

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
**Иркутский национальный исследовательский технический университет**

**Институт недропользования**

**Кафедра промышленной экологии и безопасности**  
**жизнедеятельности**

**Тимофеева С.С.**

**Прикладная техносферная рискология**

**Методические указания по выполнению курсовой работы**

для магистрантов, обучающихся

по направлению 20.04.01 «Техносферная безопасность»

Иркутск- 2015

Учебная дисциплина «Прикладная техносферная рискология» является составной частью основной общеобразовательной программы высшего образования по направлению подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность» и включена в профессиональный цикл подготовки магистрантов).

**Цель дисциплины:** формирование у магистрантов базовой профессиональной компетентности - целостного представления о рисках, возникающих при деятельности объектов экономики в штатном режиме и при возникновении нештатных ситуаций, формирование умения на научной основе использовать методы решения оптимизационных задач, связанных с разработкой технологии защиты окружающей среды, научить пользоваться методиками комплексной оценки экологической ситуации и антропо-техногенной нагрузки на окружающую среду.

**Результаты обучения:** у обучающегося формируются компетенции:  
-способность самостоятельно получать знания, используя различные источники информации (ОК-4);  
-способность к анализу и синтезу, критическому мышлению, обобщению, принятию и аргументированному отстаиванию решений (ОК-5);  
-умение анализировать и оценивать потенциальную опасность объектов экономики для человека и среды обитания (ПК 19).

**Цель курсовой работы** – выработка практических навыков прогнозирования техногенного риска путем разработки и системного анализа моделей опасных процессов в техносфере, а также приобретение студентом навыков самостоятельной работы библиографического поиска необходимой литературы с применением фондов библиотеки и систем поиска Интернет-ресурсов, аналитической работы с книгой, периодической литературой с последующей систематизацией изученного материала.

В процессе подготовки и выполнения курсовой работы студент должен:  
*знать:* сущность понятия риска, общие принципы управления риском, методологический аппарат анализа природного и техногенного риска; основные принципы оценки индивидуального и социального рисков, сущность вероятностного метода оценки основных факторов риска;

*уметь:* анализировать и прогнозировать риски на территориях, учитывать риски при планировании деятельности,

*владеть* современными методами и технологиями оценки рисков

Курсовая работа по дисциплине является законченной научно-практической разработкой студента по определённой тематике.

**Этапами** выполнения курсовой работы являются

- подбор и углубленное изучение проектно-конструкторской и эксплуатационно-технической документации и литературы с целью выявления проблемных ситуаций в выбранной отрасли экономики или транспорта;

- сбор и обработка имеющихся статистических данных по аварийности и травматизму с целью количественной оценки соответствующих рисков;

- анализ последствий чрезвычайных ситуаций, включающий

- описание потенциального чрезвычайного происшествия;

- оценку его вероятности;

- количественную оценку возможных последствий, например, проливов и выбросов, обладающий повреждающими свойствами (токсичностью, взрываемостью и т. д.);

- расчет рассеивания выбросов и испарение проливов;

- оценку других повреждающих факторов (радиации, ударной волны, излучении и т. д.);

- суммарную оценку ущерба.

- анализ потенциального территориального риска при аварии или при расширении производства, или при создании нового производства

Студент выбирает одну из предложенных преподавателем тем или самостоятельно формулирует заинтересовавшую его тему. Тему, содержание и план работы согласовывает с преподавателем.

Для поиска материала к курсовой работе использует библиографический фонд библиотеки, периодическую литературу, базу Интернет.

Курсовая работа состоит из двух разделов:

- предмет анализа опасности;

- анализ последствий чрезвычайных происшествий.

## **1. Предмет анализа опасностей**

Объектом анализа опасностей является система «человек–машина–окружающая среда (ЧМС)», в которой в единый комплекс, предназначенный для выполнения определенных функций, объединены и технические объекты, люди и окружающая среда, взаимодействующие друг с другом. Самым простым является локальное взаимодействие, которое осуществляется при контакте человека с техникой в домашних условиях, на работе и во время движения, а также взаимодействие между отдельными промышленными предприятиями. Далее можно выделить межрегиональное и глобальное взаимодействие. Взаимодействие может быть штатным и нештатным.

Нештатное взаимодействие объектов, входящих в систему ЧМС, может выражаться в виде чрезвычайного происшествия. Излагаемый ниже аппарат анализа опасностей построен на следующих определениях [1–6].

*Чрезвычайное происшествие* – нежелательное, незапланированное, непреднамеренное событие в системе ЧМС, нарушающее обычный ход вещей и происходящее в относительно короткий отрезок времени.

*Несчастный случай* – чрезвычайное происшествие, заключающееся в повреждении организма человека.

*Отказ* – чрезвычайное происшествие, заключающееся в нарушении работоспособности компонента системы.

*Инцидент* – вид отказа, связанный с неправильными действиями или поведением человека.

Анализ опасностей делает предсказуемыми перечисленные выше чрезвычайные происшествия и, следовательно, их можно предотвратить соответствующими мерами.

К главным моментам анализа опасностей относится поиск ответов на следующие вопросы.

Какие объекты являются опасными?

Какое чрезвычайное происшествие можно предотвратить?

Какие чрезвычайные происшествия нельзя устранить полностью и как часто они будут иметь место?

Какие повреждения неустранимые чрезвычайное происшествие могут нанести людям, материальным объектам, окружающей среде?

Анализ опасностей описывает опасности качественно и количественно и заканчивается планированием предупредительных мероприятий. Он базируется на знании алгебры логики и события, теории вероятностей, статистическом анализе, требует инженерных знаний и системного подхода.

## **2. Качественный анализ опасностей**

Анализ опасностей позволяет определить источники опасностей, потенциальные нежелательные последствия, чрезвычайные происшествия-инициаторы, последовательности развития событий, вероятности чрезвычайных происшествий, величину риска, величину последствий, пути предотвращения чрезвычайных происшествий и смягчения последствий.

На практике анализ опасностей начинают с грубого исследования, позволяющего идентифицировать в основном источники опасностей. Затем при необходимости исследования могут быть углублены, и может быть проведен детальный качественный анализ. Выбор того или иного качественного метода анализа зависит от преследуемой цели, предназначения объекта к его сложности. Установление логических связей необходимо для расчета вероятностей чепе. Методы расчета вероятностей и

статистический анализ являются составными частями количественного анализа опасностей. Когда удается оценить ущерб, то можно провести численный анализ риска. При анализе опасностей всегда принимают во внимание используемые материалы, рабочие параметры системы, наличие и состояние контрольно-измерительных средств. Исследование заканчивают предложениями по минимизации или предотвращению опасностей.

Качественные методы анализа опасностей включают: предварительный анализ опасностей, анализ последствий отказов, анализ опасностей с помощью дерева причин, анализ опасностей с помощью дерева последствий, анализ опасностей методом потенциальных отклонений, анализ ошибок персонала, причинно-следственный анализ.

Предварительный анализ опасностей (ПАО) обычно осуществляют в следующем порядке:

- изучают технические характеристики объекта, системы, процесса, а также используемые энергетические источники, рабочие среды, материалы; устанавливают их повреждающие свойства;
- устанавливают законы, стандарты, правила, действия которых распространяются на данный технический объект, систему, процесс;
- проверяют техническую документацию на ее соответствие законам, правилам, принципам и нормам стандартов безопасности;
- составляют перечень опасностей, в котором указывают идентифицированные источники опасностей (системы, подсистемы, компоненты), повреждающие факторы, потенциальные чепе, выявленные недостатки.

При проведении ПАО особое внимание уделяют наличию взрывопожароопасных и токсичных веществ, выявлению компонентов объекта, в которых возможно их присутствие, потенциальным чепе от неконтролируемых реакций и при превышении давления. После того как выявлены крупные системы технического объекта, которые являются источниками опасности, их можно рассмотреть отдельно и более детально исследовать с помощью других методов анализа, описанных ниже.

Анализ последствий отказов (АОП) – преимущественно качественный метод идентификации опасностей, основанный на системном подходе и имеющий характер прогноза. Этим методом можно оценить опасный потенциал любого технического объекта. АОП обычно осуществляют в следующем порядке:

- техническую систему (объект) подразделяют на компоненты;
- для каждого компонента выявляют возможные отказы;
- изучают потенциальные чрезвычайные происшествя, которые могут вызвать тот или иной отказ на исследуемом техническом объекте;
- результаты записывают в виде таблицы;
- отказы ранжируют по опасностям, разрабатывают предупредительные меры, включая конструкционные изменения.

Анализ последствий отказов может выявить необходимость применения других, более емких методов идентификации опасностей. Кроме

того, в результате анализа отказов могут быть собраны и документально оформлены данные о частоте отказов, необходимые для количественной оценки уровня опасностей рассматриваемого технического объекта.

### 3. Количественный анализ опасностей

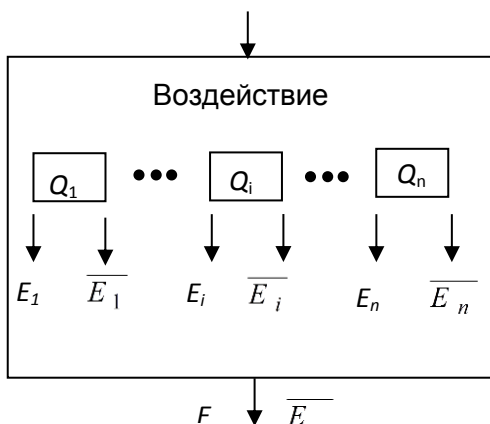


Рис. 1. Схема событий в системе ЧМС

При анализе опасностей сложные системы разбивают на множество подсистем. Подсистемой называют часть системы, которую выделяют по определенному признаку, отвечающему конкретным целям и задачам функционирования системы (например, подсистема управления безопасностью труда). В рамках этих задач подсистема может рассматриваться как самостоятельная система. Таким образом, иерархическая структура сложной системы такая, что позволяет ее разбивать на подсистемы различных уровней, причем

подсистемы низших уровней входят составными частями в подсистемы высших уровней. Подсистемы, в свою очередь, состоят из компонентов – частей системы, которые рассматриваются без дальнейшего членения, как единое целое (рис. 1).

Систему ЧМС, состоящую из компонентов  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  (рис. 1), будем обозначать в виде вектора системы  $Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ . Отклонение компонента  $Q_i$  от нормального функционирования (отказ, авария) есть чрезвычайное происшествие (ЧП)  $E_i$ . ЧП  $E_i (i = 1, n)$  ведут к ненормальному функционированию системы  $Q$ , составляющему суть ЧП  $E$ .

Логический анализ внутренней структуры системы ЧМС и определение вероятности ЧП  $E$  как функции отдельных ЧП  $E_i$ , являются одной из задач анализа опасностей. Чтобы определить эту функцию, введем индикаторы ЧП  $\xi$  и  $\xi_i, i = 1, n$ , которые могут принимать только два значения 1 и 0. Будем полагать, что если ЧП  $E_i$ , относящееся к компоненту  $Q_i$ , произошло, то  $\xi_i = 0$ , а если не произошло, то  $\xi_i = 1$ , т. е. произошло ЧП  $E_i$ . Тогда для системы  $Q$  наступление ЧП  $E$  соответствует  $\xi = 1$ , а наступление ЧП  $E$  означает  $\xi = 0$ . Иначе говоря, имеем вектор индикаторов ЧП

$$\xi_o = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) \quad (1)$$

и следующие соотношения

$$\left. \begin{array}{l} E_i \rightarrow \xi_i = 1 \\ E_i \rightarrow \xi_i = 0 \\ E \rightarrow \xi = 1 \\ E \rightarrow \xi = 0 \end{array} \right\} \quad (2)$$

Если ЧП  $E_i$  наступает с вероятностью  $p_i$ , то, как следует из соотношений, с этой же вероятностью индикатор ЧП  $\xi_i$  принимает значение 1. Поэтому справедливы следующие зависимости

$$\left. \begin{array}{l} p_i = P\{E_i\} = P\{\xi_i = 1\} \\ q_i = P\{\bar{E}_i\} = P\{\xi_i = 0\} = 1 - p_i \\ p = P\{E\} = P\{\xi = 1\} \\ q = P\{\bar{E}\} = P\{\xi = 0\} = 1 - p \end{array} \right\} \quad (3)$$

Логический анализ (3) функционирования системы ЧМС позволяет записать логическую и индикаторную функции системы

$$E = F(E_1, E_2, \dots, E_n) \quad (4)$$

$$\xi = F_\xi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) \quad (5)$$

Применяя правила теории вероятностей, находят вероятность ЧП в виде так называемой функции опасности

$$p = F_p(p_1, p_2, \dots, p_n). \quad (6)$$

Таким образом, состояние системы ЧМС описывается: вектором системы  $Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ , вектором индикаторов чепе  $\xi_o = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ , логической функцией системы  $E = F(E_1, E_2, \dots, E_n)$ , индикаторной

функцией системы  $\xi = F_{\xi}(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ , функцией опасности  $p = F_p(p_1, p_2, \dots, p_n)$ .

На практике часто индикатор и событие обозначают одной и той же буквой. Предположим, что анализ опасностей проводится для таких пространственно крупных систем, как цех или завод. Тогда в большинстве случаев выявленные источники опасностей могут рассматриваться как точечные. Их местоположение можно задать с помощью системы координат. Кроме того, можно допустить, что опасность достаточно полно характеризуется значениями вероятностей ЧП. Эти вероятности можно условно называть «зарядами» опасностей. Заряды опасностей можно связать с системой координат и считать, что они создают вокруг себя поле опасности, напряженность которого характеризуется вероятностью наступления нежелательных последствий. Это позволит не только установить границы опасной зоны, но и произвести ее разметку в зависимости от степени опасности [1].

## 2. АНАЛИЗ ПОСЛЕДСТВИЙ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ ПРОИСШЕСТВИЯХ

### 2.1. Оценка инженерной обстановки

#### в связи с выбросом вредных веществ

Большой класс задач связан с выбросом в атмосферу радиоактивных и других химических веществ. Чтобы оценить последствия такой аварии, необходимо уметь рассчитывать поля концентраций. Если примесь выбрасывается в поток, движущийся с постоянной средней скоростью  $U$  вдоль оси  $OX_1$  декартовой системы координат, то теоретико-вероятностное среднее значение концентрации  $c$  в точке  $X$  в момент времени  $t$

$$c(X, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{t_0}^t \frac{S(x'_1, x'_2, x'_3, t')}{(2\pi)^{V_2}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{X_1 - U\tau - x'_1}{\sigma_1} \right)^2 + \left( \frac{X_2 - x'_2}{\sigma_2} \right)^2 + \left( \frac{X_3 - x'_3}{\sigma_3} \right)^2 \right] \right\} dx'_1 dx'_2 dx'_3 dt', \quad (2.1)$$



где  $S(x', t')$  – производительность источника в точке  $x'$  в момент  $t'$  (единиц примеси на единицу объема за единицу времени);  $\sigma_i = \sigma_i(\tau)$  – стандартные отклонения

$$i = (1, 2, 3; \tau = t - t'); \quad |\sigma| = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3.$$

В табл. 2.1 приведены некоторые решения этого уравнения. В расчетные соотношения входят стандартные отклонения  $\sigma_i$ , которые необходимо предварительно определить. Для стационарных источников значения  $\sigma_2, \sigma_3$  представляют собой характеристики горизонтального (перпендикулярно направлению движения) и вертикального расширения струи. Они задаются в зависимости от расстояния от источника в направлении движения ветра и зависят от устойчивости атмосферы, т. е. ее турбулентности, которая определяет поле ветра, переносящее и рассеивающее примесь. Категории устойчивости даны в табл. 2.2. Значения отклонений приведены на рис. 2.1 для периодов времени порядка 10 мин вблизи поверхности Земли (обычно на высоте  $\leq 10$  м). Скорость ветра  $U$  на высоте  $x_3$  приближенно можно определить по формуле  $U = U_h (x_3 / h)^\alpha$ , где  $U_h$  – скорость ветра на высоте  $h$ ; показатель  $\alpha$ , зависящий от атмосферных условий и шероховатости поверхности, можно принять равным 0,16; 0,28 и 0,4 соответственно для территории открытого пространства, при наличии пригорода и в условиях города.

На рис. 2.2 представлена выбранная система координат.

Таблица 2.1

**Расчетные соотношения для полей концентраций  
от некоторых источников**

Формулировка задачи	Решение
Мгновенный точечный источник выбрасывает инертную примесь в количестве $\Delta S$ (ед. примеси) в момент $t = 0$ в точке $(x_1 \ x_2 \ x_3)$ неограниченного потока, имеющего среднюю скорость $U$ в направлении оси $Ox_1$	$c(X, t) = \frac{\Delta S}{(2\pi)^{3/2}  \sigma } \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{X_1 - Ut - x_1}{\sigma_1} \right)^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{X_2 - x_2}{\sigma_2} \right)^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{X_3 - x_3}{\sigma_3} \right)^2 \right]$ <p>где <math> \sigma  = \sigma_1(t) \sigma_2(t) \sigma_3(t)</math> <span style="float: right;"><b>I</b></span></p>

Окончание табл. 2.1

Формулировка задачи	Решение
Стационарный непрерывный источник производительностью $S^P$ (ед. примеси/ед. времени) действует в точке $(x_1, \ x_2, \ x_3)$	$c(X) = \frac{S^P}{2\pi\sigma_2\sigma_3U} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{X_2 - x_2}{\sigma_2} \right)^2 - \frac{1}{2} \left( \frac{X_3 - x_3}{\sigma_3} \right)^2 \right],$

неограниченной атмосферы. Турбулентная диффузия в направлении средней скорости U пренебрежимо мала	где $\sigma_2$ и $\sigma_3$ – функции расстояния $X_1 - x_1$	II
То же, но с учетом отражения примеси от поверхности земли ( $X_3 = 0$ )	$c(X) = \frac{S^P}{2\pi U \sigma_2 \sigma_3} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{X_2 - x_2}{\sigma_2}\right)^2\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{X_3 - x_3}{\sigma_3}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{X_3 + x_3}{\sigma_3}\right)^2\right] \right\},$ где $\sigma_2$ и $\sigma_3$ – функции расстояния $X_1 - x_1$	III

Таблица 2.2

### Описание категорий устойчивости атмосферы\*

Скорость ветра на высоте 10 м, м/с	Инсоляция** в дневное время			Условия ночью (облачность)***	
	сильная	умеренная	слабая	$\geq 4/8$	$\leq 3/8$
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D****	D	D	D

Примечание. \*A, B, C – атмосфера соответственно сильно, умеренно, слегка неустойчива; D – нейтральная; E, F – слегка и умеренно устойчивая.

\*\* Сильная инсоляция соответствует высоте Солнца  $\varphi \geq 60^\circ$  над горизонтом при ясном небе; слабая инсоляция, если  $15^\circ < \varphi < 35^\circ$ .

\*\*\* Облачность определяется как часть неба над местным видимым горизонтом, покрытая облаками.

\*\*\*\* Нейтральная категория D соответствует также случаю сплошной облачности днем.

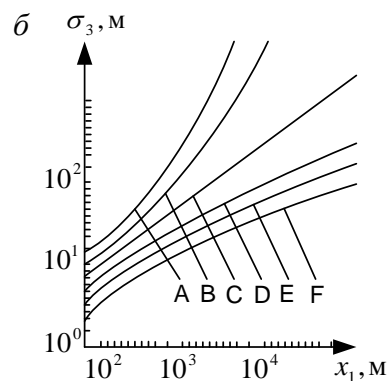
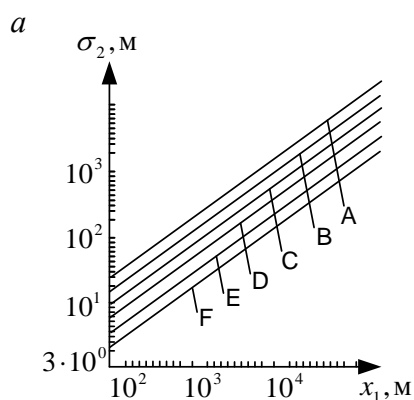


Рис. 2.1. Стандартные отклонения в зависимости от расстояния от источника и категории устойчивости погоды: *a* – для поперечного и горизонтального; *b* – для вертикального распределения концентрации

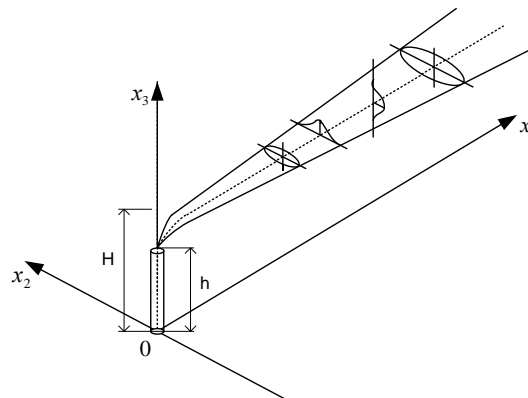


Рис. 2.2. Выбранная система координат

Пример:

Определить максимальную концентрацию на расстоянии 10 км от городского стационарного источника производительностью 4800 г/с, если эффективная высота выброса 250 м, скорость 3 м/с на высоте 10 м, погодные условия – сплошной облачный покров.

Выбрав оси, как показано на рис. 2.2, воспользуемся формулой (III) табл. 2.1, выброс происходит в точке с координатами  $x_1 = 0$ ,  $x_2 = 0$ ,  $x_3 = 250$  м. Максимальная концентрация  $C_m$  на расстоянии  $x_1 = 10 \cdot 10^3$  м достигается на поверхности земли ( $x_3 = 0$ ) по оси струи ( $x_2 = 0$ ). Для условий города  $U = 3(250/10)^{0,4} = 11$  м/с. Время  $\tau = X_1/U = 900$  с, что будем считать близким к периоду времени, для которого справедлива формула. Из табл. 2.2 находим, что сплошной облачный покров соответствует категории D. По рис. 2.2 определяем  $\sigma_2(X_1 = 10 \cdot 10^3 \text{ м}) = 550$  м,  $\sigma_3(X_1 = 10 \cdot 10^3 \text{ м}) = 135$  м. Откуда

$$c_m(X_1 = 10 \cdot 10^3 \text{ м}, 0, 0) = \frac{S^p}{\pi \sigma_2 \sigma_3 U} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x_3}{\sigma_3} \right)^2 \right] =$$

$$= \frac{4800}{\pi 550 \cdot 135 \cdot 11} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{250}{135} \right)^2} \approx 0,337 \text{ мг/м}^3$$

Для определения результатов АПЧ можно использовать как форму табл. 2.3.

Таблица 2.3

## Вариант представления результатов анализа последствий ЧП

Источник опасности	Объект И1	Объект И2
Потенциальное чепе (инициатор)	Пожар	Выброс токсичного вещества
Возможные причины	Возгорания	Разгерметизация системы
Возможные последствия	Авария	Несчастный случай
Контролирующие действия	Возможны	Маловероятны
Шкала ущерба	Миллионы рублей	Миллионы рублей
Основной ущерб	30	4
Сопутствующий ущерб	20	12
Суммарный ущерб U	50	16
Вероятность чепе P	0,001	0,01
Риск R = PU	0,050	0,16
Метод снижения риска	Установка автоматизированной системы пожаротушения	Планирование спасательных действий
Другие данные	Нет	Нет

### 2.2. Оценка инженерной обстановки при чрезвычайной ситуации

Под инженерной обстановкой понимают степень разрушения зданий и сооружений, состояние дорог и проездов, оказавшихся в очаге поражения (ОП). В результате разрушения зданий и сооружений в городах и на объектах образуются сплошные и местные завалы.

Характер завалов определяется, главным образом, высотой зданий, плотностью застройки, шириной улиц и величиной избыточного давления во фронте ударной волны. Ориентировочно высоту завалов можно определить по формуле

$$H_x = H_z(\ell - L_x / L),$$

где  $H_x$  – высота завала на расстоянии  $L_x$  от здания, м;  $H_z$  – высота завала в пределах контура здания, м;  $L$  – дальность разлета обломков, м;  $H_z$  и  $L$  определяют по таблицам в зависимости от давления во фронте ударной волны, этажности зданий и материала, из которого выполнена конструкция здания.

Ориентировочная оценка заваливаемости улиц может быть произведена с помощью данных табл. 2.4, в которой приведены усредненные значения давлений ударной волны, соответствующие образованию на улицах участков сплошных завалов.

В зонах, где избыточное давление во фронте ударной волны меньше значений, приведенных в табл. 2.4, возможно образование местных завалов на улицах и проездах.

1. Определение избыточного давления во фронте ударной волны ( $\Delta P_\phi$ ), при взрыве взрывчатого вещества в зависимости от расстояния

$$\Delta P_{\phi} = 1,06 \frac{\sqrt[3]{C_{\text{эф}}}}{R} + 4,3 \left( \frac{\sqrt[3]{C_{\text{эф}}}}{R} \right)^2 + 14,0 \left( \frac{\sqrt[3]{C_{\text{эф}}}}{R} \right)^3,$$

где  $(\Delta P_{\phi})$  – избыточное давление во фронте ударной волны, кгс/см<sup>2</sup> или кПа;  $R$  – радиус в метрах от центра взрыва до рассматриваемой точки;  $C_{\text{эф}}$  – эффективная масса заряда взрывчатого вещества, приведенного к тротилу (учитывающего качество взрывчатого вещества), в кг.

Таблица 2.4

### Усредненное значение давления ударной волны

Этажность зданий	Значение давления ударной волны, при которых на улицах образуются сплошные завалы (кПа)		
	Внутриквартальные улицы и проезды шириной 10–20 м	Магистральные улицы шириной 20–35 м	Магистральные улицы шириной 40–60 м
2–3	50	90	120
4–5	40	70	110
6–7	30	50	110
8–10	25	40	100

Эффективная масса заряда взрывчатого вещества (ВВ)  $C_{\text{эф}}$ :

$$C_{\text{эф}} = KG,$$

где  $G$  – масса взрывчатого вещества, кг;  $K$  – коэффициент качества взрывчатого вещества.

Коэффициент «К» для гексогена равен – 1,28, для тритонала – 1,53, для аммонита – 0,94, для пикриновой кислоты – 0,97.

2. Радиусы зон разрушений (полных, сильных, средних, слабых) в зависимости от вида и качества взрывчатого вещества

$$R = 0,6 \sqrt{\frac{C_{\text{эф}}}{d}},$$

где  $d$  – толщина стен, м.

Толщину стен принимают:

– для панельных зданий  $d = 0,3$  м;

– для кирпичных зданий  $d = 0,5$  м.

Например, на объекте взорвался вагон с пикриловой кислотой  $G = 20$  т. Здания панельные. Для  $\Delta P_{\phi} = 0,3$ , т. е. для дозы сильных разрушений

$$R = 0,6 \sqrt{\frac{C_{\text{эф}}}{d}} = 0,6 \sqrt{\frac{20000 \cdot 0,97}{0,3}} \approx 153 \text{ м}$$

3. Предполагаемую степень поражения объекта ( $D$ ) можно определить по формуле

$$D = \frac{S_p}{S_o},$$

где  $S_p$  – площадь разрушений, м при определенных значениях  $\Delta P_\phi$  (например  $\Delta P_\phi = 0,3$  кгс/м<sup>2</sup>);  $S_o$  – площадь территории объекта, м<sup>2</sup> (например – 300000 м<sup>2</sup>).

При этом:  $S_{0,3} = \pi R_{0,3}^2 = 3,14 \cdot 153^2 = 73504$  м<sup>2</sup>.

Тогда

$$D = \frac{S_{0,3}}{S_o} = \frac{73504}{300000} = 0,24 \cdot$$

Исходя из таблицы, имеем среднюю степень разрушения

Степень поражения	Зоны разрушений
$D < 0,2$	Слабые
$D > 0,2-0,5$	Средние
$D > 0,5-0,8$	Сильные
$D > 0,8$	Полные

### 2.3. Оценка уровня воздействия взрыва на объектах добычи, сбора и транспорта нефти и газа

Практически на всех объектах добычи, сбора и транспорта нефти и газа обращается большое количество горючих газов и жидкостей. Длительная эксплуатация таких объектов, интенсификация производства, снижение дисциплины и квалификации обслуживающего персонала повышают риск возникновения крупномасштабных аварий. Для принятия мер по снижению их опасности необходимы эффективные методики по определению взрывоопасности этих объектов и расстояний от эпицентра взрыва, при которых достигаются уровни выбранного энергетического воздействия [7–10]. В связи с тем, что объекты добычи, хранения и транспорта нефти и газа содержат не только взрывоопасные горючие газы и жидкости, но и жидкости, которые в большинстве случаев только горят, а не взрываются, то это накладывает повышенные требования на методики: требуется учитывать не только взрыво-, но и пожароопасность. Аварии на таких объектах характеризуются большими зонами поражения от теплового воздействия при горении разливающейся горючей жидкости [8].

Численное моделирование различных сценариев аварии позволит оценить возможный уровень воздействия на персонал и окружающую среду при аварии на объектах, которые могут характеризоваться различными факторами опасности.

Приведены на основании [8] расчеты по оценке энергетического уровня воздействия на персонал и окружающую среду при реализации аварии со взрывом на типичных объектах добычи, сбора и транспорта нефти и газа.

Вычисления проводились по двум известным методикам: по методике определения значений энергетических показателей взрывоопасности технологических объектов (стадий блоков), используемой в «Общих

правилах взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», и по математическим моделям оценки опасности от взрыва облака паровоздушной смеси, опубликованным в «Руководстве по оценке опасности в промышленности» Мирового Банка.

### 2.3.1. Принятые допущения при расчете по методике энергетических показателей взрывоопасности

При расчетах энергетического потенциала для аварийных ситуаций на блоках было учтено наличие двух и более различных веществ. Было принято, что плотность смеси жидкости равна отношению массы всей жидкой фазы (ЖФ) к объему, занимаемому этой ЖФ при отсутствии смешения. Удельную теплоемкость смеси считали пропорциональной массовым долям теплоемкостей исходных составляющих смеси. Удельная теплота сгорания определялась аналогично теплоемкости. Молекулярный вес рассчитывался так же, как для газовой смеси.

Температуру кипения и теплоту парообразования задавали из эмпирических данных.

Если компоненты в блоке не перемешаны, расчет производится отдельно для каждого компонента, а затем общий энергетический потенциал получают путем суммирования энергии сгорания по всем компонентам. При расчете генерации пара за счет теплопритока от непрекращающихся химических реакций, а также от внешних теплоносителей, предполагается, что вся поступившая от них энергия равномерно распределяется по всему объему, занимаемому ЖФ, т. е. доля энергии, приходящейся на то или иное индивидуальное вещество, находящееся в аварийном блоке, пропорциональна объемной доле того же вещества.

Кроме того, при задании сценария пролива нескольких жидкостей с различными физико-химическими свойствами предполагается, что площадь поверхности, с которой происходит испарение, для каждого компонента, попавшего в окружающую среду, также пропорциональна объемным долям соответствующих ЖФ. Аналогичные предположения распространяются и на площадь контакта с твердой поверхностью.

### 2.3.2. Результаты расчетов по методике энергетических показателей взрывоопасности

В качестве типичных объектов резервуарного парка при проведении расчетов по оценке энергетического (ударного) уровня воздействия на персонал и окружающую среду при реализации аварии со взрывом были выбраны резервуары РВС-5000 (сборный, сырьевой, остаточный), РВС-10000 (товарный), низкотемпературный резервуар для широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ), резервуары для ГСМ вместимостью 100, 500 и 1000 м<sup>3</sup>.

Расчеты, проведенные для объектов товарного парка, показали, что при взрыве газопарового облака, образующегося при аварии на резервуаре для ШФЛУ, (низкотемпературный) вместимостью 50 000 м<sup>3</sup> при температуре окружающей внешней среды – 40,0 и 20 °С, радиусы поражения практически не зависят от температуры. Тротиловый эквивалент аварийного взрыва в зависимости от давления, количества ШФЛУ в резервуаре, площади разлива жидкости и времени до момента инициирования взрыва в газопаровом облаке может изменяться от нескольких десятков до нескольких сотен тонн. При этом следует отметить, что энергетические показатели опасности снижаются при уменьшении давления и количества ШФЛУ в резервуаре. При увеличении содержания легких углеводородов в составе ШФЛУ эти показатели возрастают.

При расчетах энергетического потенциала в качестве типичных размеров объектов газопроводов, продуктопроводов и конденсатопроводов приняты следующие размеры: длина 10 км, диаметры соответственно 1000–1400, 700 и 400 мм. В качестве стандартной модели при расчете трубопровода принимался аварийный блок (труба данного диаметра длиной 10 м), к которому подсоединены два смежных блока (трубопровода) длиной по 5 км. Такая модель наиболее правильно описывает типичные аварии на трубопроводах.

Расчеты показали, что наиболее опасны по взрыву газопаровых облаков продуктопроводы, затем газопроводы, и наименее опасны конденсатопроводы. При этом следует отметить, что все эти объекты 1 категории опасности, и тротиловый эквивалент от их взрыва может составлять от десятков до сотен тысяч тонн.

### 2.3.3. Краткое описание моделей оценки опасности

Метод анализа пожаровзрывоопасности технологических объектов, разработанный Мировым Банком и Интернациональной финансовой корпорацией для оценки взрывоопасности, использует соотношения между определенными уровнями опасности для зданий и расстоянием от места взрыва известной энергии.

Максимальный радиус, на котором ущерб с номером  $n$  будет наблюдаться, равен

$$r(n) = C(n) (\eta E)^{1/3},$$

где  $C$  – коэффициент, соответствующий радиусу разрушения;  $E$  – теоретическое значение энергии;  $\eta$  – эффективность взрыва.

Определяют четыре уровня ущерба, которые характеризуются следующими значениями приведенного радиуса.

1. Сильный ущерб зданиям и оборудованию,  $C(1) = 0,06$ .
2. Поддающиеся ремонту повреждения зданий и наружные повреждения жилищ,  $C(2) = 0,15$ .
3. Повреждения стекол с образованием ранящих осколков,  $C(3) = 0,3$ .



4. Повреждение 10 % стекол в окнах,  $C(4) = 0,4$ .

Эта модель получена аппроксимацией данных относительно взрывов с энергией до 5 000 000 МДж, что соответствует массе типичного горючего в  $10^5$  кг.

Эффективность – произведение двух сомножителей, один из которых – доля энергии взрыва, переходящая в механическую энергию. Обычно принимается равным 0,33. Другой учитывает непрерывность распределения концентрации горючего в облаке. Если горение близко к изобарическому (медленное горение), то второй сомножитель равен 0,18, если к изохорическому – то 0,33. Как правило, используется второе значение, так что выбирается общее значение  $\eta = 0,109$ .

В расчетах оценки опасности по моделям Мирового Банка из «Руководства по оценке опасности в промышленности» приняты следующие эмпирические формулы для расчета размера, длительности и интенсивности теплового излучения огненного шара горючей жидкости и (или) пара:

– максимальный радиус шара, рассчитываемый по этой модели

$$r = 2,665M^{0,327},$$

– длительность горения

$$t = 1,089M^{0,327},$$

– эффективная энергия

$$Q = \eta M^{0,637} / 1,089,$$

где  $M$  – масса вещества.

Тепловой поток на данном расстоянии от центра огненного шара рассчитывался по предположению, что его интенсивность падает обратно пропорционально квадрату расстояния.

В расчетах оценки опасности по моделям Мирового Банка из «Руководства по оценке опасности в промышленности» приняты следующие эмпирические формулы для расчета процесса горения жидкости при проливе.

Для жидкости, имеющей точку кипения выше температуры окружающего воздуха, скорость сгорания на единице площади

$$m = 0,001H_c / [C_{PL}(T_A - T_B) + H_{VAP}];$$

для жидкости с температурой кипения ниже температуры воздуха

$$m = 0,001H_c / H_{VAP},$$

где  $H_c$  – теплота сгорания;  $C_{PL}$  – удельная теплоемкость жидкости;  $T_A$  – температура в блоке;  $T_B$  – температура воздуха;  $H_{VAP}$  – энтальпия парообразования.

Выделяющееся при этом тепло рассчитывалось по формуле

$$Q = r^2 m \eta_i I_c / (72m^{0,61} + 1),$$

что соответствует модели, предложенной фирмой TNO.

Коэффициент эффективности  $\eta$ , как показывают опыты, приблизительно равен 0,35.

Высота пламени определяется по формуле

$$H = 84r \left[ m / D (gr)^{1/2} \right]^{0,61}$$

где  $r$  – радиус зеркала лужи;  $m$  – масса выброшенного вещества;  $D$  – плотность вещества;  $g$  – ускорение свободного падения.

Однако высота пламени не использовалась при расчете интенсивности теплового излучения на данном расстоянии от центра пламени. В расчетах пламя рассматривалось как точечный источник.

Следует также отметить, что модель точечного источника не годится для расчета интенсивности теплового излучения вблизи границы пожара, а рассчитанные по ней уровни излучения будут завышенными. Она не позволяет также учитывать влияние ветра. При сильном ветре наклон пламени будет значителен, что приведет к повышению уровней радиации в направлении ветра и уменьшению их с подветренной стороны.

Приведены значения теплового излучения ( $\text{кВт/м}^2$ ), которые можно ориентировочно рассматривать как критические при любом анализе опасных последствий:

- 0,7 – покраснение кожи и ожоги при длительном воздействии;
- 1,75 – болевой порог достигается через 60 с;
- 2,0 – повреждение полихлорвиниловой изоляции;
- 5,0 – болевой порог достигается через 15 с;
- 6,4 – болевой порог достигается через 8 с, ожоги второй степени через 20 с;
- 9,5 – болевой порог достигается через 6 с;
- 10,4 – болевой порог достигается через 3 с;
- 12,0 – загорается полиметилен;
- 15,0 – предел для строительных материалов класса 2;
- 16,0 – тяжелые ожоги через 5 с;
- 17,0 – загорается поликсиметилен;
- 25,0 – при длительном воздействии загорается дерево;
- 30,0 – предел для строительных материалов класса 1;
- 52,0 – самовозгорание листовой фибры через 5 с.

Степень опасности – функция потока теплового излучения и длительности его воздействия, что справедливо как для воздействия на здания и сооружения так и на персонал.

Вероятность поражения людей можно вычислить по уравнению

$$\text{Вероятность} = -14,9 + 2,56 \ln(tQ^{1/3} 10^{-4}),$$

где  $Q$  – дано в Вт, а  $t$  – в с. Из этого уравнения можно получить величину длительности излучения, вызывающую фатальные последствия (табл. 2.5).

Таблица 2.5

**Данные времени излучения для заданного процента фатальных исходов**

Поток тепла, $\text{кВт/м}^2$	Время излучения (с) для заданного % фатальных исходов		
	1 %	50 %	99 %

12.75	30	80	200
37,5	8	20	50

Следовательно, как видно из данных табл. 2.5, при возникновении горения желательнее укрыться в течение нескольких секунд.

#### 2.3.4. Результаты расчетов по моделям оценки опасности

Расчеты по оценке энергетического уровня воздействия на персонал и окружающую среду при реализации аварии с пожаром производились на объектах резервуарного парка.

В табл. 2.6 приведены усредненные обобщенные результаты расчетов по радиусам воздействия для рассмотренных объектов.

Для хранения и подготовки ШФЛУ с последующей откачкой в продуктопровод используется резервуарный парк ТП-2. Его характеристики – шаровой резервуар Е-901-1-12, объем  $V = 600 \text{ м}^3$ , диаметр 10500 мм, материал 09Г2С,  $P = 1,2 \text{ МПа/м}^2$ , температура летом  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , зимой –  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , объем и радиус обваловки соответственно  $11\,500 \text{ м}^3$  и 25 м. ШФЛУ на 77 % по весу состоит из пропана и бутана.

В расчетах принято, что площадь зеркала пролива горючей жидкости равна  $1962,5 \text{ м}^2$  максимальная масса ШФЛУ – 362 т.

В качестве горючего были приняты пропан, бутан, пентан (теплота сгорания –  $46\,000 \text{ кДж/кг}$ ) и модельная ШФЛУ (теплота сгорания –  $33000 \text{ кДж/кг}$ ).

Были промоделированы следующие случаи: горение пролившейся жидкости, горение испарившейся жидкости (облака), взрыв облака.

Расчеты показывают, что состав горючего незначительно влияет на радиусы различных уровней термического поражения (воздействия): они отличаются примерно на 10 %. Изменение состава горючего оказывает большее влияние на радиусы поражения различных уровней ударного воздействия, в этом случае отличия составляют около 40 %.

Для данного технологического объекта типичные радиусы огненных шаров при горении облаков испарившейся жидкости равны 170–175 м, а время горения – около 70 с.

Таблица 2.6

#### Результаты расчетов воздействия пожаров на окружающую среду и персонал

Объект	Радиусы поражений при взрыве парового облака, км	Расстояния для различных уровней теплового воздействия излучения ( $\text{кВт/м}^2$ ) при горении облака, км	Расстояния для различных уровней теплового воздействия излучения ( $\text{кВт м}^2$ ) при горении бассейна с горючим, км

	разрушение зданий	поражение персонала	травмирование персонала	повреждение остекления до 10 %	37,5	12,5	4,0	37,5	12,5	4,0
РШ-600	0,3	0,6	1,6	4,3	0,3	0,6	1,0	0,05	0,09	0,16
РВС-5000	1,0	2,1	5,4	14,4	0,6	1,1	2,0	0,06	0,105	0,18
ИТХ	1,6	3,2	8,0	21,0	0,95	1,6	2,9	0,19	0,33	0,58

При горении пролившейся жидкости высота пламени в зависимости от состав смеси изменялась от 47 до 75 м, а время горения соответственно от 1 ч до 30 мин. С увеличением температуры окружающей среды (лето) высота пламени увеличивалась на 20 %, а зона поражения – на 10 %.

Для изотермического хранилища (ИТХ) с его характеристиками – изотермический резервуар Т-1001, объем  $V = 53\,908\text{ м}^3$ , диаметр 51 816 мм, высота = 25 564 мм, материал корпуса А337-1, крыши 537-1,  $P = 11\text{ кПа/м}^2$ , температура зимой – 40 °С, объем, обвалования 64 800  $\text{м}^3$ , ширина 10 м, длина 200 м. ШФЛУ на 77 % по весу состоит из пропана и бутана.

В расчетах площадь зеркала пролившейся горючей жидкости равна 36 000  $\text{м}^2$ , максимальная масса ШФЛУ – 10 000 т.

Ожидаемые радиусы огненных шаров при горении таких облаков испарившейся жидкости составляют для данного технологического объекта 0,5 км, а время горения около 3,5 мин.

В расчетах площадь зеркала пролившейся нефти принята 4000  $\text{м}^2$ , максимальная масса нефти – 3000 т.

При горении пролившейся нефти высота пламени 100 м, а время горения около 2 ч 20 мин.

Для данного технологического объекта типичные радиусы огненных шаров при горении облаков испарившейся жидкости равны 170–175 м, а время горения – около 70 с.

На рис. 2.3 приведен график изменения максимального расстояния, на котором достигается уровень теплового воздействия 37,3  $\text{кВт/м}^2$  в зависимости от мощности выброса из резервуара при горении длительно истекающей нефти.

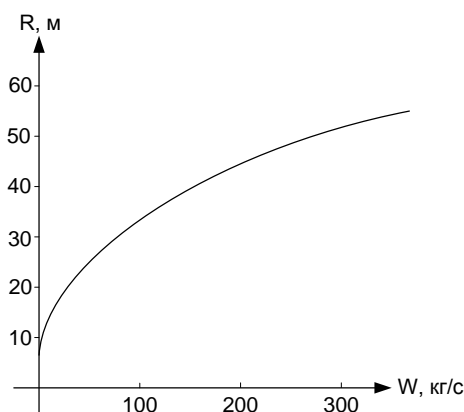


Рис. 2.3. График изменения максимального расстояния  $R$ , на котором достигается уровень теплового воздействия 37,3

кВт/м<sup>2</sup>, от мощности  $W$  выброса из резервуара при горении длительно истекающей нефти

Из графика видно, что данная зависимость при мощности выброса более 250 кг/с асимптотически приближается к предельному значению, полученному для случая мгновенного пролива нефти.

Следует отметить, что при существующих в настоящее время расстояниях между резервуарами есть опасность развития аварии на ближайших резервуарах, даже при мощности выброса до 30 кг/с на одном из них.

Чтобы уменьшить последствия от взрывов газопаровых облаков на продукто-, газо- и конденсатопроводах следует провести комплекс мероприятий по их оснащению системами быстрого обнаружения аварийных утечек продуктов, локализации поврежденных участков и прекращению подачи продукта к ним [1–8].

Для уменьшения взрывоопасности резервуаров ГСМ перед их заполнением продуктом из резервуаров следует вытеснять окислитель (кислород воздуха) до концентрации ниже пределов взрываемости паров горючего (бензина, дизтоплива), а при уменьшении уровня горючего в резервуарах – исключить поступление в них воздуха из окружающей среды.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безопасность жизнедеятельности [текст] : учеб. для вузов / С. В. Белов [и др.] ; под общ. ред. С. В. Белова. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Высш. шк., 1999. – 448 с.
2. Защита населения и территории в чрезвычайных ситуациях [текст] : учебное пособие / В. П. Журавлев [и др.]. – Изд-во АСВ, 1999. – 376 с.
3. Методика прогнозирования масштабов заражения СДЯВ при авариях на химических объектах. Штаб ГО. – М. : Госкогидромет, 1990. – 47 с.
4. Мясников, В. В. Методика оценки обстановки на промышленных предприятиях при ЧС [текст] / В. В. Мясников. – М. : Москва, 1993. – 51 с.
5. Балюк, А. А. Пожарная безопасность на железнодорожном транспорте [текст] : учеб. пособие / А. А. Балюк. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2000. – 92 с.
6. Балюк, А. А. Повышение безопасности эксплуатации железнодорожных путевых машин тяжелого типа : моногр. / А. А. Балюк, В. Д. Катин. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – 140 с.
7. Радзиевский, С. И. Пожаробезопасность и противопожарная защита кораблей [текст] / С. И. Радзиевский, В. М. Хнычкин. – Л. : Судостроение, 1987. – 200 с.
8. Михалкин, Ю. А. Оценка уровня воздействия взрыва на объектах добычи, сбора и транспорта нефти и газа [текст] / Ю. А. Михалкин // Безопасность труда в промышленности. – 1993. – № 3. – 4 с.
9. Черноруцкий, И. Г. Оптимальный параметрический синтез: электротехнические устройства и системы [текст] / И. Г. Черноруцкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1987.
10. Черноруцкий, И. Г. Методы оптимизации и принятия решений [текст] : учеб. пособие / И. Г. Черноруцкий. – СПб. : Лань, 2001.