Соціальні ризики та соціальна безпека в умовах природних і техногенних надзвичайних ситуацій і катастроф.- К.: Стилос, 2001.-N4.
15. Стратегічна панорама.- 2002.-N4.

16. Бевзенко Л.Д., Соціальні ризики. Спроба самоорганізаційного погляду// Соціальні ризики та соціальна безпека в умовах природних і техногенних надзвичайних ситуацій та катастроф.- С.73-74.
17. Кинев Ю.Ю. Оценка рисков финансово-хозяйственной деятельности предприятий// Менеджмент в России и за рубежом, 2000.-N5.
18. [WWW.aup.ru](http://WWW.aup.ru) Романов В.С. Понятие риска в экономической деятельности.
19. Альгин А. Риск и его роль в общественной жизни.- С.187.
20. Соціально-економічні наслідки техногенних і природних катастроф: експертне оцінювання/ Відп.ред. Дурдинец В.В., Наєнко Ю.І.-К.: Стилос, 2000.- 260 с.
21. Нейман Дж., Моргенштейн О. Теория игр и экономическое поведение. – М.: Наука, 1960.-526 с.
22. Дзекцер Е. Геологическая опасность и риск (методологическое исследование)// Инженерная геология.- 1992.-N6.- С.3-10.
23. Врублевський В.К., Чурилов М.М., Амалян Н.Д., Мариніч І.В. Звіт про науково-дослідну роботу ”Соціальні аспекти реформування державного управління в Україні”.- 86с.
24. Егоров А.Ф., Савицкая Т.В., Макарова А.С., Разработка моделей оценки риска для предприятий химической промышленности // Химическая промышленность, 1998.- N7.- С. 55-63.
25. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. РД 03-418-01. Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 10.07.01. N30.
26. Э. Дж. Хенлі, Х. Кумамото. Надійнісне проектування технічних систем і оцінка ризику. - Київ.: Вища школа, 1987. - 544с.
27. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Том 1. М.: Мир, 1967.

28. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Кн. 1. Под редакцией К.Е.Кочеткова. М.: Изд-во Ассоц. строит. ВУЗов, 1995. – 319 с.
29. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Кн. 2. Под редакцией К.Е.Кочеткова, В.А. Котляревского и А.В.Забегаева. М.: Изд-во Ассоц. строит. ВУЗов, 1996.- 383 с.
30. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Кн. 3. Под редакцией В.А. Котляревского и А.В.Забегаева. М.: Изд-во Ассоц. строит. ВУЗов, 1998. – 413 с.
31. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Кн. 4. Под редакцией В.А. Котляревского и А.В.Забегаева. М.: Изд-во Ассоц. строит. ВУЗов, 1996.- 203 с.
32. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Кн. 5. Под редакцией В.А. Котляревского и А.В.Забегаева. М.: Изд-во Ассоц. строит. ВУЗов, 2001. – 415 с.
33. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Кн. 6. Под редакцией В.А. Котляревского. М.: Изд-во Ассоц. строит. ВУЗов, 2003. – 406 с.
34. Лесенко Г.Г. Визначення пріоритетних заходів у системі профілактики ризиків смертельних випадків на виробництві. VI – Всеукраїнська науково-практична конференція рятувальників. Актуальні проблеми цивільного захисту. 27-28 жовтня, Київ, 2004.- С.43-44.
35. Костин А.И. Зонирование территории по степени риска поражения людей при авариях на химически опасных объектах// Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях.- 1995.-N12.- С. 32-42.
36. Briges J.W. The Assessment of Toxic Hazards, Institution of Chemical Engineers, Symposium Series.-1985.-N93.-p.413-428.
37. Гохман О.Г. Экспертное оценивание.- Воронеж: Изд-во Воронежского университета, 1991.- 152с.

38. Методики оценки последствий химических аварий на опасных производственных объектах. Сборник документов. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Науч.-техн. центр по безоп. в пром. и Госгортехнадзора России, 2002.- 206 с.
39. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте. РД 52.04.253-90. М.: Госгидромет СССР, 1991.- 23с.
40. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. НПБ 105-95. - М.: ВНИИПО, 1996.- 25с.
41. Методика оценки последствий аварий на пожаро-, взрывоопасных объектах. М.: Министерство РФ по делам ГО, ЧС и ликвидации последствий стихийных бедствий, 1994.- 43с.
42. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливо-воздушных смесей. М.: Ростехнадзор России. НТЦ "Промышленная безопасность", 1996. - 22с.
43. Махутов, Костин "Нормирование степени риска поражения людей при авариях на ХОО"// Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Вып.2,1998.- 85-92с.
44. Охрана труда и экологическая безопасность в химической промышленности: Учебник для вузов/А.С.Бобков, А.А.Блинов, И.А.Родин, Е.И.Хабарова. М.: Химия, 1997.- 400с.
45. Сборник методик №1. М.: Ростехнадзор России. НТЦ "Промышленная безопасность". М., 1999.
46. Егоров В.Ф., Савицкая Т.В., Филиппова Г.В. Экологическая экспертиза// Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ, Вып.1.- 2002.
47. Файнхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход.- М.: Радио и связь, 1988.
48. Грановский Э.А., Лыфарь В.А. Моделирование промышленных аварий. Последствия и риск. Бюлетень пожарной безопасности. (Научно-технические проблемы и решения) №1, 2001.- С.14-16.

49. Грановский Э.А., Лыфарь В.А. Анализ риска возникновения аварий, пожаров и взрывов. Бюлетень пожарной безопасности. (Научно-технические проблемы и решения) №2, 2001. - С.13-15.
50. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. ПБ 09-540-03. Вып.. 11. М: Науч.-техн. центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2004.- 108 с.
51. Декларирование промышленной безопасности опасных производственных объектов. Сборник документов. Вып. 3. Сер. 27. Декларирование промышленной безопасности и оценки риска. М: Науч.-техн. центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2003.- 296 с.
52. Об опыте декларирования промышленной безопасности и развития методов оценки риска опасных производственных объектов. Материалы семинара Госгортехнадзора России. М: Науч.-техн. центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2002.- 128 с.
53. Об опыте декларирования промышленной безопасности и развития методов оценки риска опасных производственных объектов. Материалы тематического семинара. М: Науч.-техн. центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2003.- 90с.
54. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. М.: Химия, 1991.
55. Бейкер У., Кокс П. И др.. Взрывные явления. Оценка и последствий/ Кн.1, Кн.2, Под.ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. М.: Мир, 1986.
56. Methods for the determination of possible damage. Green book/CPR 16E, 1989.
57. Pietersen C.M. Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials// Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1991, Vol.4, №1. – P.136-141.
58. Дранишников Л.В., Найверт А.В. Оценка риска возникновения аварии методами теории надежности. Сб. науч. трудов. Секция строительства,



материаловедения, машиностроения. Вып.28. Днепропетровск.: Приднестр. Гос. академия стр-ва и архитектуры. Междунар. инж. академия, 2004.- С.32-42.

59. Дранишников Л.В., Найверт А.В. Оценка риска возникновения аварии. Міждержавна наукова-методична конференція. Проблеми математичного моделювання. Тези доповідей. Дніпродзержинськ.: вид-во ДДТУ.2004. -С. 56-57.

60. Дранишников Л.В., Найверт Л.И. Оценка риска возникновения аварии. Науковий вісник. УкрНДПБ. 2004, N2(10).- С.31-41.

61. Дранишников Л.В., Найверт А.В., Стоецкий В.Ф. О декларировании безопасности объектов повышенной опасности. Матеріали міжнародної семінар-наради "Охорона праці та промислова безпека на підприємствах НАК Нафтогаз України" Доповідь. АР Крим., с.Партеніт, 2004.

62. Дранишников Л.В., Найверт А.В., Найверт Л.И. К вопросу управления технической безопасностью объектов повышенной опасности. Матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників, м. Київ, 27-28 жовтня 2004 р.

63. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД 86. Л.: Госкомгидромет, 1987. – 94 с.

64. Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами. Л.: Гидрометеиздат, 1986.- 183 с.

65. Тищенко Н.Ф. Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе. Справочник. М.: Химия, 1991. – 364 с.

66. Мастрюков Б.С. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. М.: Изд. центр «Академия», 2003.- 336 с.

67. Елохин А.Н. К вопросу определения критериев приемлемого риска. Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, М.: ВИНТИ, 1994. N8. - С. 42-50.

68. Щебеко Ю.Н., Гордиенко Д.М., Малкин В.Л., Смолин И.М., и др. Оценка индивидуального и социального риска пожаров и взрывов для многотопливной автозаправочной станции// Пожаровзрывобезопасность, №6, 1999.- С.42-47.



**Леонид Васильевич ДРАНИШНИКОВ** – доктор технических наук, профессор, эксперт по промышленной безопасности. Специалист в области системного анализа химико-технологических процессов, опубликована монография ”Системный анализ процессов химической технологии”. Академик Международной академии системных исследований, председатель Восточно-Украинского филиала МАСИ. Имеет 110 научных

публикаций, в том числе и по промышленной безопасности.



**Владимир Михайлович ЖАРТОВСКИЙ** – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, главный научный сотрудник Украинского научно-исследовательского института пожарной безопасности МЧС Украины, специалист в области горения, разработок огнетушащих и огнезащитных составов, автор 180 научных публикаций и 4 монографий.



**Александр Волдемарович НАЙВЕРТ** – генеральный директор ЧПКФ ”Украгротех”, кандидат технических наук, специалист в сфере безопасности промышленных объектов, имеет 23 научных публикаций. Эксперт по промышленной безопасности на взрывопожароопасных, вредных, химических и нефтеперерабатывающих производствах.



**Василий Федорович СТОЕЦКИЙ** – начальник Государственной инспекции гражданской защиты и техногенной безопасности Министерства Украины по вопросам чрезвычайных ситуаций и по делам защиты населения от Чернобыльской катастрофы. Специалист в области техногенной безопасности.



**Алла Дмитриевна ЕСИПЕНКО** - кандидат технических наук, профессор ГАЖКХ, старший научный сотрудник, действительный член Академии строительства Украины. Специалист в области безопасной и надежной эксплуатации зданий и сооружений. Руководитель центра по вопросам строительства, проектирования и эксплуатации промышленных и гражданских зданий. Имеет более 90 научных публикаций.