

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

В.Г. Шаптала, В.Ю. Радоуцкий, В.В. Шаптала

Основы моделирования чрезвычайных ситуаций

Учебное пособие



**Белгород
2010**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

В.Г. Шаптала, В.Ю. Радоуцкий, В.В. Шаптала

Основы моделирования чрезвычайных ситуаций

Допущено Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию в качестве учебного
пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по направлению 280100 «Безопасность жизнедеятельности»,
специальности 280103 «Защита в чрезвычайных ситуациях»

**Белгород
2010**

УДК 614.8:519.6
ББК 68.9:22.19
Ш24

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. *Н. В. Нестерова*
(Белгородская государственная сельскохозяйственная академия)
д-р физ.-мат. наук, проф. *Н. А. Чеканов*
(Белгородский государственный университет)

Шаптала, В.Г.

Ш24 Основы моделирования чрезвычайных ситуаций: учеб. пособие / В. Г. Шаптала, В. Ю. Радоуцкий, В. В. Шаптала; под общ. ред. В. Г. Шапталы. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – 166 с.

ISBN 978-5-361-00135-4

В пособии рассмотрены методы математического моделирования и прогнозирования обстановки при возникновении чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Издание предназначено для студентов специальностей 280103 – Защита в чрезвычайных ситуациях, изучающих дисциплины «Моделирование и прогнозирование чрезвычайных ситуаций» и «Информационные технологии в ЧС».

УДК 614.8:519.6
ББК 68.9:22.19

ISBN 978-5-361-00135-4

© Белгородский государственный технологический университет (БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2010

ВВЕДЕНИЕ

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

Причинами ЧС являются опасности:

- природные (включая биологические и космические);
- техногенные (пожары, взрывы, аварии);
- социальные (войны, терроризм, экстремизм, криминальные проявления).

По данным ООН в результате стихийных бедствий в 2008 году в мире погибли 236 тыс. человек. Экономические убытки от разгула стихии составили в общей сложности 181 млрд долларов. Миллионы людей получили травмы, были вынуждены покинуть свои дома или испытали на себе другие последствия от землетрясений, ураганов, наводнений и засух.

В настоящее время на территории Российской Федерации эксплуатируется около 8 тыс. взрывопожароопасных объектов, более 1,5 тыс. ядерно- и радиационно-опасных объектов, свыше 2,5 тыс. химически опасных объектов, более 29 тыс. напорных гидротехнических сооружений. В зонах вероятного воздействия поражающих факторов аварий и катастроф, которые могут произойти на этих потенциально опасных объектах, проживает свыше 100 млн граждан России.

Ежегодно в РФ происходит порядка 2,5 тыс. ЧС техногенного характера, в результате которых гибнет свыше 50 тыс. людей и более 250 тыс. человек получают увечья. В связи с этим очевидна необходимость постоянной и повсеместной деятельности, направленной на защиту населения и территорий России от аварий и катастроф, снижение рисков ЧС и смягчение их последствий.

Основой этой деятельности является ряд федеральных законов и подзаконных актов по обеспечению безопасности России в условиях природных, техногенных и социальных угроз.

Безопасность – это такое состояние человеческой деятельности, при которой с определенной вероятностью исключается реализация потенциальной опасности. Однако, имеет место аксиома: всякая

деятельность людей потенциально опасна. Критерием, т.е. количественной оценкой опасности, является риск.

Практика показывает, что применявшаяся ранее концепция безопасности, исключавшая любые проявления опасности (концепция нулевого риска) оказалась несостоятельной. В настоящее время основной концепцией безопасности является концепция оправданного риска, т.е. риска, который при имеющихся экономических возможностях и общественных отношениях считается допустимым для обычных граждан.

Важным направлением повышения эффективности защитных мероприятий является математическое моделирование ЧС и прогнозирование их последствий, однако учебно-методической литературы по этим вопросам крайне недостаточно. Настоящее учебное пособие, восполняющее в определенной мере этот пробел, предназначено для использования в учебном процессе, курсовом и дипломном проектировании, а также научной работе студентов специальностей 280103 – Защита в чрезвычайных ситуациях и 280104 – Пожарная безопасность.

Глава 1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

1.1. Математическое моделирование, как инструмент анализа и прогнозирования чрезвычайных ситуаций

Характерные особенности чрезвычайных ситуаций (ЧС), такие как внезапность возникновения, быстрота развития, неполнота и неопределенность исходной информации, разнообразие и цепной характер последствий затрудняют использование для их изучения традиционных эмпирических методов.

В связи с этим, для анализа и прогнозирования чрезвычайных ситуаций все шире применяется математическое моделирование, которое является во многих случаях единственно допустимым, как, например, при экспертизе особо опасных природных или техногенных явлений.

Математической моделью ЧС называется система соотношений, уравнений, неравенств, геометрических понятий и т.д., которые в математической форме отображают, воспроизводят или имитируют наиболее важные особенности и свойства реальных опасных явлений с целью анализа и прогнозирования их возникновения, развития и последствий.

Особенности математической модели во многом определяются типом моделируемой ЧС. Все ЧС можно разделить на природные, техногенные и социально-политические.

К природным ЧС относятся такие стихийные бедствия, как землетрясения, извержения вулканов, цунами, наводнения, ураганы, лавины, оползни, засухи, лесные пожары и др.

Техногенные (технологические) ЧС связаны с авариями на энергетических и промышленных объектах, а также транспортные катастрофы, которые сопровождаются взрывами, пожарами, химическим и радиоактивным заражением территорий.

К социально-политическим ЧС относятся войны, пограничные конфликты, терроризм, диверсии, саботаж.

К комбинированным природно-техногенным и природно-социальным ЧС относятся просадки грунтов, эпидемии, эпизоотии (инфекционные заболевания животных), эпифитотии (инфекционные болезни сельскохозяйственных культур) и др.

Все перечисленные выше ЧС могут быть исследованы методами математического моделирования. Замена реальной ЧС ее

воображаемым виртуальным образом – математической моделью дает возможность безболезненно, сравнительно быстро и с минимальными затратами исследовать все мыслимые сценарии возникновения и развития ЧС, а также прогнозировать ее последствия.

Создание математической модели ЧС включает в себя несколько этапов. Начальным этапом является содержательное описание ЧС, которое составляется на основе всех имеющихся о ней знаний, результатов натурных обследований сходных ситуаций, консультаций с экспертами, изучения справочной и специальной литературы.

На втором этапе выполняется формализация содержательного описания модели, математическая постановка задачи с указанием всех необходимых исходных данных и искомых величин.

На третьем этапе формализованная схема ЧС должна быть преобразована в ее математическую модель. Для этого всю имеющуюся информацию необходимо выразить с помощью соотношений, неравенств, уравнений, алгоритмов. Уравнения, входящие в модель, дополняются начальными и граничными условиями, а также неравенствами, определяющими область допустимых значений вычисляемых величин.

На четвертом этапе, исследуется сама модель. Путем проведения многовариантных расчетов изучаются свойства модели и ее поведение при различных условиях.

На следующем этапе модель применяется к описанию реальных ЧС. Путем сопоставления результатов вычислительных экспериментов с имеющимися опытными данными выполняется идентификация или уточнение параметров модели, ее тестирование, отладка и проверка адекватности.

После того, как адекватность модели, т.е. ее достаточное соответствие реальности, установлена, начинается использование модели для анализа и прогнозирования ЧС, происходящих в реальных условиях.

Схема построения математической модели приведена на рис. 1.1.

Необходимым условием получения достаточно точной и надежной математической модели ЧС является проверка ее адекватности.

Предположим, что математическая модель поражающего воздействия y некоторого фактора ЧС имеет вид:

$$y_x = \varphi(x, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p), \quad (1.1)$$

где x – интенсивность этого фактора, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ – p параметров модели, которые предварительно задаются или определяются по опытными данным методом наименьших квадратов.



Рис. 1.1. Схема построения математической модели

Проверка адекватности математической модели осуществляется путем сравнения модельных (расчетных) значений y_{xi} с эмпирическими значениями y_i , найденными на m различных уровнях независимой переменной x_i , где $i = 1, 2, \dots, m$.

Простейшей предварительной мерой соответствия математической модели реальной ситуации является относительное среднее квадратическое отклонение расчетных данных от опытных:

$$\tilde{\Delta} = \frac{S_e}{\bar{y}}, \quad (1.2)$$

где $\bar{y} = \left(\sum_{i=1}^m y_i \right) / m$ – среднее значение опытных данных,

$$S_e = \sqrt{\frac{Q_e}{m-p}}, \quad Q_e = \sum_{i=1}^m (y_i - y_{xi})^2, \quad (1.3)$$

p – число параметров модели.

Удовлетворительным можно считать значение $\tilde{\Delta} \leq 0,1-0,2$.

Более полную оценку адекватности математической модели можно получить с помощью критерия Вилкоксона-Манна-Уитни. Для проверки гипотезы о статистической однородности выборок модельных y_{xi} и эмпирических значений исследуемой характеристики ЧС из этих выборок составляется общий вариационный ряд и подсчитывается величина

$$S = \sum_{i=1}^m R_i, \quad (1.4)$$

где R_i – ранги, т.е. порядковые номера экспериментальных значений y_i в общем вариационном ряде.

При объемах выборок $m > 8$ распределение случайной величины S близко к нормальному распределению с параметрами:

$$m_s = \frac{m(2m+1)}{2}, \quad \sigma_s = \sqrt{\frac{m^3}{6}}. \quad (1.5)$$

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ критическая область для гипотезы об однородности теоретической и экспериментальных выборок определяется неравенствами:

$$S \leq m_s - 1,96\sigma_s, \quad S \geq m_s + 1,96\sigma_s. \quad (1.6)$$

Если значение S не попадает в критическую область, то обе выборки однородны, т.е. принадлежат одной и той же генеральной совокупности и поэтому математическую модель следует признать адекватной.

Если условия позволяют на каждом из m уровней независимой переменной x выполнить по n параллельных опытов (наблюдений), результаты которых образуют матрицу наблюдений (y_{ij}) , то появляется

возможность выполнить дисперсионный анализ расчетных и эмпирических данных. Для этого на каждом уровне независимой переменной x_i вычислим групповые средние значения y_i :

$$y_i = \frac{\sum_{j=1}^n y_{ij}}{n}, \quad (1.7)$$

по которым найдем общее среднее значение \bar{y} :

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^m y_i}{m} \quad (1.8)$$

и заполним таблицу результатов дисперсионного анализа (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Результаты дисперсионного анализа расчетных и эмпирических данных

Составляющие дисперсии	Суммы квадратов	Числа степеней свободы	Средние квадраты
Общая	$Q = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2$	$f = m - 1$	$S^2 = \frac{Q}{m - 1}$
Дисперсия воспроизводимости опытных данных	$Q_{\text{воспр}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_i)^2$	$f_{\text{воспр}} = m(m - 1)$	$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{Q_{\text{воспр}}}{m(m - 1)}$
Дисперсия, обусловленная моделью	$Q_R = \sum_{i=1}^m (y_{xi} - \bar{y})^2$	$f_R = p - 1$	$S_R^2 = \frac{Q_R}{p - 1}$
Остаточная дисперсия	$Q_e = \sum_{i=1}^m (y_i - y_{xi})^2$	$f_e = m - p$	$S_e^2 = \frac{Q_e}{m - p}$

Прогностическую способность математической модели можно оценить с помощью коэффициента детерминации:

$$R^2 = \frac{Q_R}{Q}. \quad (1.9)$$

Если величина R^2 близка к единице, то математическая модель удовлетворительно описывает зависимость исследуемой характеристики ЧС от независимой переменной x .

Проверка соответствия математической модели реальной ЧС выполняется с помощью критерия Фишера. Если выполняется условие:

$$F = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{S_e^2} > F_{\alpha; f_{\text{воспр}}; f_e}, \quad (1.10)$$

где $F_{\alpha; f_{\text{воспр}}; f_e}$ – табличное значение критерия Фишера, то модель на уровне значимости α следует признать адекватной.

Одна и та же ЧС может быть описана различными моделями. Это связано не только с различной степенью детализации и точности исследования, но и с многообразием типов математических моделей.

По типу используемых математических средств различают линейные и нелинейные, детерминированные и стохастические, дискретные и непрерывные, стационарные и нестационарные и другие типы моделей.

По способу представления объекта моделирования модели можно разделить на концептуальные, структурные, функциональные, параметрические и другие типы.

Концептуальная модель – это идеализированная умозрительная схема моделируемой ситуации или процесса, основанная на определенном способе понимания или трактовки явления. При построении концептуальной модели используются готовые структурные элементы, понятия и методы, разработанные в механике, физике, химии и других фундаментальных науках. Например, при моделировании взрыва конденсированных взрывчатых веществ в открытом пространстве в качестве концепции был принят широко используемый в механике закон подобия, согласно которому давление во фронте воздушной ударной волны является однозначной функцией приведенного расстояния $\bar{R} = R/\sqrt[3]{Q}$, где R – расстояние, м; Q – тротиловый эквивалент заряда взрывчатого вещества, кг. На основе этой концепции М.А. Садовский вывел свою формулу (см. п. 3.1),

которая является одной из основных математических моделей взрыва. Важным достоинством этой модели является возможность рассматривать с единой точки зрения взрывы различной природы и масштабов.

Структурные модели представляют моделируемое опасное явление как систему со своей структурой и механизмом функционирования. Необходимость построения именно такой модели возникает, например, при рассмотрении взрыва устройства оболочечного типа в ограниченном пространстве.

Функциональные модели ЧС не рассматривают внутренней структуры ситуации и механизма ее развития, а отражают только их внешние признаки, внешнее поведение, а также изменения ситуации под влиянием внешних воздействий. Такими являются, например, математические модели разрушительных воздействий природных стихий – землетрясений, вулканов, торнадо и других малоизученных опасных явлений.

Если коэффициенты математической модели ЧС являются не постоянными величинами, а параметрами, которые зависят от времени, пространственных координат и других факторов, то такие модели называются параметрическими. Такими являются модели эвакуации людей из зданий, модели пожаров в помещениях, модели лесных пожаров и др.

В настоящее время для моделирования ЧС все шире используются информационные и, в частности, нейросетевые технологии и данные космического зондирования земной поверхности. На этой основе разработаны геоинформационные системы (ГИС), предназначенные для оценки риска возникновения ЧС различных видов, анализа их развития и прогнозирования последствий опасных событий природного и техногенного характера. Созданы как локальные ГИС для обслуживания отдельных регионов, так и мощные системы общего назначения (разработки ВНИИ ГО и ЧС). Эти системы включают в себя:

1. Подсистему космического мониторинга (электронные топографические карты и средства работы с ними);
2. Базы данных о потенциально опасных объектах, имеющихся силах и средствах для ликвидации ЧС и их последствий, транспортной инфраструктуре и других данных;
3. Базы математических моделей развития ЧС природного и техногенного характера.

Главным достоинством ГИС является детальная цифровая, координатная и картографическая привязка опасных объектов, объектов инфраструктуры, учреждений, жилой застройки и так далее к местности, возможность учета рельефа и метеоусловий, что позволяет улучшить качество прогнозирования ЧС и повысить эффективность управления силами и средствами ликвидации их последствий.

1.2. Общие положения моделирования чрезвычайных ситуаций

Важнейшим свойством ЧС является их случайный характер. Случайным является не только момент возникновения ЧС, но и степень воздействия поражающих факторов, а также реакция на это воздействие объектов и людей, попавших в зону поражения. Случайный характер имеют также пространственно-временные факторы, влияющие на тяжесть последствий ЧС. К ним относятся:

- расположение очага поражающего воздействия относительно объекта или населенного пункта;
- свойства грунтов под зданиями и на окружающей местности;
- плотность застройки и расселения людей;
- распределение производственного персонала и населения по месту пребывания в течение суток и в течение года.

Важной задачей моделирования ЧС является установление пространственно-временных зависимостей для интенсивности поражающих факторов. Эти зависимости могут быть заданы с помощью функций распределения вероятностей возникновения опасных событий или функций распределения вероятностей случайных величин поражающих факторов.

Эти функции могут быть выражены аналитически, с помощью таблиц или карт сейсмо-, радоно-, пожароопасного и другого районирования.

Задачей математического моделирования ЧС является также установление зависимости вероятности разрушения зданий и сооружений, а также поражения людей от расстояния (координатные законы) или интенсивности поражающих факторов (параметрические законы).

Законы разрушения объектов и поражения людей в аналитическом, табличном или графическом виде (рис. 1.2) могут быть найдены путем математической обработки опытных данных с использованием

понятий теории вероятностей и, в частности, нормального закона распределения, а также положений математической статистики.

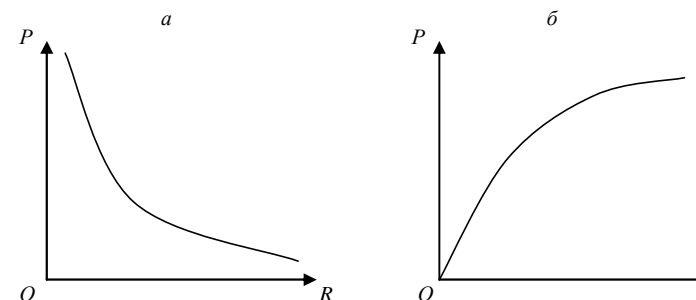


Рис. 1.2. Графики законов разрушения (поражения):
a – координатный, *б* – параметрический (*P* – вероятность, *R* – расстояние от эпицентра ЧС до объекта, *I* – интенсивность поражающего фактора)

Таким образом, основным методом анализа ЧС является вероятностный метод. На его основе в зависимости от имеющейся исходной информации могут применяться следующие методики исследования:

- статистическая, когда в качестве вероятностей неблагоприятных событий используются их относительные частоты, определяемые по имеющимся статистическим данным;
- теоретико-вероятностная, используемая для оценки вероятностей редких событий, по которым статистика практически отсутствует;
- эвристическая, основанная на методе экспертных оценок и применяемая в случаях, когда отсутствуют не только статистические данные, но и какие-либо математические модели.

Методы прогнозирования ЧС наиболее развиты применительно к опасным природным явлениям, благодаря функционированию общегосударственной системы мониторинга за предвестниками стихийных бедствий и катастроф. В настоящее время получили развитие следующие подходы к прогнозированию ЧС:

- *вероятностно-статистический подход*, основанный на представлении опасных природных явлений или аварий техногенного характера как пуассоновского потока случайных событий;

– *вероятностно-детерминированный подход*, основанный на выявлении закономерностей развития природных явлений, в частности, их цикличности, что позволяет использовать подход для целей средне- и долгосрочного прогнозирования.

Комплексное применение этих подходов позволило разработать математические модели всех основных видов ЧС природного и техногенного характера. Эти модели включают в себя частные модели возникновения и развития ЧС, модели поражающих воздействий, разрушений и другие.

Структура типовой математической модели ЧС и схема ее использования для прогнозирования их последствий показаны на рис. 1.3.

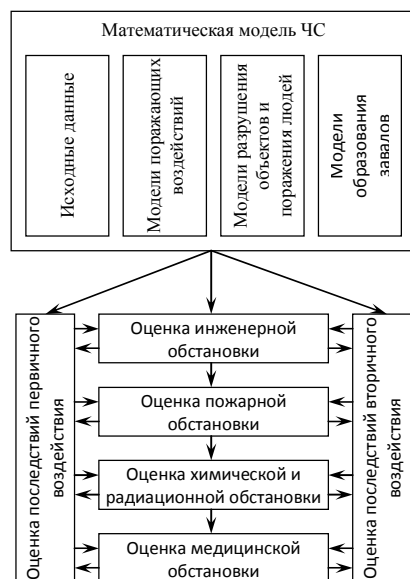


Рис. 1.3. Блок-схема структуры математической модели и ее использования для прогнозирования последствий ЧС

Математическое моделирование позволяет получить более объективную и точную оценку рисков, что является необходимой предпосылкой принятия обоснованных решений по предупреждению ЧС, смягчению и ликвидации их последствий.

1.3. Оценки и анализ риска возникновения чрезвычайной ситуации

Опасность характеризуется не только вероятностью (относительной частотой) наступления кризисной или чрезвычайной ситуации, но и тяжестью ее последствий. Чрезвычайные ситуации приводят к негативному воздействию на общество, личность, окружающую среду, в результате которого им может быть причинен ущерб – человеческий, социальный, экономический, экологический.

Поэтому количественная характеристика риска R может быть представлена в виде произведения вероятности P наступления неблагоприятного события на величину ожидаемого ущерба $У$:

$$R = P \cdot У. \quad (1.11)$$

При определении ущерба учитывается прямой, косвенный и полный ущерб.

Количественная мера риска (1.1) согласуется с интуитивным представлением о нем и позволяет разделить процедуру оценки риска на два независимых этапа:

- определение вероятностей неблагоприятных исходов;
- определение сопровождающих эти исходы ущербов.

Более детальная количественная характеристика риска учитывает сложную структуру воздействий опасных объектов и различный характер возникающих при этом ущербов в течение заданного времени, например, года:

$$R(t) = \sum_{i,j} P_{ij}^M Y_{ij}^M + \sum_{i,j} P_{ij}^Ч Y_{ij}^Ч, \quad (1.12)$$

где P_{ij}^M – вероятность возникновения в течение года j -го имущественного (материального) ущерба $Y_{ij}^Ч$ (руб./год) в результате воздействия i -го фактора, возникающего во время штатного функционирования опасного объекта или в результате аварий или катастроф; $P_{ij}^Ч$, $Y_{ij}^Ч$ – те же параметры, но относящиеся к человеку, т.е. к потерям здоровья, включая и смертельные случаи.

Стоимость человеческой жизни определяется многими социально-экономическими факторами и оценивается в развитых странах (США,

Германия, Япония и др.) от 3 до 8 млн долларов. Стоимость потери здоровья оценивается примерно в 0,01 стоимости жизни. Если существует опасность наступления n неблагоприятных событий, то расчет риска предлагается вести по формуле:

$$R = \sum_{i=1}^n P_i Y_i \quad (1.13)$$

где P_i – вероятность наступления i -го события;

Y_i – связанный с ним ущерб.

Формулы (1.12) и (1.13) просты и удобны для практического использования, но с формальной теоретико-вероятностной точки зрения применимы лишь в случае несовместных поражающих факторов или несовместных неблагоприятных событий. Поскольку в реальных условиях это требование, как правило, не выполняется, рассмотрим алгоритм расчета риска для совместных факторов (событий). Ограничимся рассмотрением трех совместных неблагоприятных исходов с вероятностями p_1 , p_2 и p_3 . Чрезвычайная ситуация может возникнуть в результате наступления одного из исходов при простой их совокупности. При этом их вероятности следует умножать, а соответствующие ущербы – складывать. Таким образом, для R можно получить следующее выражение:

$$R = p_1 q_2 q_3 Y_1 + p_2 q_1 q_3 Y_2 + p_3 q_1 q_2 Y_3 + \\ + p_1 p_2 q_3 (Y_1 + Y_2) + p_1 p_3 q_2 (Y_1 + Y_3) + p_2 p_3 q_1 (Y_2 + Y_3) + \\ + p_1 p_2 p_3 (Y_1 + Y_2 + Y_3), \quad (1.14)$$

где $q_i = 1 - p_i$.

Выражение (1.14) легко обобщается на произвольное число неблагоприятных факторов (исходов).

Необходимой предпосылкой математического описания рисков, возникающих в производственной деятельности, является их общая характеристика и классификация.

По причинам, порождающим риски, их можно разделить на террористические, природные (землетрясения, наводнения, подтопления, смерчи, бури и т.д.), техногенные, экологические, социально-экономические и медико-биологические.

С точки зрения анализа рисков и управления безопасностью принято различать:

- индивидуальный риск;
- потенциальный территориальный риск;
- социальный риск;
- коллективный риск, характеризующийся числом погибших и пострадавших в результате возможных чрезвычайных ситуаций;
- приемлемый риск – уровень риска, с которым общество в целом готово примириться ради получения определенных благ или выгод;
- неприемлемый риск;
- пренебрежимый риск-уровень индивидуального риска, не вызывающий беспокойства людей и не приводящий к ухудшению качества жизни населения.

Первичным из рассмотренных выше понятий является понятие индивидуального риска – вероятности (относительной частоты) поражения отдельного индивидуума в результате воздействия определенных факторов опасности:

$$R = P(A). \quad (1.15)$$

Индивидуальный риск измеряется вероятностью гибели одного человека в течение года. Величина наиболее часто встречающихся рисков составляет $\sim 10^{-4}$ чел./год. Оценки индивидуального риска сильно зависят от исходных данных. Уровень приемлемого индивидуального риска законодательно закреплён лишь в некоторых странах (например, в Голландии – 10^{-6} чел./год).

Коллективный риск, определяющий масштаб возможных последствий чрезвычайных ситуаций, вычисляется по формуле:

$$R = P(A) \cdot N, \quad (1.16)$$

где N – общее количество людей, подвергающихся опасному воздействию. Если населенный пункт находится вблизи опасного промышленного объекта или в зоне повышенного техногенного загрязнения окружающей среды, то необходимо рассматривать потенциальный территориальный риск, который выражается в виде полей рисков смерти или рисков заболеваний:

$$R = P(x, y), \quad (1.17)$$

где x, y – декартовы координаты.

Потенциальный территориальный риск представляет собой индивидуальный риск в каждой точке некоторой территории (местности).

Социальный риск представляет собой количественную зависимость вероятности (относительной частоты) чрезвычайных событий от числа смертельно травмированных или пострадавших людей (F-N зависимость или кривая). Социальный риск позволяет оценить опасность природных, техногенных и других чрезвычайных ситуаций для населения данной территории.

Особенностью экологического риска является его неравномерное распределение по территории, подвергшейся воздействию вредных факторов. Кроме того, загрязнение окружающей среды может зависеть от времени. Крайние возможности этой зависимости представляют собой кратковременное воздействие сильнодействующего фактора и длительное многолетнее воздействие вредных факторов малой интенсивности.

При залповом выбросе вредного вещества риск поражения населения зависит не только от мощности выброса, но и от метеорологического состояния атмосферы, рельефа местности, структуры и плотности застройки.

При количественной оценке величины перечисленных выше рисков следует отдельно рассматривать различные группы населения, выделяя их по половозрастному, профессиональному и другим признакам.

Сбор и обработка необходимых для этого больших массивов статистических данных должны проводиться с использованием специальных информационных технологий на базе современной вычислительной техники.

Общая схема количественного анализа риска включает в себя следующие пункты:

1. Обоснование необходимости анализа данного риска.
2. Идентификация потенциальных опасностей и классификация нежелательных и чрезвычайных событий.
3. Определение вероятности (относительной частоты) чрезвычайных событий.
4. Определение параметров возможных выбросов вредных веществ и выделений энергии: интенсивности, продолжительности, общих количеств и т.д.
5. Определение признаков и количественных критериев поражения, назначение допустимых уровней разовых и

продолжительных (систематических) воздействий на человека и окружающую среду.

6. Обоснование физико-математических моделей и разработка на их основе методик расчета переноса, распространения исходных факторов опасности с учетом метеорологической обстановки, рельефа местности и других особенностей.

7. Расчет и построение полей потенциальных рисков для всех выделенных источников опасности.

8. Исследование влияния различных факторов на уровень и пространственно-временное распределение риска вокруг потенциальных источников опасности.

9. Расчет прямых и косвенных последствий (ущербов) всех источников опасности на различные субъекты и группы риска.

10. Разработка и оптимизация проведения организационно-технических мероприятий по снижению риска до приемлемого уровня.

Структура анализа и снижения риска чрезвычайных ситуаций представлена на рис. 1.4.

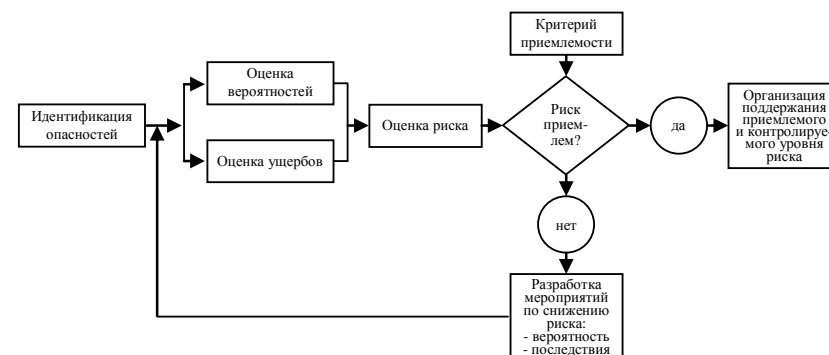


Рис. 1.4. Блок-схема анализа риска

Важнейшим элементом анализа риска является оценка вероятностей и повторяемости неблагоприятных событий. Для прогнозирования ЧС применяются законы распределения вероятности Пуассона, а также степенные распределения (распределения с «тяжелыми хвостами»).

1.4. Моделирование повторяемости чрезвычайных ситуаций

В качестве примера рассмотрим построение математической модели повторяемости ЧС. Чрезвычайные ситуации происходят в случайные моменты времени, поэтому интервал между двумя последовательными ЧС является непрерывной случайной величиной T , принимающей значение $\tau > \tau_{\text{чс}}$, где $\tau_{\text{чс}}$ – средняя продолжительность самой чрезвычайной ситуации (рис. 1.5)

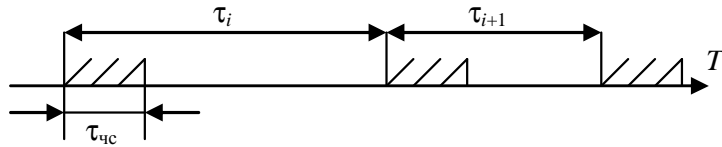


Рис. 1.5. Схема чередования ЧС

Часто аварии и катастрофы возникают из-за накопления большого числа независимых случайных факторов, поэтому при моделировании их повторяемости используются приближение суммы многих независимых случайных величин с конечными средним и дисперсией. В этих случаях в соответствии с центральной предельной теоремой возникает нормальное распределение времени ожидания очередной ЧС. Дифференциальная функция нормального распределения вероятностей величины T , нормированная на интервале $(\tau_{\text{чс}}, \infty)$, имеет вид:

$$f(\tau) = \frac{\exp\left(-0,5 \cdot \left(\frac{\tau - \tau_{\text{чс}}}{\sigma}\right)^2\right)}{\sqrt{2\pi}\sigma \left(0,5 - \Phi\left(\frac{\tau_{\text{чс}} - \tau_{\text{чс}}}{\sigma}\right)\right)}, \quad (1.18)$$

где $\tau_{\text{чс}}$ – средняя продолжительность интервала между двумя смежными ЧС; τ – среднее квадратическое отклонение величины T ; $\Phi(\dots)$ – функция Лапласа:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz. \quad (1.19)$$

Значение функции Лапласа определяется по таблицам или вычисляется с достаточной для инженерных приложений точностью с помощью аппроксимации:

$$\Phi(x) \cong 0,5 \left(1 - (1 + 0,049867x + 0,021141x^2 + 0,0032x^3 + 0,000038x^4)^{-16}\right). \quad (1.20)$$

Функция риска, равная вероятности наступления очередной ЧС на промежутке времени $(\tau_{\text{чс}}, \tau)$, определяется соотношением:

$$H(\tau) = P(\tau_{\text{чс}} < T < \tau) = \int_{\tau_{\text{чс}}}^{\tau} f(\tau) d\tau = \frac{\Phi\left(\frac{\tau - \tau_{\text{чс}}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\tau_{\text{чс}} - \tau_{\text{чс}}}{\sigma}\right)}{0,5 - \Phi\left(\frac{\tau_{\text{чс}} - \tau_{\text{чс}}}{\sigma}\right)}. \quad (1.21)$$

В ряде случаев последовательность независимых друг от друга аварий или отказов технических систем можно представить в виде простейшего потока событий, который описывается формулой Пуассона:

$$P_k(\tau) = \frac{\left(\frac{\tau - \tau_{\text{чс}}}{\tau_{\text{чс}}}\right)^k \exp\left(-\frac{\tau - \tau_{\text{чс}}}{\tau_{\text{чс}}}\right)}{k!}, \quad (1.22)$$

где $P_k(\tau)$ – вероятность наступления k событий за время τ .

Для функции риска ЧС, образующих простейший поток событий из формулы (1.12) получаем:

$$H(\tau) = 1 - P_0(\tau) = 1 - \exp\left(-\frac{\tau - \tau_{\text{чс}}}{\tau_{\text{чс}}}\right). \quad (1.23)$$

Дифференциальная функция распределения вероятностей времени ожидания следующей ЧС для простейшего потока событий имеет вид:

$$f(\tau) = \frac{1}{\tau_c} \exp\left(-\frac{\tau - \tau_{qc}}{\tau_c}\right). \quad (1.24)$$

Плотности распределения вероятностей времени ожидания очередной ЧС, определяемые формулами (1.18) и (1.24), являются быстро убывающими функциями. Однако, в ряде случаев повторяемость ЧС более адекватно описывают медленно убывающие степенные функции распределения (распределения с «тяжелыми хвостами»):

$$f(\tau) = C \left(\frac{\tau_c}{\tau}\right)^\alpha, \quad \alpha \geq 1, \quad (1.25)$$

где C – нормировочная постоянная:

$$C = \frac{\alpha - 1}{\tau_c} \left(\frac{\tau_{qc}}{\tau_c}\right)^{\alpha-1}. \quad (1.26)$$

Функция риска для потока ЧС со степенным распределением времени ожидания имеет вид:

$$H(\tau) = 1 - \left(\frac{\tau_{qc}}{\tau}\right)^{\alpha-1}. \quad (1.27)$$

Параметры, входящие в функции риска, определяются путем статистической обработки имеющихся эмпирических данных. Для этого диапазоны изменения промежутков времени τ и τ_{qc} необходимо разбить на одинаковые частичные интервалы и подсчитать частоты n_i значений τ и τ_{qc} , попадающих в каждый интервал. Каждому частичному интервалу ставится в соответствие значение, равное среднему арифметическому концов этих интервалов. Относительные частоты значений τ_i определяются по формуле:

$$W_i = n_i/n, \quad (1.28)$$

где $n = \sum_{i=1}^m n_i$ – общее число опытных значений τ_i , m – число частичных интервалов.

По относительным частотам вычисляются значения эмпирической функции риска:

$$H_i^* = \sum_{j=1}^i W_j. \quad (1.29)$$

В качестве значений параметров, τ_{qc} , τ_c и τ берутся их выборочные точечные оценки:

$$\tau_c = \bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^m \tau_i n_i}{n}; \quad (1.30)$$

$$\tau_{qc} = \bar{\tau}_{qc} = \frac{\sum_{i=1}^m \tau_{qc_i} n_i}{n}; \quad (1.31)$$

$$\sigma = s = \sqrt{\frac{n}{n-1} (\bar{t}^2 - \bar{\tau}^2)}. \quad (1.32)$$

Параметр α степенного распределения вероятностей (1.25) определяется по имеющимся эмпирическим данным методом наименьших квадратов:

$$\alpha = 1 + A/B, \quad (1.33)$$

$$\text{где } A = \sum_{i=1}^m \ln\left(\frac{\tau_{qc}}{\tau_i}\right) \ln(1 - H_i^*), \quad B = \sum_{i=1}^m \ln^2\left(\frac{\tau_{qc}}{\tau_i}\right).$$

Формулы (1.21), (1.23) и (1.27) представляют собой простейшие математические модели повторяемости ЧС.

Наиболее точно соответствует опытным данным модель, минимизирующая сумму квадратов разностей расчетных и эмпирических значений:

$$\sum_{i=1}^m (H_i - H_i^*)^2 \rightarrow \min. \quad (1.34)$$

Графики функций риска, полученных на основе различных законов распределения времени ожидания, представлены на рис. 1.6.

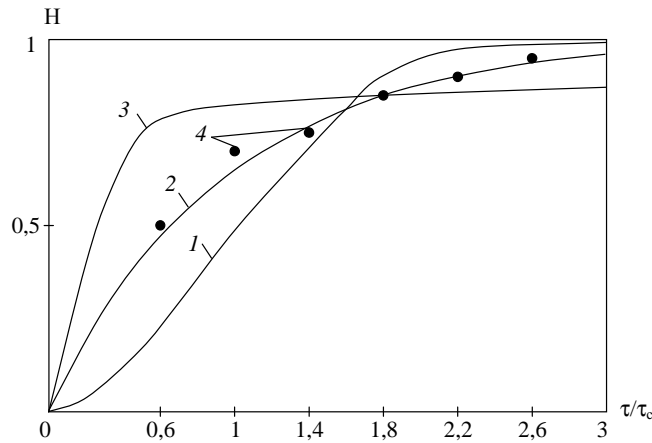


Рис. 1.6. Зависимость вероятности наступления ЧС от времени ожидания: 1 – нормальное распределение; 2 – распределение Пуассона; 3 – степенное распределение; 4 – опытные данные

Рассмотренные выше функции риска позволяют прогнозировать вероятность наступления ЧС в течение заданного промежутка времени.

Анализ имеющихся статистических данных показывает, что нормальное распределение и распределение Пуассона более адекватно описывают повторяемость отказов технических систем с большой степенью износа, а степенные распределения характерны для сравнительно редких стихийных бедствий и техногенных катастроф.

Пример.

Определение параметров математической модели и проверка ее адекватности.

Исходные данные.

Аварийность в системе водоснабжения города за последние 15 лет характеризуется статистическим распределением 25-ти значений случайной величины τ – времени ожидания следующей аварии

(табл. 1.2). Одно значение τ выходит за рамки последнего частичного интервала и поэтому не учитывается. Средняя продолжительность устранения аварии, найденная предварительно путем обработки имеющихся данных, составляет $\tau_{\text{чс}} = 0,01$ месяца (приблизительно 7 часов).

Таблица 1.2

Статистическое распределение времени ожидания следующей аварии

Частичные интервалы, месяцы	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20
Средние значения τ_i , мес	3	5	7	9	11	13	15	17	19
Частоты n_i	5	4	3	2	3	3	2	1	1

По данным, характеризующим аварийность в системе водоснабжения (табл. 1.2), определить параметры степенной функции риска (1.23) и проверить ее адекватность опытным данным.

Решение.

Математическая модель повторяемости аварий (1.23) определяет вероятность отказа в течение интервала времени ($\tau_{\text{чс}}$, τ). Модель содержит два параметра ($p = 2$): $\tau_{\text{чс}} = 0,01$ и τ_c – средняя продолжительность интервала между двумя смежными авариями.

Вычислим относительные частоты W_i отдельных значений τ_i :

$$W_i = \frac{n_i}{n},$$

где $n = 25$, а также рассчитаем значения эмпирической функции риска

$$H_i^* = \sum_{k=1}^i W_k,$$

где $i = 1, 2, \dots, m$, $m = g$ – число уровней величины τ .

Результаты расчетов приведены в табл. 1.3:

Таблица 1.3

Значения эмпирической функции риска

τ_i , мес	3	5	7	9	11	13	15	17	19
W_i	0,20	0,16	0,12	0,08	0,12	0,12	0,08	0,04	0,04
H_i^*	0,2	0,36	0,48	0,56	0,68	0,80	0,88	0,92	0,96

Найдем средние значения времени ожидания τ_c и эмпирической функции распределения \bar{H}^* :

$$\tau_i = \sum_{i=1}^m \tau_i W_i = 8,48 \text{ месяца};$$

$$\bar{H}^* = \sum_{i=1}^m H_i^* W_i = 0,649.$$

Подставив значения параметров τ_{qc} и τ_c в формулу (1.23), получим следующее выражение для модели повторяемости аварий:

$$H_\tau = 1 - \exp\left(-\frac{\tau - 0,01}{8,48}\right).$$

С помощью этой формулы рассчитаем теоретические (модельные) значения функции риска H_{τ_i} в точках τ_i и вычислим разности (невязки) $H_i^* - H_{\tau_i}$ (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Значения теоретической функции риска и их отклонения от значений

τ_i , мес	3	5	7	9	11	13	15	17	19
H_{τ_i}	0,297	0,445	0,561	0,654	0,726	0,784	0,829	0,865	0,893
$H_i^* - H_{\tau_i}$	-0,097	-0,085	-0,081	-0,094	-0,046	0,016	0,051	0,055	0,067

По данным табл. 1.4 найдем выборочное среднее квадратическое отклонение эмпирических значений функции риска от модельных:

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (H_i^* - H_{\tau_i})^2}{m - p}} = 0,08,$$

а также относительную величину этого отклонения:

$$\tilde{\Delta} = \frac{S_e}{\bar{H}^*} = 0,123 = 12,3\%.$$

Отсюда следует, что рассматриваемая математическая модель вполне удовлетворительно описывает повторяемость аварий.

Проверим адекватность этой модели с помощью критерия Вилкоксона-Манна-Уитни. Для этого построим общий вариационный ряд, объединяющий эмпирическую (H_i^*) и модельную (H_{τ_i}) выборки значений функции риска:

1		3		5	6		9	
<u>0,2</u>	0,297	<u>0,36</u>	0,445	<u>0,48</u>	<u>0,56</u>	0,561	0,654	<u>0,68</u>
		12			15		17	18
0,726	0,784	<u>0,80</u>	0,829	0,865	<u>0,88</u>	0,893	<u>0,92</u>	<u>0,96</u>

Вычислим сумму рангов (порядковых номеров) эмпирических значений функции риска в объединенной выборке

$$S = 1 + 3 + 5 + 6 + 9 + 12 + 15 + 17 + 18 = 86.$$

Найдем параметры нормального распределения случайной величины S :

$$m_s = \frac{9 \times 19}{2} = 85,5, \quad \sigma_s = \sqrt{\frac{9 \times 81}{6}} = 11.$$

Вычислим границы критической области для гипотезы об однородности эмпирической и модельной выборки на уровне значимости $\alpha = 0,05$:

$$S \leq 85,5 - 1,96 \cdot 11 = 63,94;$$

$$S \geq 85,5 + 1,96 \cdot 11 = 107,06.$$

Значение $S = 86$ не попадает в критическую область, значит гипотеза об однородности эмпирической и модельной выборок подтверждается, различие между эмпирическими и модельными значениями функции риска статистически незначимы и рассмотренную выше математическую модель повторяемости аварий следует считать адекватной.

Найдем с помощью построенной выше модели вероятность наступления аварии в течение месяца и года после ликвидации предыдущей аварии:

$$H(\tau = 1) = 0,11, \quad H(\tau = 12) = 0,76.$$

Найденные вероятности свидетельствуют о необходимости безотлагательного приведения профилактических мероприятий.

1.5. Единый вероятностный подход к оценке последствий ЧС

Прогнозирование и оценка обстановки при ЧС проводится для заблаговременного принятия мер по предупреждению ЧС, смягчению их последствий и определения сил и средств, необходимых для ликвидации последствий стихийных бедствий, аварий и катастроф.

Независимо от характера и источника ЧС, можно выделить шесть основных поражающих факторов, воздействующих на людей инженерно-технические сооружения и окружающую среду:

1. Барическое воздействие, возникающее при взрывах и обусловленное как избыточным давлением, так и его импульсом.

2. Механическое воздействие, обусловленное летящими осколками, которые образуются при разрушении взрывных устройств, зданий и конструкций.

3. Термическое воздействие, возникающее при взрывах и пожарах, связанное с высокой температурой воздуха и мощным тепловым излучением.

4. Токсическое (отравляющее) воздействие вредных веществ, образующихся при авариях, взрывах и пожарах.

5. Радиационное воздействие, возникающее при авариях и катастрофах на радиационно опасных объектах и в результате применения ядерного оружия.

6. Биологическое воздействие (эпидемии, применение бактериологического оружия).

В общем случае риск поражения при авариях и катастрофах включает в себя вероятность нанесения определенного ущерба человеку и окружающей среде. Величина указанной вероятности P может быть выражена в виде произведений трех компонент:

$$P = P_{oc} \cdot P_{пф} \cdot P_{пор} \quad (1.35)$$

где P_{oc} – вероятность возникновения опасного события или явления, вызывающего формирование и действие вредных (поражающих) факторов, в частности вероятность возникновения аварии или катастрофы на взрыво-, пожаро-, химически или радиационно опасных объектах;

$P_{пф}$ – вероятность формирования вредных (поражающих) факторов в месте нахождения людей или объектов;

$P_{пор}$ – вероятность того, что действие опасных факторов приводит к определенному поражению или ущербу.

Наибольшие трудности возникают при определении третьего компонента в общем выражении (1.35), т.е. $P_{пор}$. Особенно это относится к случаям, когда нештатная ситуация возникает на взрыво- и пожароопасных объектах.

Разрушения, вызванные указанными воздействиями, а также возникающие при них физиологические эффекты и поражения людей имеют вероятностный характер. Поэтому и степень поражения человека или число пораженных людей той и иной группы населения являются случайными величинами. Это относится также и к другим объектам живой и окружающей среды. При рассмотрении барического, теплового и механического воздействия в число объектов окружающей среды могут быть включены здания, сооружения, конструкции, различные материалы т.д.

Поражение человека или материального объекта всегда можно представить как результат совместного действия многих независимых факторов, поэтому в соответствии с центральной предельной теорией величины, характеризующие поражение, должны подчиняться нормальному закону распределения.

Это позволяет в общем случае, включающем все рассмотренные выше поражающие воздействия, выразить вероятность поражения людей и объектов окружающей среды с помощью одной и той же функции – интеграла вероятностей:

$$P_{\text{пор}} = \Phi(\text{Pr}), \quad (1.36)$$

где $\Phi(\text{Pr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}} \exp(-t^2/2) dt$ – интеграл вероятностей, Pr – пробит-функция (от английского *probability* – вероятность), которая является

количественной мерой поражающего воздействия.

Интеграл вероятностей $\Phi(\text{Pr})$ связан с функцией Лапласа $\Phi_{\text{л}}(\text{Pr})$ соотношением:

$$\Phi(\text{Pr}) = 0,5 + \Phi_{\text{л}}(\text{Pr}). \quad (1.37)$$

Функция Лапласа имеет вид (1.19), её значения определяются по таблицам или вычисляются с помощью формулы (1.20).

Пробит-функции поражающих воздействий записывают в виде:

$$\text{Pr} = a + b \ln D, \quad (1.38)$$

где a и b – эмпирические константы, учитывающие специфику того или иного поражающего фактора, вредного вещества или процесса; D – количественная мера (доза) негативного воздействия.

Наряду с формулой (1.36) для определения вероятности поражения может использоваться и другое соотношение:

$$P_{\text{пор}} = \Phi(\text{Pr}' - 5), \quad (1.39)$$

где $\text{Pr}' = \text{Pr} + 5$.

Формула (1.39) применяется иностранными исследователями.

По формулам (1.36, 1.37) составлена табл. 1.5 для определения вероятностей поражения при определенных значениях пробит-функции, позволяющая с применением методов интерполяции достаточно точно находить искомую величину.

Рассмотрим выражения для пробит-функций некоторых поражающих факторов.

Таблица 1.5

Вероятности поражения $P_{\text{пор}}$, %, при заданных значениях пробит-функции Pr

$\text{Pr}, \%$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		-2,33	-2,05	-1,88	-1,75	-1,62	-1,55	-1,48	-1,41	-1,34
10	-1,28	-1,23	-1,18	-1,13	-1,08	-1,04	-0,99	0,95	-0,92	-0,88
20	-0,84	-0,81	-0,77	-0,74	-0,71	-0,67	-0,64	-0,61	-0,52	-0,55
30	-0,52	-0,5	-0,47	-0,44	-0,41	-0,39	-0,36	-0,33	-0,31	-0,28
40	-0,25	-0,23	-0,2	-0,18	-0,15	-0,13	-0,1	-0,08	-0,05	-0,03
50	0,00	0,03	0,05	0,08	0,10	0,13	0,15	0,18	0,20	0,23
60	0,25	0,28	0,31	0,33	0,36	0,39	0,41	0,44	0,47	0,50
70	0,52	0,55	0,58	0,61	0,64	0,67	0,71	0,74	0,77	0,82
80	0,84	0,88	0,92	0,95	0,99	1,04	1,08	1,13	1,18	1,23
90	1,28	1,34	1,41	1,48	1,55	1,64	1,75	1,88	2,05	2,33
99	2,33	2,37	2,41	2,46	2,51	2,58	2,65	2,75	2,88	3,09

Например, барическое поражающее воздействие взрывов паровоздушных топливных смесей и конденсированных взрывчатых веществ проявляется главным образом через воздушную ударную волну. А поражающее действие ударной волны определяется избыточным давлением в ее фронте ΔP_{ϕ} и импульсом давления в положительной фазе волны I_p и скоростным напором.

В результате барического воздействия происходит поражение органов дыхания человека, возникают травмы и разрыв барабанных перепонок. Кроме того, вследствие возникновения скоростного напора и движения воздушных масс происходит поражение человека так называемым метательным действием взрыва.

Например, для определения вероятности летального исхода от прямого воздействия на людей избыточного давления и импульса давления, при взрыве может быть использована формула:

$$\text{Pr} = -2,44 \cdot \ln \left(\frac{7,38}{\Delta P_{\phi}} + \frac{1,9 \cdot 10^3}{\Delta P_{\phi} \cdot I_p} \right), \quad (1.40)$$

где ΔP_{ϕ} – избыточное давление, кПа; I_p – импульс давления, кПа·с.

Вероятность сильных разрушений зданий при барическом воздействии оценивается с помощью пробит-функции:

$$\text{Pr} = -0,22 \cdot \ln \left[\left(\frac{40}{\Delta P_{\phi}} \right)^{7,4} + \left(\frac{0,26}{I_p} \right)^{11,3} \right]. \quad (1.41)$$

Формула для пробит-функции при оценке вероятности смертельных поражений людей при термическом воздействии имеет вид:

$$\text{Pr} = -14,5 + 2,56 \cdot \ln(I_0^{4/3} \cdot \tau / 10), \quad (1.42)$$

где I_0 – интенсивность воздействующего на человека теплового потока, кВт/м²; τ – время воздействия, с.

В настоящее время определение вероятности поражения людей с использованием пробит-функции наиболее полно изучено применительно к токсическому ингаляционному воздействию опасных химических веществ (ОХВ).

В простейшем случае, когда величину концентрации ОХВ можно принять постоянной, для пробит-функции используется выражение:

$$\text{Pr} = a + b \cdot \ln(C^n \cdot \tau), \quad (1.43)$$

где концентрация ОХВ C измеряется в мг/л; τ – в минутах.

Определение a , b и n для каждого опасного химического вещества требует проведения специальных медико-биологических исследований. Значения этих констант, найденные в центре изучения безопасности химических процессов Американского института инженеров-химиков, приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Константы для вычисления пробит-функции летального поражения персонала опасных объектов

Опасное химическое вещество	Значения констант		
	a	b	n
Хлор	-8,29	0,92	2
Аммиак	-35,90	1,85	2
Угарный газ	-37,98	3,7	1

При определении пробит-функции для населения необходимо учитывать его возвратные категории, состояние здоровья отдельных групп и другие факторы.

По данным зарубежной печати пробит-функции для случая воздействия хлора на различные группы населения имеют вид:

– для взрослых и подростков

$$\text{Pr} = -8,29 + 0,92 \cdot \ln(C^2 \cdot \tau), \quad (1.44)$$

– для детей и стариков

$$\text{Pr} = -6,61 + 0,92 \cdot \ln(C^2 \cdot \tau). \quad (1.45)$$

При прогнозировании возможной аварийной обстановки может возникнуть необходимость оценки вероятности поражения людей и объектов окружающей среды с учетом совместного воздействия нескольких поражающих факторов.

В случае, когда эти виды воздействия могут считаться независимыми и накопление ущерба не принимается во внимание, вероятно, что поражения от совместного воздействия барического, осколочного, теплового и других факторов может быть определена по формуле:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{\text{пор}}^i), \quad (1.46)$$

где n – число принимаемых во внимание факторов; $P_{\text{пор}}^i$ – вероятность поражения от воздействия i -го фактора.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите определение и классификацию чрезвычайных ситуаций.
2. Дайте определение математической модели ЧС.
3. Назовите основные этапы построения математической модели опасного явления.
4. Что такое адекватность математической модели и каковы основные методы ее проверки?
5. Приведите классификацию математических моделей.
6. Что такое «геоинформационные системы» и каковы их роль и место в анализе ЧС и прогнозировании их последствий?
7. В чем проявляется случайный характер ЧС?
8. Каковы основные задачи математического моделирования ЧС?

9. Что такое законы воздействия и законы разрушения (поражения)?

10. Начертите блок-схему структуры и применения математической модели ЧС.

11. Назовите основные методы оценки и анализа риска возникновения ЧС.

12. Приведите основные подходы к моделированию повторяемости ЧС.

13. Что такое функция риска и каковы их виды?

14. В чем суть единого вероятностного подхода к оценке последствий ЧС?

15. Дайте определение и классификацию пробит-функций поражающих воздействий.

Глава 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПРИРОДНЫХ ОПАСНОСТЕЙ

2.1. Моделирование и оценка обстановки при землетрясениях

2.1.1. Общие понятия о землетрясениях

Землетрясения – это подземные толчки и колебания земной поверхности, возникающие в результате внезапных смещений и разрывов в земной коре.

Основной причиной наиболее разрушительных землетрясений является столкновение или иное взаимодействие тектонических плит. Земля имеет слоистое строение: внешний твердый слой – земная кора имеет толщину от 6 км (под дном океанов) до 70 км (в горных районах континентов). Ниже коры до глубины приблизительно 2900 км простирается мантия. Центральную часть Земли от глубины приблизительно 2900 км до центра занимает ядро. Твердая оболочка земли (литосфера), включающая в себя кору и верхний слой мантии, состоит из семи-восьми гигантских плит, на которых находятся континенты и несколько десятков более мелких плит, которые перемещаются по слою сильно разогретых пластичных пород. Толщина тектонических плит меняется от 10–80 км под океанами и 200–300 км на континентах. Скорость смещения плит – несколько сантиметров в год. Причиной этого смещения или драгера плит является вращение Земли и другие геофизические и космические факторы. Плиты раздвигаются, сдвигаются, напозают друг на друга и т.д. При взаимодействии плит возникают их упругие деформации, которые при достижении предела прочности горных пород приводят к их разрывам и разрушениям, что и проявляется в виде землетрясений. Около 90 % землетрясений приходится на Тихоокеанский пояс, окружающий Тихий океан; 5–6 % приходится на Альпийский пояс, который тянется от Средиземного моря через Турцию, Иран, Северную Индию в Китай. Третья зона землетрясений – срединно-океанические хребты Атлантического и Индийского океанов. В России в сейсмоопасные зоны попадают около 20 % всей территории. В XX веке здесь произошло более 40 разрушительных землетрясений.

2.1.2. Количественные характеристики землетрясений

Источник сейсмических волн занимает определенный объем и имеет протяженность от 1 до 100 и более км. Но при теоретическом рассмотрении источник землетрясения представляется точкой, которая называется гипоцентром (фокусом).

Проекция гипоцентра на поверхность Земли вверх по вертикали называется эпицентром (рис 2.1). Местоположение гипо- и эпицентра определяют по времени прихода сейсмических волн.

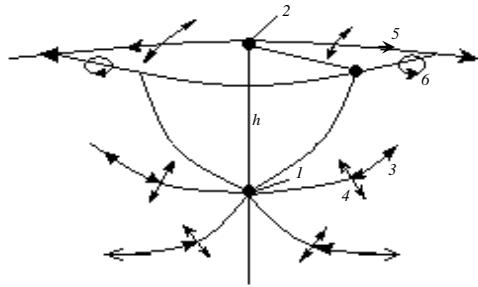


Рис. 2.1. Схема землетрясения и вызываемых им волн:
1 – гипоцентр; 2 – эпицентр; 3 – *P*-волны; 4 – *S*-волны;
5 – волны Лява; 6 – волны Релея

Землетрясение можно определить как колебания земной поверхности при прохождении волн от подземного источника энергии. Различают несколько видов сейсмических волн. В толще горной породы от источника землетрясения распространяются первичные продольные волны (волны давления или *P*-волны) и поперечные волны (волны смещения или *S*-волны).

Скорости распространения этих волн зависят от механических свойств горных пород и грунтов, через которые они проходят (табл. 2.1). При этом скорость продольных волн в среднем в 1,7 раза выше скорости поперечных волн. Объемные продольные и поперечные волны достигнув поверхности Земли вызывают поверхностные волны двух видов: волны Лява, в которых грунт смещается из стороны в сторону в горизонтальной плоскости перпендикулярно к направлению распространения и волны Релея, в которых частицы грунта перемещаются по замкнутым траекториям вверх и назад по отношению к направлению движения волны. Поверхностные волны распространяются примерно в два раза медленнее, чем поперечные.

Таблица 2.1

Скорость распространения продольных сейсмических волн

Тип горной породы или грунта	Скорость распространения V_p , км/с
Граниты, базальты	6,9
Осадочные породы	6,1
Песчаники, известняки	1,5–5,6
Полускальные грунты	1,4–3,6
Крупнообломочные грунты	1,1–2,1
Песок	0,7–1,6
Глина, суглинок	0,5–1,5
Насыпные грунты	0,2–0,5

Воздействиям продольных, поперечных и поверхностных волн соответствуют три фазы землетрясения: *P*-, *S*- и *L*-фазы. Действие продольных волн (*P*-фаза) похоже на удар воздушной волны. Самой разрушительной является вторая *S*-фаза, связанная с приходом поперечных волн, которые смещают грунт из стороны в сторону как по вертикали, так и по горизонтали.

Амплитуда колебаний земной поверхности A , мкм на расстоянии R км от эпицентра определяется следующей приближенной формулой:

$$Z = 10^{M-1,32-\lg R}, \quad (2.1)$$

где M – магнитуда землетрясения, которая является условной единицей его полной энергии.

Автор понятия магнитуда Ч. Рихтер (1935) определял её как число пропорциональное десятичному логарифму амплитуды наиболее сильной волны, выпавшей в мкм, на расстоянии 100 км от эпицентра землетрясения.

Энергия, выделяющаяся при землетрясении, определяется формулой:

$$E = 10^{4,8+1,5M}, \text{ Дж.} \quad (2.2)$$

Магнитуда землетрясений по шкале Рихтера может изменяться от 1 до 9. Самое сильное Ассамское землетрясение (северо-восточная Индия, 1952) имело магнитуду 8,7. Выделенная в нем громадная энергия $E \sim 10^{18}$ Дж эквивалентна энергии, выделенной при взрыве 2,2 млрд т тротила.

В среднем в мире ежегодно происходит одно землетрясение с магнитудой 8 и выше.

Интенсивность землетрясения – это мера величины сотрясения грунта, которая определяется степенью разрушения зданий и конструкций, а также характером изменения земной поверхности.

Интенсивность землетрясения в зависимости от расстояния различна, а его магнитуда всегда одна.

В РФ, как и в ряде европейских стран, используется 12-бальная международная шкала интенсивности землетрясения MSK-64. Условно землетрясения подразделяются на слабые (1–3 балла), умеренные (4 балла), сильные (5–7 баллов), разрушительные – 8 баллов, опустошительные – 9 баллов, уничтожительные – 10 баллов; катастрофические – 11 баллов; 12 – баллов сильная катастрофа.

Интенсивность землетрясения J определяется по формуле:

$$J(R) = 3 + 1,5M - 3,5 \lg \sqrt{R^2 + h^2}, \quad (2.3)$$

где расстояние от эпицентра R и глубина h измеряются в км.

Из формулы (2.3) следует выражение для максимальной интенсивности землетрясения, которая достигается в эпицентре ($R = 0$):

$$J_0 = 3 + 1,5M - 3,5 \lg h. \quad (2.4)$$

Если данные о глубине гипоцентра отсутствуют, то интенсивность землетрясения можно оценить по формуле:

$$J_0 \geq 1,5(M - 1). \quad (2.5)$$

Расстояние, на котором возможно возникновение колебаний заданной интенсивности, определяется соотношением, вытекающем из (2.3, 2.4):

$$R = h \sqrt{10^{0,57(J_0 - J(R))} - 1}. \quad (2.6)$$

Реальная интенсивность землетрясения, учитывающая влияние грунта под застройкой и в окружающей местности, определяется соотношением:

$$J_{\text{реал}} = J(R) - (\Delta J_3 - \Delta J_M), \quad (2.7)$$

где ΔJ_3 , ΔJ_M – изменение балльности землетрясения, учитывающие типы грунта под зданиями и в окружающей местности (по сравнению с гранитом) (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Изменения балльности землетрясения для различных типов грунта

Тип грунта	$\Delta J_3, \Delta J_M$
Гранит	0
Известняк	0,52
Щебень, гравий	1,36
Полускальные грунты	0,92
Песчаные	1,6
Глинистые	1,61
Насыпные рыхлые	2,6

Важными количественными параметрами обстановки при землетрясении являются времена наступления различных его фаз:

$$t_p = \frac{\sqrt{h^2 + R^2}}{V_p}, \quad (2.8)$$

$$t_s = 1,7t_p, \quad (2.9)$$

$$t_l = \frac{h + 3,4R}{V_p}, \quad (2.10)$$

где V_p – скорость распространения продольных сейсмических волн (табл. 2.1).

2.1.3. Оценка последствий землетрясений

Землетрясения наносят огромный ущерб населению (гибель и увечия людей, потеря жилья, имущества и т.д.), техносфере (разрушение зданий и сооружений, инженерных сетей, транспортных систем, оборудования и других объектов) и окружающей природной среде (нарушение целостности грунта, оползни, обвалы, затопления и т.д.). Тяжесть последствий землетрясений зависит от их интенсивности (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Последствия землетрясений

Интенсивность (J), шкала MSK, балл	Тип землетрясения	Магнитуда, М	Разрушения и другие последствия
IV	Среднее	3	Разрушение остекления, ощущаются толчки в помещениях
V-VI	Сильное	5	Средние разрушения деревянных зданий; слабые – кирпичных
VII	Очень сильное	5,5-6	Сильные разрушения деревянных зданий; средние – кирпичных; слабые – промышленных каркасных зданий
VIII	Разрушительное	6-6,5	Полное разрушение деревянных зданий; сильные – кирпичных; средние ж/б промышленных зданий; трещины в почве; возможны пожары
IX	Опустошительное	7	Полное разрушение деревянных, кирпичных, промышленных зданий; сильное – ж/б, каркасных; разрыв коммуникаций; пожары
X	Уничтожающее	7,5	Обвалы, разрушение магистралей, полное разрушение всех зданий; пожары
XI-XII	Катастрофическое. Абсолютное	8-9	Полное разрушение зданий, оползни, обвалы. Изменение течения рек и рельефа, пожары

Состояние зданий и сооружений после землетрясения оценивается степенью их повреждения (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Степени разрушения зданий и сооружений

Признаки повреждений	Степень разрушения
Отсутствие видимых повреждений (сотрясение зданий в целом)	0
Слабые повреждения (тонкие трещины, откалывание штукатурки)	1
Средние повреждения (умеренные повреждения несущих конструкций)	2
Сильные повреждения (значительные повреждения несущих конструкций, сквозные трещины в несущих стенах)	3
Частичное разрушение (проломы, вывалы, обрушения отдельных панелей)	4
Обвал (полное обрушение здания с потерей его формы)	5

Здания и сооружения традиционной постройки (без применения специальных антисейсмических мероприятий) характеризуются

определенной устойчивостью, равной интенсивности землетрясения J_c , которое они способны выдержать без существенных повреждений (табл. 2.5).

Таблица 2.5

Классификация зданий и сооружений по сейсмостойкости J_c

Характеристика здания	J_c баллы
Здания со стенами местных строительных материалов: глинобитные без каркаса; саманные или из сырцового кирпича без фундамента; выполненные из скатанного или рваного камня на глиняном растворе и без регулярной (из кирпича или камня правильной формы) кладки в углах и т.п.	4
Здания со стенами из самана или сырцового кирпича; с каменными, кирпичными или бетонными фундаментами; выполненные из рваного камня на известковом, цементном или сложном растворе с регулярной кладкой в углах; выполнение из пластового камня на известковом, цементном или сложном растворе; выполненные из кладки типа «мидис»; здания с деревянным каркасом с заполнением из самана или глины, с тяжелыми земляными или глиняными крышами; сплошные массивные ограды из самана или сырцового кирпича и т. п.	4,5
Здания с деревянным каркасом с заполнением из самана или глины и легкими перекрытиями	5
Типовые здания из жженого кирпича, тесаного камня или бетонных блоков на известковом, цементном или сложном растворе: сплошные ограды и стенки, трансформаторные киоски, силосные и водонапорные башни	5,5
Деревянные дома, рубленые «в лапу» или «в обло»	6
Типовые ж/б, каркасные, крупнопанельные и армированные крупноблочные дома; железобетонные сооружения: силосные и водонапорные башни, маяки, подпорные стенки, бассейны и т. п.	6,5
Типовые здания и сооружения всех видов (кирпичные, блочные, панельные, бетонные, деревянные, щитовые и др.) с антисейсмическими мероприятиями для расчетной сейсмичности 7 баллов	7
То же для расчетной сейсмичности 8 баллов	8
То же для расчетной сейсмичности 9 баллов	9

Примечание. При сочетании в одном здании признаков двух или трех типов здания в целом следует относить к слабейшему из них.

Степени разрушения однотипных зданий являются случайными величинами, распределения которых в зависимости от $J_{\text{реал}}$ и J_c приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Вероятности P^3 получения зданиями различной степени разрушения

$J_{\text{реал}} - J_c$	Степень разрушения					
	0	1	2	3	4	5
0	0,9	0,1	–	–	–	–
1	0,4	0,5	0,1	–	–	–
2	0,1	0,3	0,5	0,1	–	–
3	0	0,1	0,3	0,5	0,1	–
4	0	0	0,1	0,3	0,5	0,1
5	0	0	0	0,1	0,3	0,6
6	0	0	0	0	0,1	0,9

Средняя степень разрушения зданий в зависимости от их сейсмостойкости и реальной интенсивности землетрясения определяется как математическое ожидание по распределениям табл. 2.6 и приведена в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Осредненная степень разрушения зданий

$J^* - J_c$	0	1	2	3	4	5	6
$I_{\text{ср}}$	0,1	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	4,9

Люди, находящиеся в момент землетрясения внутри зданий, поражаются в основном обломками строительных конструкций.

Вероятности общих $P^{\text{общ}}$ (погибшие и раненные) и безвозвратных $P^{\text{безв}}$ потерь людей, находившихся в зданиях в зависимости от средней степени их повреждения, приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Вероятности общих и безвозвратных потерь людей, находившихся в зданиях

Вероятность потерь	Степень разрушения зданий, I			
	0-2	3	4	5
$P^{\text{общ}}$	0	0,05	0,5	0,95
$P^{\text{безв}}$	0	0,01	0,17	0,65

Более точно вероятности людских потерь могут быть найдены с учетом структуры повреждений зданий (табл. 2.6) по формулам:

$$P^{\text{общ}} = 0,05P_{I=3}^3 + 0,5P_{I=4}^3 + 0,95P_{I=5}^3, \quad (2.11)$$

$$P^{\text{безв}} = 0,01P_{I=3}^3 + 0,17P_{I=4}^3 + 0,65P_{I=5}^3. \quad (2.12)$$

Вероятность санитарных потерь населения (ранения, контузии) равна разности вероятностей общих и безвозвратных потерь:

$$P^{\text{сан}} = P^{\text{общ}} - P^{\text{безв}}. \quad (2.13)$$

Для определения абсолютных потерь населения найденные вероятности потерь следует умножить на численность людей N_3 , находящихся в зданиях, которые рассчитываются с помощью табл. 2.9.

Таблица 2.9

Среднесуточное распределение городского населения по месту его пребывания

Время суток, ч	Доля населения, %, находящегося в определенном месте нахождения								
	Жилые здания и здания культурно-бытового назначения	Производственные здания	В транспорте			На улице (открыто)			
			Города с населением (млн чел)						
			0,25–0,5	0,5–1	>1	0,25–0,5	0,5–1	>1	
1	6	94	4	1	1,25	1,5	1	0,75	0,5
6	7	74	6	7	9	12	13	11	8
7	10	22	50	9	11	17	19	17	11
10	13	28	52	6	7	10	14	13	10
13	15	45	37	4	4	7	14	14	11
15	17	27	49	8	9	13	15	15	12
17	19	45	24	10	12	15	20	18	15
19	01	77	14	4	4	6	5	5	3

Абсолютные потери населения вычисляются по формулам:

$$N^{\text{общ}} = P^{\text{общ}} \cdot N_3, \quad (2.14)$$

$$N^{\text{безв}} = P^{\text{безв}} \cdot N_3, \quad (2.15)$$

$$N^{\text{сан}} = N^{\text{общ}} - N^{\text{безв}}. \quad (2.16)$$

2.2. Прогнозирование и оценка обстановки при ураганах

2.2.1. Общие сведения об ураганах

Ураган определяется как ветер разрушительной силы и значительной продолжительности, скорость которого примерно равна 32 м/с (115 км/ч) и более.

В широком смысле слова ураганы – это циклоны с очень высокими, ураганными скоростями воздушного потока. Как правило, такими скоростями воздушного потока обладают тропические циклоны.

Циклон – атмосферное возмущение с пониженным давлением воздуха и ураганными скоростями ветра, возникающее в тропических широтах и вызывающее огромные разрушения и гибель людей. Циклон представляет собой гигантский атмосферный вихрь с убывающим к центру давлением воздуха и циркуляцией воздуха вокруг центра против часовой стрелки в Северном полушарии Земли и по часовой стрелке – в Южном. Вблизи земной поверхности (до высоты 1–1,5 км) ветер имеет составляющую, направленную внутрь циклона, и имеет вид сходящегося по спирали к центру вихря.

Циклоны, возникающие и развивающиеся во внетропических широтах, называются внетропическими циклонами. Скорость ветра в глубоких внетропических циклонах с большими градиентами давления может достигать до ураганной, но в большинстве случаев не превышает 20 м/с.

Урагану может предшествовать буря. Буря – это ветер, скорость которого меньше скорости ураганного ветра, однако все же довольно значительная – 15–20 м/с. Убытки и разрушения, причиняемые бурями, существенно меньше, чем от ураганов. Иногда бурю порядка 11 баллов называют штормом. Поток воздуха в урагане движется по спирали к середине и вверх. Он поднимается на высоту 12–16 км и слабеет по мере подъема. Ураганы возникают в любое время года, но наиболее часто в период времени с июль по октябрь. За остальные 8 месяцев ураганы редки, пути их коротки.

Самой важной характеристикой урагана является скорость ветра. Ветер, соответствующий по шкале Бофорта 12 баллам, является ураганным ветром.

Важными характеристиками, необходимыми для прогнозирования ураганов, являются скорость и путь перемещения циклона, являющегося источником ураганного ветра.

Скорость перемещения такого циклона весьма различна. Скорость движения внетропических циклонов в среднем составляет 30–40 км/ч, иногда достигая величины 100 км/ч.

Средняя продолжительность урагана составляет 9–12 дней. При своем движении иногда тропический циклон превращается во внетропический.

Многие явления, сопровождающие ураган, так же страшны, как и он сам. Нередко они даже превосходят его по своей разрушительной силе. Часто ливни, сопровождающие ураган, гораздо опаснее самого ураганного ветра.

Размеры ураганов весьма различны. Обычно за ширину урагана принимают ширину зоны катастрофических разрушений или зоны ветров ураганной силы. Эта зона имеет ширину от 20 до 200 км. Часто к этой зоне прибавляют зону ветров штормовой силы со сравнительно небольшими разрушениями, тогда ширина урагана измеряется сотнями километров.

2.2.2. Последствия ураганов

Ураган является одной из самых мощных сил стихий. По своему пагубному воздействию урагана нередко не уступает таким страшным стихийным бедствиям, как землетрясение. Это объясняется тем, что ураганы несут в себе колоссальную энергию. Количество энергии, выделяемой средним по мощности ураганом в течение одного часа, равно энергии ядерного взрыва мощностью 36 Мт.

Ураганы вызывают огромные разрушения, нередко унося множество человеческих жизней, а материальный урон от них исчисляется миллиардами долларов.

Основными разрушительными факторами урагана является высокая скорость ветра, скоростной напор воздушного потока и продолжительность его действия. На величину ущерба, причиняемого ураганом, оказывают также большое влияние сопровождающие его гидрологические явления: огромные массы приливных вод на морском побережье и продолжительные ливневые дожди, вызывающие обширные наводнения. Кроме того, величина ущерба зависит от характера экономики района бедствия, рельефа местности, степени застройки и прочности строений, вида растительности, присутствия в зоне действия урагана населения, животных, времени года, проведенных профилактических мероприятий.

Ураганный ветер разрушает прочные и сносит легкие строения, опустошает засеянные поля, обрывает провода и валит столбы линий электропередач и связи, повреждает транспортные магистрали и мосты, ломает и выворачивает с корнями деревья, повреждает и топит суда, как в открытом море, так и в портах, вызывает аварии на коммунально-энергетических сетях.

Характеристиками последствий действия ураганного ветра являются: количество погибших и пострадавших, оставшихся без крова людей, количество разрушенных и поврежденных жилых домов, производственных и культурно-бытовых зданий, мостов, опор линий электропередач, связи и других народнохозяйственных объектов, площади сельскохозяйственных угодий с погибшими посевами, урожаем, количество погибших сельскохозяйственных животных и т.п.

Частота возникновения на территории России бурь и ураганов с различной скоростью ветра приведена в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Максимальная скорость (м/с) ветра, бурь и ураганов на территории России при различной частоте возникновения

Регион, город	Частота возникновения		
	0,2	0,05	0,02
1	2	3	4
Алтайский край:			
Барнаул	35	42	48
Рубцовск	30	36	41
Краснодарский край:			
Армавир	31	37	42
Новороссийск	42	50	57
Сочи	28	33	38
Красноярский край:			
Абакан	30	36	41
Ачинск	31	37	42
Диксон	42	50	57
Дудинка	32	38	44
Норильск	40	48	55
Приморский край:			
Владивосток	37	44	50
Находка	45	54	62
Ставропольский край:			
Пятигорск	26	31	38
Ставрополь	43	52	59

Окончание табл. 2.10

1	2	3	4
Хабаровский край:			
Комсомольск – на– Амуре	28	33	38
Хабаровск	27	32	37
Арзамас	27	32	37
Иваново	23	27	31
Кострома	28	33	38
Магнитогорск	30	36	41
Челябинск	23	27	31
Уфа	40	48	55
Новосибирск	26	31	35
Орел	27	32	37
Ростов-на-Дону	26	32	37
Рязань	26	31	35
Саратов	28	33	38

При ураганах различают четыре степени разрушения зданий и сооружений (слабая, средняя, сильная и полная), характеристики трех из которых приведены в табл. 2.11.

Таблица 2.11

Характеристика степеней разрушения зданий и сооружений при ураганах

Здания, сооружения и оборудование	Степень разрушения		
	Слабая	Средняя	Сильная
1	2	3	4
Производственные и административные здания	Разрушения наименее прочных конструкций зданий и сооружений: заполненных дверных и оконных проемов; небольшие трещины в стенах, откалывание штукатурки, падение кровельных черепиц, трещины в дымовых трубах или падение их отдельных частей	Разрушения перегородок, кровли, части оборудования; большие и глубокие трещины в стенах, падение дымовых труб, разрушение оконных и дверных заполнений, появление трещин в стенах	Значительные деформации несущих конструкций; сквозные трещины и проломы в стенах, обрушения частей стен и перекрытий нижних этажей

1	2	3	4
Технологическое оборудование	Повреждение и деформация отдельных деталей, электропроводки, приборов автоматики	Повреждение шестерен и повреждение передаточных механизмов, обрыв маховиков и рычагов управления, разрыв приводных ремней	Смещение с фундаментов и деформация станин, трещины в деталях, изгиб валов и осей
Подъемно-транспортные механизмы, крановое оборудование	Частичное разрушение и деформация обшивки повреждение стекол и приборов	Повреждение наружного оборудования, разрыв трубопроводов систем питания, смазки и охлаждения	Опрокидывание, срыв отдельных частей, общая деформация рамы
Газгольдеры, резервуары для нефтепродуктов и сжиженных газов	Небольшие вмятины, деформация трубопроводов, повреждение запорной арматуры	Смещения на опорах, деформация оболочек, подводящих трубопроводов, повреждение запорной арматуры	Срыв с опор, опрокидывание, разрушение оболочек, обрыв трубопроводов и запорной арматуры
Трубопроводы	Повреждения стыковых соединений, частичное повреждение КИП	Разрыв стыковых соединений, повреждения КИП и запорной арматуры, переломы труб на вводах и отдельных местах	Переломы труб на вводах. Разрыв и деформация труб. Сильные повреждения арматуры

Степень разрушения зданий и сооружений (табл. 2.12) зависит от скорости ветра и характеристики застройки, которая содержит данные по назначению, этажности зданий и сооружений, а также материалу стен, перекрытий и покрытий. Например, по этажности выделяют следующие типы зданий:

- малоэтажные (до 4 этажей);
- многоэтажные (от 5 до 8 этажей);
- повышенной этажности (от 9 до 25 этажей);
- высотные (более 25 этажей).

Скорость ветра (м/с), вызывающая определенную степень разрушения

№ п/п	Типы конструктивных решений здания, сооружения и оборудование	Степень разрушения			
		Слабая	Средняя	Сильная	Полная
1	Промышленные здания с легким металлическим каркасом и здания бескаркасные	25-30	30-50	50-70	>70
2	Кирпичные малоэтажные здания	20-25	25-40	40-60	>60
3	Кирпичные многоэтажные здания	20-25	25-35	35-50	>50
4	Административные многоэтажные здания с металлическими и ж/б каркасом	20-35	35-50	50-60	>60
5	Крупнопанельные жилые здания	20-30	30-40	40-50	>50
6	Складские кирпичные здания	25-30	30-45	45-55	>55
7	Легкие склады-навесы с металлическим каркасом	15-20	20-45	45-60	>60
8	Склады-навесы из ж/б элементов	25-35	35-55	55-70	>70
9	Трансформаторные подстанции закрытого типа	35-45	45-70	70-100	>100
Водонапорные баши:					
10	Кирпичные	30-35	35-55	55-85	>85
11	Стальные	30-35	35-55	55-85	>85
Резервуары:					
12	наземно-металлические	30-40	40-55	50-70	>70
13	Частично заглубленные	35-45	45-65	65-85	>85
14	газгольдеры	30-35	35-45	45-55	>55
Градирни:					
15	Прямоугольные вентиляторные с ж/б или стальным каркасом	15-20	20-30	30-40	>40
16	Цилиндрические вентиляторные из монолитного или сборного ж/б	20-25	25-35	35-45	>45
Насосные станции:					
17	Наземные кирпичные	25-30	30-40	40-50	>50
18	Наземные железобетонные	25-35	35-45	45-55	>55
19	Полузаглубленные железобетонные	35-40	40-50	50-65	>65
20	Ректификационные колонны	25-30	30-40	40-55	>55
21	Открытое распределительное	20-25	25-35	35-55	>55
22	Крановое оборудование	35-40	40-55	55-65	>65
23	Подъемно-транспортное оборудование	35-40	40-50	50-60	>60
24	Контрольно-измерительные приборы	20-25	25-35	35-45	>45
Трубопроводы:					
25	Наземные	35-45	45-60	60-80	>80
26	На металлических или ж/б эстакадах	35-40	40-55	55-65	>65
27	Кабельные наземные линии	25-30	30-40	40-50	>50
28	Воздушные линии низкого напряжения	25-30	30-45	45-60	>60
29	Кабельные наземные линии связи	20-25	25-35	35-50	>50

В зависимости от степени разрушения зданий в соответствии с табл. 2.13 определяются потери населения.

Таблица 2.13

Вероятность потерь населения в разрушенных зданиях при ураганах

Вероятность потерь	Степени разрушения зданий			
	Слабая	Средняя	Сильная	Полная
Общие	0,05	0,30	0,60	1,00
Безвозвратные	0	0,08	0,15	0,60

В результате проведенной таким образом оценки могут быть получены следующие данные:

- количество зданий и сооружений, получивших определенные степени разрушения;
- качественное описание разрушений зданий и сооружений;
- потери населения в результате разрушения зданий.

2.3. Прогнозирование и оценка обстановки при наводнениях

2.3.1. Общая характеристика наводнений

Под наводнением понимается затопление водой прилегающей к реке, озеру или водохранилищу местности, которое причиняет материальный ущерб, наносит урон здоровью населения или приводит к гибели людей. Затопление же водой местности, не сопровождающееся ущербом, есть разлив реки, озера или водохранилища.

На территории России находятся сотни тысяч больших и маленьких рек, озер, водохранилищ.

Речной бассейн – территория суши, с которой талая и дождевая вода стекает в реку. Различают бассейн реки (или иначе водосбор реки), бассейн озера, водохранилища и т.д. Важнейшей числовой характеристикой является размер водосбора, называемый площадью бассейна. Обычно различают ручьи (площадь водосбора менее 10 км²), малые реки с площадью водосборов от 10 до 5000 км², средние реки с водосборами от 5000 до 50 000 км² и большие реки с площадью водосбора более 50 000 км².

Важнейшей характеристикой реки является её водность, или сток воды – объем воды, проходящий через поперечное сечение русла за определенный интервал времени (месяц, квартал, сезон, год). Объем стока в единицу времени называют расходом воды. Обычно расход воды обозначают буквой Q и измеряют в м³/с. Хронологический график изменения расхода воды называют гидрографом стока.

На территории России находится широкая сеть гидрологических постов, занимающихся регистрацией гидрологических характеристик рек, озер, и водохранилищ. Обязательной регистрируемой характеристикой является уровень воды в реке, озере, водохранилище и т.д. Для каждого населенного пункта, расположенного вблизи водного объекта, устанавливаются некоторые критические значения уровня, так называемые опасные и особо опасные отметки. Опасная отметка – значение уровня воды, при превышении которого начинается затопление поймы, сельскохозяйственных угодий. Особо опасная отметка – значение уровня воды, при превышении которого начинается затопление прибрежных пунктов, хозяйственных объектов, дорог, линий электропередач и т.д.

В режиме рек обычно выделяют половодье, паводок и межень. Под половодьем принято понимать ежегодно повторяющийся в один и тот же сезон значительный и довольно продолжительный подъем уровня воды в реке. Как правило, половодье вызывается таянием снега на равнинах и дождевыми осадками, и происходит это весной. В горных районах выделяют весенне-летнее половодье, связанное с таянием снега и ледников в высокогорных областях и выпадением осадков. Паводок – это интенсивный, сравнительно кратковременный подъем уровня воды, вызванный дождями и ливнями, иногда таянием снега при зимних оттепелях. Меженью – называют период низкой водности рек, который устанавливается в зимний и летне-осенний сезоны, поэтому различают зимнюю и летне-осеннюю межень. В период половодий и паводков уровень воды в реках достигает наивысшего значения, которое называется максимальным уровнем воды в период половодья (или паводка). Данные о максимальных уровнях и расходах воды за год обобщаются, поскольку они имеют наибольшее значение при изучении наводнений и организации борьбы с ними. Именно максимальный уровень определяет площадь и глубину затоплений прибрежных территорий. Данные о максимальных уровнях воды используются при проектировании любых гидротехнических сооружений, а также жилых и хозяйственных объектов, расположенных в прибрежной зоне.

Наводнения в большей или меньшей степени периодически наблюдаются на большинстве рек России. По повторяемости, площади распространения и суммарному среднему годовому материальному ущербу в масштабах всей нашей страны наводнение занимает первое место в ряду стихийных бедствий. По человеческим жертвам и удельному материальному ущербу (т.е. ущербу, приходящемуся на единицу пораженной площади) наводнения занимают второе место после землетрясений. Ни в настоящем времени, ни в будущем наводнения как стихийное бедствие не могут быть целиком предотвращены. Их можно только ослабить и локализовать.

В России площадь паводкоопасных территорий составляет 400 тыс. км². Ежегодно подвергается затоплению около 50 тыс. км² территорий. Наводнениям с катастрофическими последствиями подвержена территория в 150 тыс. км², где расположены 300 городов, десятки тысяч населенных пунктов, большое количество хозяйственных объектов, более 7 млн га сельхозугодий. Среднегодовое материальное повреждение от наводнений оценивается в 41,6 млрд рублей в год (в ценах 2001 г.)

В зависимости от причин выделяются четыре группы наводнений.

1-я группа – наводнения, связанные в основном с максимальным стоком от весеннего таяния снега. Такие наводнения отличаются значительным довольно длительным подъемом уровня воды в реке и называется обычно половодьем.

2-я группа – наводнения, формируемые интенсивными дождями, иногда таянием снега при зимних оттепелях. Они характеризуются интенсивными, сравнительно кратковременными подъемами уровня воды и называются паводками.

3-я группа – наводнения, вызванные в основном большим сопротивлением, которое водный поток встречает в реке. Это обычно происходит в начале и в конце зимы при зажорах и заторах льда.

4-я группа – наводнения, создаваемые ветровыми нагонами воды на крупных озерах и водохранилищах, а также в морских устьях рек.

Существует еще пятый вид наводнений – наводнения при прорыве плотин.

По размерам или масштабам и по наносимому суммарному ущербу наводнения делятся также на четыре группы.

1-я группа – низкие (малые) наводнения. Наблюдаются в основном на равнинных реках и имеют повторяемость примерно один раз в 5–10 лет. Затопления при этом менее 10 % сельскохозяйственных угодий, расположенных в низких местах. Эти наводнения наносят

незначительный материальный ущерб и почти не нарушают ритма жизни населения.

2-я группа – высокие наводнения. Сопровождаются значительным затоплением, охватывают сравнительно большие участки речных долин и иногда существенно нарушают хозяйственный и бытовой уклад населения. В густонаселенных районах высокие наводнения нередко приводят к частичной эвакуации людей, наносят ощутимый материальный и моральный ущерб.

3-я группа – выдающиеся наводнения. Такие наводнения охватывают целые речные бассейны. Они парализуют хозяйственную деятельность и резко нарушают бытовой уклад населения, наносят большой материальный и моральный ущерб. Во время выдающихся наводнений обычно возникает необходимость массовой эвакуации населения и материальных ценностей из зоны затопления и защиты наиболее важных хозяйственных объектов. Выдающиеся наводнения повторяются примерно один раз в 50–100 лет. Затопляется при этом 50–70 % сельскохозяйственных угодий – основные сенокосно-пастбищные угодья и половина пахотных земель поймы. Начинается затопление населенных пунктов.

4-я группа – катастрофические наводнения. Они вызывают затопления громадных территорий в пределах одной или нескольких речных систем. При этом в зоне затопления полностью парализована хозяйственная и производственная деятельность, временно изменяется жизненный уклад населения. Такие наводнения приводят к огромным материальным убыткам и гибели людей и случаются не чаще одного раза в 100–200 лет или еще реже. Затопляется более 70 % сельскохозяйственных угодий, населенные пункты, промышленные предприятия и инженерные коммуникации.

По условиям формирования стока и, следовательно, по условиям возникновения наводнений реки России подразделяются на четыре типа.

1-й тип – реки с максимальным стоком, вызываемым таянием снега на равнинах. Для таких рек причиной наводнений является сезонное (весеннее) таяние снежного покрова. К этому типу относится большинство рек Европейской части России и Западной Сибири.

2-й тип – реки с максимальным стоком, возникающим при таянии горных снегов и ледников. Причиной наводнений для таких рек является интенсивное таяние ледников и снежного покрова, расположенных высоко в горах, которое может наблюдаться несколько

раз в течение года (в зависимости от погодных условий). К этому типу относятся реки Северного Кавказа.

3-й тип – реки с максимальным стоком, обусловленным выпадением интенсивных дождей. Для такого типа рек, так же как и для 2-го типа, характерно наличие нескольких пиков стока воды в течение года. К этому типу относятся реки Дальнего Востока и Сибири.

4-й тип – реки с максимальными стоками, образующимися от совместного влияния снеготаяния и выпадения осадков. Режимы этих рек характеризуются весенним половодьем от таяния снегов, повышением летнего и зимнего стока за счет обильного грунтового питания, а также значительными осенними осадками. Наличие такого типа рек характерно для северо-западных районов России и некоторых районов Кавказа.

Особенно опасные наводнения наблюдаются на реках дождевого и ледникового питания или при сочетании этих двух факторов.

2.3.2. Поражающие факторы наводнений и прогнозирование их последствий

Разливы воды, сопровождающиеся повышением ее уровня с затоплением прилегающих территорий, влекут за собой материальный ущерб, создают угрозу жизни и здоровью населения.

По данным ЮНЕСКО, за последнее столетие от наводнений погибло около 10 млн человек (для сравнения: от землетрясений и ураганов – 2 млн человек); убытки мировой экономики исчисляются десятками миллиардов долларов, достигая в некоторых странах 15 % валового продукта.

Из поражающих факторов наводнений выделяют: гидродинамический – в виде потока (течения) воды; гидрохимический – обуславливающий загрязнение гидросферы, почв, грунтов, а также ускорение процессов коррозии, гниения и других химических и микробиологических процессов.

К основным характеристикам последствий наводнения относятся:

- численность населения, оказавшегося в зоне, подверженной наводнению (здесь можно выделить число жертв, количество раненых, количество населения, оставшегося без крова, и т.п.);
- количество населенных пунктов, попавших в зону, охваченную наводнением (здесь можно выделить города, поселки городского типа,

сельские населенные пункты, полностью затопленные, частично затопленные, попавшие в зону подтопления, и т.п.);

- количество объектов различных отраслей народного хозяйства, оказавшихся в зоне, охваченной наводнением;
- протяженность железных и автомобильных дорог, линий электропередач, линий коммуникаций и связи, оказавшихся в зоне затопления;
- количество мостов и тоннелей, затопленных, разрушенных и поврежденных в результате наводнения;
- площадь сельскохозяйственных угодий, охваченных наводнением;
- количество погибших сельскохозяйственных животных и тому подобное, а также такие обобщенные характеристики, как величины ущерба, наносимого наводнением различным отраслям народного хозяйства.

Различают прямой и косвенный ущерб от наводнений.

К видам прямого ущерба, например, относятся:

- повреждение и разрушение жилых и производственных зданий, железных и автомобильных дорог, линий электропередач и связи, мелиоративных систем и пр.;
- гибель скота и урожая сельскохозяйственных культур;
- уничтожение и порча сырья, топлива, продуктов питания, кормов, удобрений и пр.;
- затраты на временную эвакуацию населения и материальных ценностей в незатопляемые места;
- смыв плодородного слоя почвы и занесение почвы песком и илом.

Виды косвенного ущерба:

- затраты на приобретение и доставку в пострадавшие районы продуктов питания, строительных материалов, кормов для скота;
- сокращение выработки продукции и замедление темпов развития народного хозяйства;
- ухудшение условий жизни населения;
- невозможность рационального использования территории;
- увеличение амортизационных расходов на содержание зданий в нормальном состоянии.

Часто косвенный ущерб превышает прямой.

Наводнение иногда сопровождается пожарами – вследствие обрывов и короткого замыкания электрических кабелей и проводов. Здания, периодически попадающие в зону затопления, теряют

капитальность: повреждается гнилью дерево, отваливается штукатурка, выпадают кирпичи, подвергаются коррозии металлические конструкции и прочее, а главное, из-за разжижения и размыва грунта под фундаментом происходит неравномерная осадка зданий и, как следствие, появляются трещины.

При подтоплении города из-за неравномерной осадки грунта происходят частые разрывы канализационных и водопроводных труб, электрических, телевизионных и телеграфных кабелей и т.п.

Для городов и населенных пунктов существуют понятия «подтопление» и «затопление». При подтоплении вода проникает в подвальные помещения через канализацию (если она имеет входы в реку), по разного рода засыпанным канавам и траншеям (в них заложены тепловые, водопроводные и иные сети) или из-за подпора грунтовых вод. В случае же затопления местность покрывается слоем той или иной высоты.

При прогнозировании последствий наводнений схематически сечение русла реки можно представить либо треугольным сечением (рис. 2.2, а), либо сечением трапециевидного вида (рис. 2.2, б).

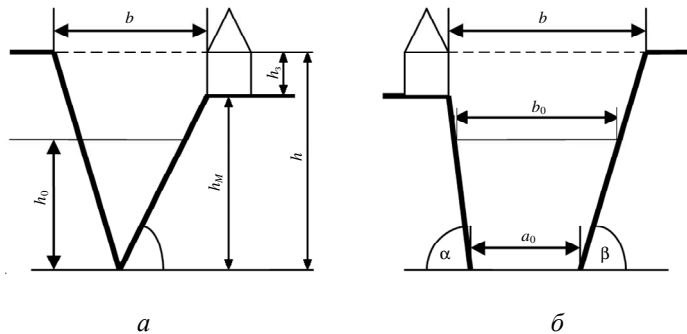


Рис. 2.2. Расчетная схема сечения реки:
а – треугольное сечение, б – трапециевидное сечение

На данном рисунке: a_0 – ширина дна реки; b_0, b – ширина реки до и во время наводнения; h_0, h – глубина реки до и во время наводнения; h_3 – глубина затопления; h_M – высота места.

Расход воды в реке до наступления наводнения (паводка) Q_0 , м³/с, равен

$$Q_0 = V_0 S_0, \quad (2.17)$$

где V_0 – скорость воды в реке до наступления паводка, м/с; S_0 – площадь сечения русла реки до паводка, м², равная:

$$S_0 = 0,5b_0h_0 \text{ – для треугольного сечения;} \quad (2.18)$$

$$S_0 = 0,5 \cdot (a_0 + b_0)h_0 \text{ – для трапециевидного сечения.} \quad (2.19)$$

Расход воды после выпадения осадков (таяния снега) и наступления половодья (паводка) Q_{\max} , м³/с, равен

$$Q_{\max} = Q_0 + JF/3,6, \quad (2.20)$$

где J – интенсивность осадков (таяния снега), мм/ч; F – площадь выпадения осадков (таяния снега), км².

Высота подъема воды в реке при прохождении паводка h , м, независимо от формы профиля русла реки определяется по формуле:

$$h = (2Q_{\max}h_0^{5/3}/b_0V_0)^{3/8} - h_0. \quad (2.21)$$

Максимальная скорость потока воды при прохождении паводка V_{\max} , м/с, равна

$$V_{\max} = Q_{\max}/S_{\max}, \quad (2.22)$$

где S_{\max} – площадь поперечного сечения потока при прохождении паводка, м², определяемая по формуле:

$$S_{\max} = (S_0 + 0,5h(b_0 - a_0))(1 + h/h_0). \quad (2.23)$$

В случае треугольного профиля русла реки следует считать $a_0 = 0$.

Поражающее действие паводка определяется глубиной затопления h_3 , м:

$$h_3 = h - h_M \quad (2.24)$$

и максимальной скоростью потока затопления V_3 , м/с:

$$V_3 = V_{\max}f. \quad (2.25)$$

Параметр удаленности объекта от русла реки f определяется по табл. 2.14.

Таблица 2.14

Значение параметра f

h/h	Сечение русла		
	Прямоугольное	Трапецидальное	Треугольное
0,1	0,2	0,23	0,3
0,2	0,38	0,43	0,5
0,4	0,60	0,64	0,72
0,6	0,76	0,84	0,96
0,8	0,92	1,05	1,18
1,0	1,12	1,2	1,32

Поражающее действие волны затопления паводка может быть оценено по табл. 2.15.

Таблица 2.15

Значения параметров волны затопления, приводящие к разрушениям объектов

Наименование объекта	Степень разрушения					
	Сильная		Средняя		Слабая	
	v , м/с	h , м	v , м/с	h , м	v , м/с	h , м
Здания и сооружения портов						
Сборные деревянные жилые дома	3,0	2,0	2,5	1,5	1,0	1,0
Деревянные дома (1...2 этажа)	3,5	2,0	2,5	1,5	1,0	1,0
Кирпичные малоэтажные здания (1...3 этажа)	4,0	2,4	3,0	2,0	2,0	1,0
Промышленные здания с легким металлическим каркасом и здания бескаркасной постройки	5,0	2,5	3,5	2,0	2,0	1,0
Кирпичные дома средней этажности (4 этажа)	6,0	3,0	4,0	2,5	2,5	1,5
Промышленные здания с тяжелым металлическим или ж/б каркасом (стены из керамзитовых панелей)	7,5	4,0	6,0	3,0	3,0	1,5
Бетонные и железобетонные здания, здания антисейсмической конструкции	12,0	4,0	9,0	3,0	4,0	1,5
Деревянные мосты (поток проезжей части)	1,0	2,0	1,0	1,5	0,0	0,5
Железобетонные мосты	2,0	3,0	1,0	2,0	0,0	0,5
Металлические мосты и путепроводы с пролетом (30...100 м)	2,0	3,0	1,0	2,0	0,0	0,5
То же с пролетом более 100 м	2,0	2,5	1,0	2,0	0,0	0,5
Железнодорожные пути	2,0	2,0	1,0	1,0	0,5	0,5
Дороги с гравийным (щебеночным) покрытием	2,5	2,0	1,0	1,5	0,5	0,5
Шосейные дороги с асфальтовым и бетонным покрытием	4,0	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0

Наводнение и паводок оказывают продолжительное воздействие, усугубляющее первоначальное разрушающее воздействие волны затопления (табл. 2.16).

Таблица 2.16

Доля поврежденных объектов (%) на затопленных площадях при крупных наводнениях ($V_3=3-4$ м/с)

Объект	Время затопления, ч					
	1	2	3	4	24	48
Затопление подвалов	10	15	40	60	85	90
Нарушение дорожного движения	15	30	60	75	95	100
Разрушение уличных мостовых	-	-	3	6	30	5
Смыв деревянных домов	-	7	70	90	100	100
Разрушение кирпичных зданий	-	-	10	40	50	60
Прекращение электропитания	75	90	90	100	100	100
Прекращение телефонной связи	75	85	100	100	100	100
Повреждение систем газо- и теплоснабжения	-	-	7	10	30	70
Гибель урожая	-	-	-	-	3	8

Примечание. При $V_3=1,5-2,5$ м/с приведенные в таблице значения необходимо умножить на 0,6; при $V_3=4,5-5,5$ м/с – умножить на 1,4.

2.4. Прогнозирование и оценка обстановки при лесных пожарах

2.4.1. Общая характеристика лесных пожаров

Лес – это совокупность земли, древесной, кустарниковой и травяной растительности, животных, микроорганизмов и других компонентов окружающей среды, биологически взаимосвязанных и влияющих друг на друга в своем развитии.

Россия владеет 22 % от общей площади лесов всего мира. Это 1 млрд 200 млн га, или почти две трети территории нашей страны.

На активно охраняемой территории лесного фонда России ежегодно регистрируются от 10 до 35 тыс. лесных пожаров, охватывающих площади от 0,5 до 2,5 млн га. С учетом горимости лесов на неохранных и эпизодически охраняемых территориях северных районов Сибири и Дальнего Востока общая величина пройденной огнем площади составляют от 2,0 до 5,5 млн га. В результате сгорания органических материалов с этих площадей ежегодно выделяется

от 14 до 40 млн т углерода. Пожары – главный природный фактор гибели лесов России.

Основной период действия природных пожаров на территории Российской Федерации – с апреля по октябрь. В конце весны горят леса Приморья, Алтая, Бурятии и Поволжья. Ближе к середине лета огонь перемещается на Северо-запад России – в Карелию, Ленинградскую, Новгородскую и Псковскую области, а также к Магадану, на Сахалин и Красноярский край. Осенью территорией огня вновь станут приграничные с Китаем регионы: Бурятия, Приамурье, Читинская область, а также Хабаровский край. В Сибири и на Дальнем Востоке, по мнению лесоводов, вообще нет лесных участков, не пройденных лесными пожарами за последние сто лет. Огромные площади и слабо развитая дорожная сеть делают здесь последствия лесных пожаров особенно тяжелыми.

Лесной пожар – это неуправляемое (стихийное) горение, распространяющееся по лесной площади.

Лесные пожары принято подразделять на низовые, верховые и подземные (почвенные). В свою очередь низовые и верховые пожары могут быть устойчивыми и беглыми.

Устойчивый низовой пожар распространяется по нижнему ярусу леса (горит надпочвенный покров, подлесок, валежник) с малой скоростью (до 0,5 м/мин), охватывая нижние части стволов деревьев и выступающие на поверхность корни.

При беглом низовом пожаре сгорает живой и мертвый напочвенный покров, валежник, самосев леса, хвойный подрост и подлесок, но за счет более благоприятных условий (сухой лес, ветреная погода) такой пожар распространяется с повышенной скоростью (более 1 м/мин) и высотой пламени, обходя места с повышенной влажностью покрова.

Для низового пожара характерна вытянутая форма пожарища с неровной кромкой. Цвет дыма – светло-серый, скорость распространения низовых пожаров против ветра в 6–10 раз меньше, чем по ветру. В ночное время суток скорость распространения пожара меньше, чем днем.

При изменении направления ветра усложняется определение формы пожара и его основных элементов фронта, тыла, флангов. В таких случаях, особенно когда пожар принял большие размеры, возможно окружение огнем людей в лесу. Ориентироваться в обстановке при крупных пожарах можно только с помощью авиационной разведки.

Верховой устойчивый пожар является следующей стадией низового пожара, пламя низового пожара поджигает кроны деревьев, при этом сгорают хвоя, листья, мелкие и более крупные ветви.

При верховом беглом пожаре, который возникает только при сильном ветре, огонь распространяется по кронам деревьев «скачками», опережая фронт низового пожара. Ветер также разносит горящие ветви, другие мелкие горящие объекты и искры, которые создают новые очаги низовых пожаров на сотни метров вперед основного очага. В ряде случаев огонь «перебрасывается» указанным способом через реки, широкие дороги, безлесные участки и другие кажущиеся рубежи для локализации пожара.

Верховые пожары, выделяя большое количество теплоты, вызывают восходящие потоки продуктов горения и нагретого воздуха и образуют конвективные колонки диаметром в несколько сотен метров. Их поступательное движение совпадает с направлением продвижения фронта пожара. Пламя в середине колонки может подниматься на высоту до 100–120 м. Конвективная колонка увеличивает приток воздуха в зону пожара и порождает ветер, который усиливает горение.

Форма площади при беглом верховом пожаре вытянута по направлению ветра. Дым верхового пожара темный. Подземные (почвенные) пожары возникают на хорошо просохших участках с торфяными почвами или с мощным слоем лесной подстилки (до 20 см и более). Пожар по слою торфа распространяется медленно – до нескольких метров в сутки. Торф и лесная подстилка сгорают на всю глубину сухого слоя или до минеральной (земляной) почвы.

Чаще всего почвенные лесные пожары представляют собой дальнейшую стадию развития низовых. На первой стадии пожара более сухой торфянистый слой выгорает только под деревьями, которые беспорядочно падают, и лесной участок, поврежденный пожаром, выглядит как изрытый. Затем продолжается почвенное воронкообразное горение в глубь торфяного слоя. При ветре горящие частицы торфа и лесной подстилки перебрасываются на соседние участки, способствуя развитию пожара по площади торфопочвы, возникновению низовых пожаров.

К крупным лесным пожарам относят пожары площадью более 200 га в Азиатской части России и более 25 га – в Европейской части России. Крупные пожары чаще всего бывают смешанными – низовыми и верховыми одновременно.

Для возникновения крупных лесных пожаров с переходом в верховые необходимо большое количество действующих очагов (участков) низовых пожаров, сухая жаркая погода (III–V классы пожарной опасности), усиление ветра от умеренного до сильного или штормового.

В таких случаях может происходить слияние многочисленных очагов пожара и образование обширных зон массовых пожаров площадью до сотен тысяч гектаров, создаваться непосредственная угроза уничтожения огнем населенных пунктов и объектов различного назначения, расположенных в лесных массивах или вблизи них.

По многолетним данным, лесные пожары в России по видам распределяются следующим образом: низовые составляют 98 % от годового количества пожаров и охватывают 81,4 % площади, почвенные – 0,5 %, их площадь 0,02 %. В отдельные засушливые годы количество почвенных пожаров возрастает до 2 %, но в целом приведенные показатели стабильны.

Почти все крупные пожары возникают в экстремальных погодных условиях – в засуху.

Засуха – это бездождевой период, достаточно продолжительный для того, чтобы усваиваемая растениями влага в корнеобитаемом слое почвы была исчерпана. Например, критическим условием возникновения крупных пожаров в лесах Сибири и Дальнего Востока являются: весной – 10-дневный период без дождя, летом – 20-дневный, осенью – 30–40-дневный.

В настоящее время аномально жарким в России является каждое второе лето. Если в 90-е годы прошлого столетия повышенная интенсивность пожаров отмечалась раз в три года, то последние шесть лет она наблюдается раз в два года.

2.4.2. Чрезвычайная лесопожарная ситуация, её предпосылки, критерии и параметры

Пожарной опасностью обычно называется угроза возникновения пожара, выражаемая его вероятностью. Однако в последнее время термин «пожарная опасность» приобретает новое значение в виде угрозы нанесения определенного ущерба в результате деятельности неуправляемых лесных пожаров.

Предпосылками чрезвычайной лесопожарной ситуации являются:

- малоснежная зима, длительный бездождевой период (15–20 дней) с высокой (выше средней многолетней) среднесуточной

температурой воздуха и малой относительной влажностью в начале пожароопасного сезона, когда степень пожарной опасности в лесу по условиям погоды характеризуется IV, V классами пожарной опасности, атмосферная засуха в любое время пожароопасного сезона;

- наличие в лесном фонде бесконтрольных антропогенных источников огня и/или частные грозные разряды при высокой степени пожарной опасности в лесу по условиям погоды.

Критериями чрезвычайной лесопожарной ситуации служат:

- наличие крупных лесных пожаров;
- количество возникающих в один день и/или одновременно действующих лесных пожаров, превышающее средний многолетний уровень;
- наличие лесных пожаров, вышедших из-под контроля лесной охраны.

Степень пожарной опасности в лесу по условиям погоды определяются по принятому в лесном хозяйстве комплексному показателю В.Г. Нестерова (K), который вычисляется на основе данных о температуре воздуха (в градусах), температуре точки росы (в градусах), количестве выпавших осадков (в миллиметрах) по формуле:

$$K = \sum_1^n (t_{\text{воз}} - t_{\text{росы}}) \cdot t_{\text{воз}}, \quad (2.26)$$

где $t_{\text{воз}}$ – температура воздуха в 12 часов по местному времени, $t_{\text{росы}}$ – точка росы в 12 часов по местному времени, в градусах; n – число дней после последнего дождя. Если погодные условия в течение n дней не меняются, то:

$$K = n \cdot (t_{\text{воз}} - t_{\text{росы}}) \cdot t_{\text{воз}}. \quad (2.27)$$

Общероссийская шкала имеет пять классов пожарной опасности в лесу по условиям погоды (табл. 2.17).

Для отдельных регионов разработаны региональные шкалы пожарной опасности в лесу по условиям погоды, учитывающие местные особенности и в которых значения комплексного показателя по классам отличаются от значений общероссийской шкалы.

Таблица 2.17

Шкала пожарной опасности в лесу по условиям погоды

Класс пожарной опасности по условиям погоды	Значение комплексного показателя K	Степень пожарной опасности
I	До 300	–
II	От 301 до 1000	Малая
III	От 1001 до 4000	Средняя
IV	От 4001 до 10000	Высокая
V	Более 10000	Чрезвычайная

Каждому типу лесного массива соответствует свое значение комплексного показателя K , при котором возможно возгорание лесного массива (табл. 2.18).

Таблица 2.18

Значения комплексного показателя пожарной опасности, при котором возможно возгорание леса

Наименование участка леса	K
Сосняки – брусничники	300
Ельники – брусничники	500
Сосняки	550
Смешанные	800
Лиственные	900
Березняки – черничники	900
Травяные насаждения	5000

Для России по загораемости может быть выделено три основные группы древесных пород. К первой группе относятся типы лесов, характеризующиеся наибольшей загораемостью (хвойные молодняки, сосняки с наличием соснового подростка), ко второй группе – умеренной загораемости (сосняки, ельники, кедровники), к третьей – трудно загорающиеся (березняки, осинники, ольховники и другие лиственные породы).

2.4.3. Количественные характеристики распространяющегося лесного пожара и его поражающие факторы

У распространяющегося лесного низового пожара различают фронт, тыл и фланги, линейные скорости которых в зависимости от скорости ветра $V_{в}$, м/с и группы леса по загораемости приведены на рис. 2.3, а, б, в.

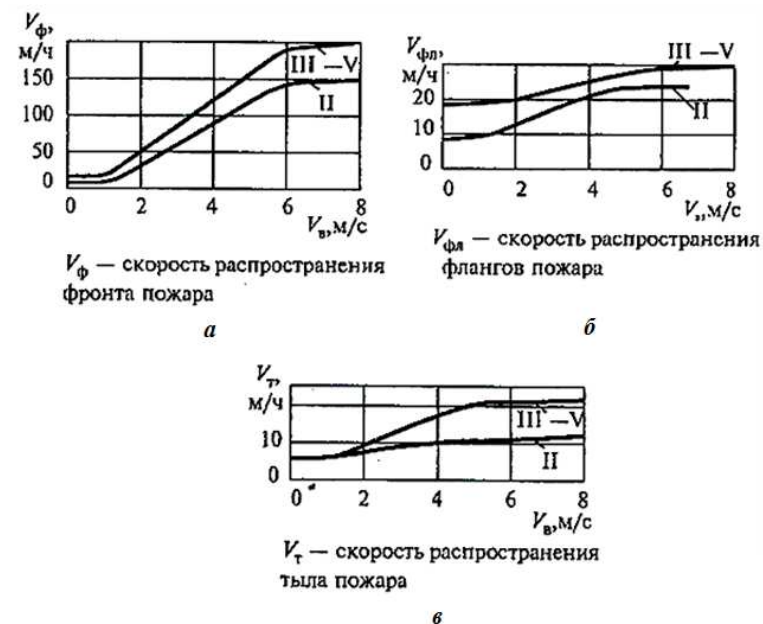


Рис. 2.3. Зависимость линейной скорости распространения низового пожара от скорости ветра для насаждений первой группы по загораемости (римскими цифрами обозначены классы пожарной опасности погоды)

Приращение периметра пожара $\Delta\Pi$, м, за время распространения τ , ч, можно найти по формуле:

$$\Delta\Pi = 3,3 \tau, \quad (2.28)$$

где $V_{ф}$ – скорость распространения фронта пожара, м/с.

Если начальный периметр пожара Π_0 , м, известен (задан), то через время с начала пожара τ , ч, периметр будет равен

$$\Pi = \Pi_0 + \Delta\Pi, \quad (2.29)$$

а площадь пожара S , га, ожжет быть рассчитана по формуле:

$$S = 4 \cdot 10^{-6} \Pi^2. \quad (2.30)$$

Доля непригодной к реализации древесины после верхового пожара может быть определена по табл. 2.19.

Таблица 2.19

Доля (%) непригодной к реализации древесины по видам после верховых пожаров

Вид пожара	Сосна	Кедр	Ель, пихта
Верховой устойчивый	50	30	70
Верховой беглый	30	20	60

Основными поражающими факторами лесных пожаров являются:

- теплофизический, проявляющийся в виде пламени, нагрева тепловым потоком, теплового удара, помутнения воздуха;
- химический, проявляющийся в виде загрязнения атмосферы, почвы, грунтов, гидросферы.

Пожары ежегодно наносят ущерб лесному хозяйству России в размере 1–5 млрд рублей, обесценивая при этом иногда свыше 200 млн кубометров древесины. Лесные пожары повреждают или уничтожают ценную древесину и пагубно влияют на возобновление её ресурсов. Лишая почву растительного покрова, они приводят к серьезному и долговременному ухудшению состояния водосборных бассейнов, снижают рекреационную и научную ценность ландшафтов. При этом страдают или гибнут люди и животные, сгорают жилые дома и другие постройки.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое землетрясение и сопровождающие его сейсмические волны?
2. Приведите основные параметры, характеризующие землетрясения.
3. Приведите методы оценки разрушений в зоне землетрясения.
4. Каковы методы оценки потерь населения в зонах разрушительных землетрясений?
5. Приведите характеристику и параметры разрушительного воздействия ураганов.
6. Каковы методы оценки степени разрушений и вероятности гибели людей при ураганах?

7. Приведите основные положения прогнозирования параметров паводкового наводнения.

8. Методы оценки степени разрушения объектов в зонах наводнений.

9. Назовите виды лесных пожаров, причины и условия их возникновения.

10. Приведите методы количественной оценки лесопожарной ситуации.

11. Каковы количественные характеристики распространяющегося лесного пожара.

12. Назовите методы оценки ущерба от лесных пожаров.

Глава 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ТЕХНОГЕННЫХ ОПАСНОСТЕЙ

3.1. Основные допущения

При прогнозировании обстановки в чрезвычайных ситуациях техногенного характера, принимают следующие допущения:

- рассматривают негативные события (источники чрезвычайных ситуаций), наносящие наибольший ущерб;
- масса (объем) выброса (сброса) вещества или энергии при техногенной аварии принимаются максимально возможными в данных условиях;
- метеоусловия – устойчивость атмосферы, скорость и направления ветра, температура воздуха, влажность и тому подобное принимаются наиболее благоприятными (в частности, скорость ветра 1 м/с, температура 20 °С) для распространения пыли-паро-газового облака (радиоактивного, токсического, взрывоопасного);
- распределение населения в домах, на улице, в транспорте, на производстве принимается соответствующим среднестатистическому, с равномерной плотностью населения (персонала) в пределах населенного пункта (объекта экономики) (табл. 2.9).

3.2. Прогнозирование последствий аварий, связанных со взрывами

3.2.1. Поражающие факторы взрывов. Взрыв конденсированных взрывчатых веществ

При взрывах конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) возникают два основных поражающих фактора: воздушная ударная волна и разлет осколков.

Воздушная ударная волна характеризуется тремя параметрами:

- избыточным давлением на фронте ударной волны, ΔP_{ϕ} , кПа;
- длительностью фазы сжатия, τ_+ , с;
- импульсом фазы сжатия, I_+ , кПа*с;

Основным поражающим параметром является избыточное давление на фронте ударной волны.

Разлет осколков характеризуется следующими параметрами:

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

Установлено, что избыточное давление на фронте воздушной ударной волны является функцией приведенного радиуса зоны взрыва:

$$\bar{R} = R/\sqrt[3]{G_{\text{тнт}}\phi},$$

где ϕ – коэффициент, учитывающий характер подступающей поверхности, который принимается равным: для металла – 1; бетона – 0,95; грунта – 0,6–0,8.

Для определения зависимости избыточного давления на фронте ударной волны ΔP_{ϕ} , кПа, от расстояния R , м, до эпицентра наземного взрыва конденсированного взрывчатого вещества в диапазоне $1 \leq \bar{R} \leq 100$ наиболее часто используют формулу М.А. Садовского:

$$\Delta P_{\phi} = \frac{95}{\bar{R}} + \frac{390}{\bar{R}^2} + \frac{1300}{\bar{R}^3}. \quad (3.1)$$

В более узких диапазонах изменения \bar{R} применяют также формулы:

$$\Delta P_{\phi} = \begin{cases} \frac{700}{3(\sqrt{1+\bar{R}^3}-1)}, & \bar{R} \leq 6,2; \\ \frac{70}{\bar{R}\sqrt{\lg \bar{R}-0,332}}, & \bar{R} > 6,2. \end{cases}$$

Величину импульса фазы сжатия I_+ , кПа*с, на расстоянии R , м, от эпицентра взрыва для ориентировочных расчетов можно определить по приближенной формуле:

$$I_+ \cong \frac{0,4G_{\text{тнт}}^{2/3}}{\sqrt{R}}. \quad (3.2)$$

Здесь $G_{\text{тнт}}$ – тротильный эквивалент, равный массе тринитротолуола (тротила), при взрыве которой выделяется такое же количество энергии, как и при взрыве рассматриваемого взрывчатого вещества G , кг. Величина $G_{\text{тнт}}$ (кг) определяется по формуле:

$$G_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{V_{\text{ВВ}}}}{Q_{V_{\text{ТНТ}}}}, \quad (3.3)$$

где $Q_{V_{\text{ВВ}}}$ и $Q_{V_{\text{ТНТ}}}$ – энергии взрывов 1 кг рассматриваемого взрывчатого вещества и тротила, кДж/кг, приведенные в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Энергии взрыва Q_v (кДж/кг) конденсированных взрывчатых веществ

Взрывчатое вещество	Q_v	Взрывчатое вещество	Q_v
Индивидуальные:		Смеси:	
Тротил (ТНТ)	4520	Амматол 80/20 (80% нитрата аммония +20% ТНТ)	2650
Гексоген	5360		
Октоген	5860	60% нитроглицериновый динамит	2710
Нитроглицерин	6700		
Тетрил	4500	Торпекс (42% гексогена +40% ТНТ +18 Al)	7540
Гремухая ртуть	1790	Пластическое ВВ (90% нитроглицерина +8% нитроцеллюлозы +1% щелочи +0,2% H ₂ O)	4520

3.2.2. Моделирование взрыва парогазовоздушного облака в неограниченном пространстве

Парогазовоздушное (ПГВ) облако образуется при авариях в системах переработки, транспортировке и хранения перегретых жидкостей и сжатых газов, а также при испарении разлившейся горючей жидкости (нефть, бензин и т. п.).

При аварии агрегата, содержащего горючие жидкости или газы, принимается, что все содержимое аппарата поступает в окружающее пространство и одновременно происходит утечка вещества из подводящего и отводящего трубопроводов в течение времени, необходимого для отключения трубопроводов (табл.3.2).

Таблица 3.2

Расчетное время отключения трубопроводов

Характеристика системы автоматики	Расчетное время отключения, с
Вероятность отказов менее 10^{-6} год ⁻¹ или обеспечено резервирование ее элементов	Менее 120
Вероятность отказов более 10^{-6} год ⁻¹ или не обеспечено резервирование ее элементов	120
Ручное отключение	300

Масса газа m_g (кг), поступившего в окружающее пространство при аварии аппарата, равна

$$m_g = (V_a + V_T)\rho_g, \quad (3.4)$$

где $V_a = 0,01 \cdot P_1 V_1$ – объем газа, прошедшего из аппарата, м³; P_1 – давление в аппарате, кПа; V_1 – объем аппарата, м³; $V_T = V_{T1} = V_{T2}$ – объем газа, вышедшего из трубопровода, м³; $V_{T1} = Q_T$ – объем газа, вышедшего из трубопровода до его отключения, м³; Q – расход газа, определяемый в соответствии с технологическим регламентом в зависимости от давления в трубопроводе, его диаметра, температуры газа и т.п., м³/с; τ – время, определяемое по табл. 3.2.

$V_{T2} = 0,01\pi P_2 \sum_{i=1}^n r_i^2 L_i$ – объем газа, вышедшего из трубопровода после его отключения, м³; 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; n – число поврежденных участков трубопровода; ρ_g – плотность паров газа, кг/м³.

При аварии аппарата с жидкостью часть жидкости может находиться в виде пара, вырывающегося при аварии в окружающее пространство, образуя первичное облако. Оставшаяся часть жидкости разливается либо внутри обваловки (поддона), либо на грунте с последующим испарением с зеркала разлива с образованием вторичного облака.

Масса пара в первичном облаке $m_{п,1}$ (кг) равна

$$m_{п,1} = \alpha \frac{M(V_1 P_1 + V_T P_2)}{RT_{ж}}, \quad (3.5)$$

где α – объемная доля оборудования, заполненного газовой фазой; V_1 , P_1 , Па, V_T и P_2 , Па. – то же, что и в формуле (3.5); $T_{ж}$ – температура жидкости в аппаратуре, К; M – молекулярная масса жидкости, кг/кмоль; R – универсальная газовая постоянная газа, равная 8310 Дж/(К·моль).

Если разлившаяся жидкость имеет температуру $T_{ж}$ выше, чем температура кипения $T_{кип}$ и температура окружающей среды T_{oc} ($T_{ж} > T_{кип} > T_{oc}$), то она кипит за счет перегрева с образованием пара с массой $m_{п,пер}$, кг

$$m_{п.пер} = \frac{C_p (T_{ж} + T_{кип})}{L_{кип}} m_{ж}, \quad (3.6)$$

где $L_{кип}$ – удельная теплота кипения жидкости при температуре перегрева $T_{ж}$, Дж/кг; C_p – удельная теплоемкость жидкости при температуре перегрева $T_{ж}$, Дж/(кг·К); $m_{ж}$ – масса перегретой жидкости, кг.

Разлившаяся жидкость с температурой $T_{ж} < T_{кип}$ испаряется с образованием пара массой $m_{п.исп}$, кг, во вторичном облаке.

$$m_{п.исп} = WF_{исп} \tau_{исп}, \quad (3.7)$$

где W – интенсивность испарения жидкости, кг/(м²·с); $F_{исп}$ – площадь испарения (разлива), м², равная площади обваловки (поддона) или площади поверхности, занимаемой разлившейся жидкостью исходя из расчета, что 1 л смесей и растворов, содержащих 70 % и менее (по массе) растворителей, разливается на 0,1 м², остальные жидкости на 0,15 м²; $\tau_{исп}$ – время испарения разлившейся жидкости, с, равное либо времени полного испарения [$\tau_{исп} = m_{ж}/(WF_{исп})$], либо ограниченное временем 3600 с, в течение которых должны быть приняты меры по устранению аварии.

Интенсивность испарения разлившейся жидкости W , кг/(м²·с), определяется по справочным или экспериментальным данным. Например, согласно документу НПБ 107-97 при обосновании взрывопожарной опасности наружных установок для не нагретых легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) используется формула

$$W = 1 \cdot 10^{-6} P_{нас} \sqrt{M}, \quad (3.8)$$

где $P_{нас}$ – давление насыщенного пара, кПа, определяемое по формуле

$$P_{нас} = 101,3 \exp \left[L_{кип} \cdot M (T_{кип}^{-1} - T_{ос}^{-1}) / R \right] \quad (3.9)$$

Поступающий в окружающее пространство горючий газ или пар ЛВЖ массой $m_{г}$ или $m_{п}$ (кг) образует взрывоопасное облако, горизонтальные размеры которого ограничены линией, соответствующей нижнему концентрированному пределу распространения пламени $C_{нкр}$ (кг/м³) (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Характеристики взрываемости некоторых газов (паров)

Вещество	M, кг/кмоль	Q _{в.г} , кДж/кг газа	Q _{в.стх} , кДж/кг газовоздушной смеси	Пределы взрываемости (НКПР/ВКПР)		ρ _{стх} , кг/м ³	C _{стх} , об%
				%	кг/м ³		
Аммиак NH ₃	15	16600	2370	15/18	0,11/0,28	1,18	19,72
Ацетон C ₃ H ₆ O	58	28600	3112	2,2/13	0,52/0,31	1,21	4,99
Ацетилен C ₂ H ₂	26	48300	3387	2/81	0,021/0,86	1,278	7,75
Бутан C ₄ H ₁₀	58	45800	2776	1,9/9,1	0,045/0,22	1,328	3,13
Бутадиен C ₄ H ₆	56	47000	2892	2/11,5	0,044/0,26	1,329	3,38
Бензол C ₆ H ₆	78	40600	2973	1,4/7,1	0,045/0,23	1,350	2,84
Бензин	94	46200	2973	1,2/7	0,04/0,22	1,350	2,10
Водород H ₂	2	120000	3425	4/75	0,0033/0,06	0,933	29,59
Метан CH ₄	16	50000	2763	5/15	0,033/0,1	1,232	9,45
Оксид углерода CO	28	13000	2930	12,5/74	0,14/0,85	1,280	29,59
Пропан C ₃ H ₈	44	46000	2801	2,1/9,5	0,038/0,18	1,315	4,03
Этилен C ₂ H ₄	28	47200	2922	3/32	0,034/0,37	1,280	4,46

Примечание. НКПР – нижний концентрационный предел распространения пламени; ВКПР – верхний концентрационный предел распространения пламени.

При этом радиус облака $R_{нкр}$ (м) определяется по формулам: для горючих газов

$$R_{нкр} = 14,5632 \left(\frac{m_{г}}{\rho_{г} \cdot C_{нкр}} \right)^{1/3}; \quad (3.10)$$

для паров нагретых ЛВЖ

$$R_{нкр} = 3,1501 \sqrt{\frac{\tau_{исп}}{3600} \left(\frac{P_{нас}}{C_{нкр}} \right)^{0,813}} \cdot \left(\frac{m_{п}}{\rho_{п} P_{нас}} \right)^{1/3}. \quad (3.11)$$

Плотность газа (пара) $\rho_{r(n)}$ (кг/м³) определяется по формуле

$$\rho_{r(n)} = \frac{M}{V_0(1 + 0,00367 \cdot t_p)}, \quad (3.12)$$

где V_0 – мольный объем, равный 22,4 м³/кмоль; t_p – расчетная температура, °С, принимаемая равной максимально возможно температуре воздуха в соответствующей климатической зоне. При отсутствии соответствующих данных допускается принимать равной 61 °С.

Внутренние границы ПГВ облака определяются внешними габаритными размерами аппаратов, резервуаров, установок и тому подобное во всех случаях $R_{\text{нкрп}}$ принимается не менее 0,3 м.

Рассмотрим вывод соотношения для размера внешней границы ПГВ облака.

Опытным путем установлено, что облако ПГВ смеси, образующейся при разрушении оборудования, содержащего горючие вещества, имеют форму полусферы с объемом:

$$V = \frac{2}{3} \pi R_0^3,$$

где R_0 – радиус полусферы.

С другой стороны, масса горючего вещества m_r может образовать ПГВ смесь, занимающую при нормальных условиях объем:

$$V = \frac{m_r V_0 k}{MC_{\text{стх}}},$$

где k – коэффициент, зависящий от способа хранения горючего вещества (1 – для газа; 0,6 – для сжиженного газа под давлением; 0,1 – для сжиженного газа при пониженной температуре (изотермическое хранение); 0,06 – аварийный разлив ЛВЖ); $C_{\text{стх}}$ – стехиометрическая концентрация газа в смеси, объемный % (см. табл. 3.3).

Из условия равенства объема полусферы и образовавшейся ПГВ смеси получим:

$$R_0 = 10 \left(\frac{m_r k}{MC_{\text{стх}}} \right)^{1/3}. \quad (3.13)$$

Для наиболее распространенного горючего вещества – метана формула (3.13) принимает вид:

$$R_0 = 18,5 \sqrt[3]{m_r k}, \quad \text{м}, \quad (3.14)$$

где m_r – масса хранящегося взрыва метана в тоннах.

Установлено, что при взрыве ПГВ смеси внутри ее облака образуется зона детонации, в которой распространяется детонационная волна.

В пределах зоны детонационного взрыва давление во фронте детонационной волны постоянно и равно $\Delta P_{\text{фд}} = 1750$ кПа.

Избыточное давление $\Delta P_{\text{ф}}$ (кПа) на фронте ударной волны, образующейся при взрыве ПГВ смеси за пределами облака, равно:

$$\Delta P_{\text{ф}} = \frac{81}{\bar{R}} + \frac{303}{\bar{R}^2} + \frac{505}{\bar{R}^3}, \quad (3.15)$$

$$\bar{R} = R / \sqrt[3]{m_{\text{пр}}}, \quad m_{\text{пр}} = \frac{Q_{v,r}}{Q_{v,\text{тнт}}} mZ, \quad (3.16)$$

где $m_{\text{пр}}$ – приведенная масса пара или газа, участвующих во взрыве, кг; R – расстояние от эпицентра взрыва, м; $Q_{v,r}$ и $Q_{v,\text{тнт}}$ – соответственно энергии взрыва газа (пара) и тротила (тринитротолуола), кДж/кг (значение $Q_{v,\text{тнт}}$ приведено в табл. 3.3, а значения энергий взрыва некоторых газов (паров) – в табл. 3.1); Z – коэффициент участия газов и паров в горении, который допускается принимать равным 0,1.

Величина импульса волны давления I_+ , кПа·с, вычисляется по формуле

$$I_+ = \frac{0,123 m_{\text{пр}}^{2/3}}{R}. \quad (3.17)$$

3.2.3. Взрыв парогазовоздушного облака в ограниченном пространстве

При авариях с технологической аппаратурой, содержащей горючие газы и жидкости, но находящейся в ограниченном пространстве, масса поступающих в помещение горючих газов (ГГ), горючих жидкостей (ГЖ) и легко воспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) определяют по формулам (3.4–3.7).

Массу паров ГЖ, поступающих в помещение при испарении разлившейся жидкости, находят по формуле (5.59), в которой площадь испарения F , m^2 , определяется исходя из расчета, что 1 л смесей и растворов, содержащих по массе 70 % и менее растворителей разливается по площади $0,5 m^2$ пола помещения, а остальных жидкостей – на $1 m^2$ пола помещения. Длительность испарения τ принимается равной времени полного испарения, но более 3600 с.

Интенсивность испарения разлившейся жидкости в помещении W $kg/(m^2 \cdot c)$, согласно НПБ–105–95, определяется по формуле:

$$W = 1 \cdot 10^{-6} \eta P_{\text{нас}} \sqrt{M}, \quad (3.18)$$

где η – коэффициент, зависящий от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения (табл. 3.4); M – молекулярная масса жидкости, $kg/моль$; $P_{\text{нас}}$ – по формуле (3.9), $кПа$.

Таблица 3.4

Значение коэффициента η

Скорость воздушного потока, м/с	Температура в помещении t , °C				
	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

Избыточное давление взрыва ΔP_{ϕ} , $кПа$, для индивидуальных горючих веществ, состоящих из атомов углерода, водорода, кислорода, хлора, брома и фтора, определяется по формуле:

$$\Delta P_{\phi} = \frac{100(P_{\text{max}} - P_0)}{V_{\text{св}} \rho_{\text{г}} C_{\text{стх}} K_{\text{н}}}, \quad (3.19)$$

где P_{max} – максимальное давление взрыва стехиометрической газо- или паровоздушной смеси в замкнутом объеме, определяемое по справочным данным (при отсутствии данных допускается принимать равным 900 $кПа$); P_0 – начальное давление, принимаемое равным 101,3 $кПа$; m – масса горючего газа или паров ЛВЖ в помещении, $кг$; Z – коэффициент участия горючего во взрыве, принимаемый равным

1 для водорода, 0,5 – для других горючих газов, 0,3 – для паров ЛВЖ и ГЖ; $V_{\text{св}}$ – свободный объем помещения m^3 (можно принять равным 80 % помещения); $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа или пара при расчетной температуре, kg/m^3 ; $K_{\text{н}}$ – коэффициент учитывающий негерметичность помещения и неадиабатности процессов горения, принимаемый равным 3; $C_{\text{стх}}$ – стехиометрическая концентрация горючего, об. %, вычисляемая по формуле

$$C_{\text{стх}} = \frac{100}{1 + 4,84\beta}, \quad (3.20)$$

где $\beta = n_{\text{с}} + 0,25(n_{\text{н}} - n_{\text{х}}) - 0,5n_0$ – стехиометрический коэффициент кислорода в реакции горения ($n_{\text{с}}$, $n_{\text{н}}$, $n_{\text{х}}$, n_0 – число атомов углерода, водорода, кислорода и галоидов в молекуле горючего).

3.2.4. Прогнозирование обстановки при взрывах

Прогнозирование обстановки при взрывах заключается в определении размеров зон возможных поражений, степени поражения людей и разрушения объектов. Для этого обычно используют один из двух методов прогнозирования последствий взрывов: детерминированный (упрощенный) и вероятностный.

При детерминированном способе прогнозирования поражающий эффект ударной волны определяется избыточным давлением во фронте ударной волны ΔP_{ϕ} , $кПа$, (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Степень поражения людей в зависимости от величины избыточного давления

Избыточное давление, ΔP_{ϕ} , $кПа$	Менее 10	10–40	40–60	60–100	Более 100
Степень поражения людей	Безопасное избыточное давление	Легкая (ушибы, потеря слуха)	Средняя (кровотечения, вывихи, сотрясение мозга)	Тяжелая (контузии)	Смертельное поражение

Разрушение зданий, промышленных объектов и оборудования, вызываемые ударной волной, характеризуются данными, приведенными в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Избыточное давление во фронте ударной волны ΔP_{Φ} (кПа), при котором происходит разрушение объектов

Объект	Разрушение			
	Полное	Сильное	Среднее	Слабое
Жилые здания:				
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 ж/б каркасом	60...100	40...60	20...40	10...20
С легким металлическим каркасом или бескаркасные	80...120	50...80	20...50	10...20
Промышленные объекты:				
ТЭС	25...40	20...25	15...220	10...15
Котельные	35...45	25...35	15...25	10...15
Трубопроводы наземные	20	50	130	–
Трубопроводы на эстакаде	20...30	30...40	40...50	–
Трансформаторные подстанции	100	40...60	20...40	10...20
ЛЭП	120...200	80...120	50...70	20...40
Водонапорные башни	70	60...70	40...60	20...40
Станочное оборудование	80...100	60...80	40...60	25...45
Кузнечнопрессовое оборудование	200...250	150...200	100...150	50...100
Резервуара, трубопроводы:				
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
Автозаправочные станции	–	40...60	30...40	20...30
Перекачивающие и компрессорные станции	45...50	35...45	25...35	15...25
Резервуарные парки (заполненные)	90...100	70...90	50...80	20...40
Транспорт:				
Металлические и ж/б мосты	250...300	200...250	150...200	150
Ж/д пути	400	250	175	125
Тепловозы с 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
Автомашины грузовые	70	50	35	10

Примечание. *Слабые разрушения* – повреждение или разрушение крыш, оконных и дверных проемов. Ущерб – 10–15 % от стоимости здания; *средние разрушения* – разрушение 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.

Вероятность разрушения зданий определяется по формуле в зависимости от значений пробит-функций, которые являются функциями ΔP_{Φ} , кПа и I_+ , кПа·с (табл. 3.7).

Таблица 3.7

Выражения пробит-функций для разных степеней разрушения зданий

Степень разрушений	Пробит-функция
Слабые разрушения	$Pr = -0,26 \ln[(4,6/\Delta P_{\Phi})^{3,9} + (0,11/I_+)^{5,0}]$
Средние разрушения	$Pr = -0,26 \ln[(17,5/\Delta P_{\Phi})^{8,4} + (0,29/I_+)^{9,3}]$
Сильные разрушения	$Pr = -0,22 \ln[(40/\Delta P_{\Phi})^{7,4} + (0,26/I_+)^{11,3}]$

При полном разрушении зданий можно принять, что объем завалов составляет примерно 50 % объема завалов при полном разрушении здания.

При приближенных оценках размеры завалов, образующихся при взрыве внутри здания размером $A \times B \times H$, можно определить по формулам:

длина завала $A_{\text{зав}}$, м

$$A_{\text{зав}} = 2L + A, \quad (3.21)$$

ширина завала $B_{\text{зав}}$, м

$$B_{\text{зав}} = 2L + B, \quad (3.22)$$

где L – дальность разлета обломков, принимаемая равной половине высоты здания ($L = H/2$) (рис. 3.1).

При внешнем взрыве размеры завала определяют по формулам

$$A_{\text{зав}} = L + A; \quad (3.23)$$

$$B_{\text{зав}} = L + B. \quad (3.24)$$

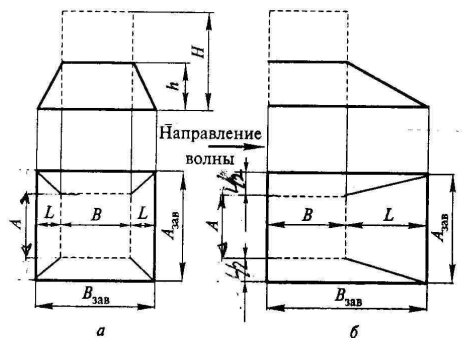


Рис. 3.1. Расчетные схемы завалов при взрыве: внутри здания (а); вне здания (б); - - - контуры здания до разрушения; контуры здания до разрушения; — контуры завала

Для определения высоты завала на 100 м^3 строительного объема здания (табл. 3.8); k – константа, равная $k = 2$ – для взрыва вне здания и $k = 2,5$ – для взрыва внутри здания.

Таблица 3.8

Объемно-массовые характеристики завалов

Тип здания	Плотность α , $\text{м}^3/100 \text{ м}^3$	Удельный объем γ , $\text{м}^3/100 \text{ м}^3$	Объемный вес ρ , т/м^3
Производственные здания			
Одноэтажное легкого типа	40	14	1,5
Одноэтажное среднего типа	50	16	1,2
Одноэтажное тяжелого типа	60	20	1,0
Многоэтажное	40	21	1,5
Смешанного типа	45	22	1,4
Жилые здания бескаркасные			
Кирпичное	30	36	1,2
Мелкоблочное	30	36	1,2
Крупноблочное	30	36	1,2
Крупнопанельное	40	42	1,1
Жилые здания каркасные			
Со стенами из навесных панелей	40	42	1,1
Со стенами из каменных материалов	40	42	1,1

Примечания. 1. Пустотность завала (α) – объем пустот на 100 м^3 завала, м^3 . 2. Объемный вес завала (ρ) – вес 1 м^3 завала, т/м^3 .

Для ориентировочного определения безвозвратных потерь $N^{\text{безв}}$, чел., населения (персонала) вне зданий и убежищ можно использовать формулу

$$N^{\text{безв}} = PG_{\text{гнт}}^{2/3}, \quad (3.25)$$

где P – плотность населения (персонала), тыс. чел./ км^2 ; $G_{\text{гнт}}$ – тротильный эквивалент, т.

Санитарные потери $N^{\text{сан}}$, чел., принимаются равными

$$N^{\text{сан}} = (3 \dots 4)N^{\text{безв}}, \quad (3.26)$$

Общие потери $N^{\text{общ}}$, чел.

$$N^{\text{общ}} = N^{\text{безв}} + N^{\text{сан}}. \quad (3.27)$$

Более точно потери населения вне зданий и убежищ можно рассчитать вероятностным методом.

Вероятность поражения людей определяется в зависимости от пробит-функции Pr , являющейся функцией ΔP_{ϕ} , кПа, и I_+ , кПа·с (табл. 3.9).

Таблица 3.9

Выражения пробит-функций для разных степеней поражения людей

Степень поражения	Пробит-функция
Разрыв барабанных перепонок	$\text{Pr} = -1,76 + 1,524 \ln \Delta P_{\phi}$
Контузия	$\text{Pr} = -5,74 \ln \{4,2 / (1 + \Delta P_{\phi} P_0) + 1,3 [I_+ / (P_0^{2/3} m^{1/3})]\}$, где m – масса тела, кг; P_0 – атмосферное давление
Летальный исход	$\text{Pr} = -2,44 \ln [7,38 / \Delta P_{\phi} + 1,9 \cdot 10^3 / (\Delta P_{\phi} I_+)]$

Для определения абсолютных значений потерь вероятности поражений следует умножить на число людей, находящихся вне зданий (табл. 2.9)

Для ориентировочного определения потерь людей, находящихся в зданиях, в зависимости от степени их разрушения можно использовать следующие формулы:

$$N^{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n N_i K_{1i}, \quad (3.28)$$

$$N^{\text{сан}} = \sum_{i=1}^n N_i^{\text{общ}} K_{2i}, \quad (3.29)$$

$$N^{\text{без}} = N^{\text{общ}} - N^{\text{сан}}, \quad (3.30)$$

где N_i – количество персонала в i -м здании, чел.; n – число зданий (сооружений) на объекте; $N_i^{\text{общ}}$ – общие потери при разрушении i -го здания; K_{1i} , K_{2i} – коэффициенты для нахождения потерь в i -м здании, определяемые по табл. 3.10.

Таблица 3.10

Значения коэффициентов K_1 , K_2

Степень разрушения зданий	K_1	K_2
Слабая	0,08	0,03
Средняя	0,12	0,09
Сильная	0,8	0,25
Полная	1	0,3

Количество людей в зданиях определяются по общей численности населения и его среднесуточному распределению по местам пребывания (табл. 2.9).

3.3. Прогнозирование и оценка обстановки при пожарах

3.3.1. Основные характеристики пожаров

Пожар – это неконтролируемое горение, причиняющее вред жизни и здоровью людей, а также материальный ущерб. Пожары нераздельно связаны со взрывами: взрывы порождают пожары на промышленных предприятиях, в личных домах и в зданиях общественного и культурно-общественного назначения.

Основными видами пожаров являются: пожары разлития; горение, парогазовоздушного облака; горение одиночных зданий и промышленных объектов; пожары в населенных пунктах и на промышленных предприятиях.

Важным параметром пожара является приведенный размер очага горения, R^* , м, равный \sqrt{Lh} – для горящих зданий, (1,75...2,0) \sqrt{Lh} – для штабеля пиленого леса и $0,8D_{\text{рез}}$ – для горения нефтепродуктов в

резервуаре; L , h – длина со стороны горения и высота горения, м; $D_{\text{рез}}$ – диаметр резервуара, м.

Техническими параметрами пожара является массовая скорость выгорания горючего вещества $V_{\text{выг}}$, кг/(м²·с),

Теплота горения Q , кДж/кг и плотность теплового потока пламени пожара $q^{\text{св}}$, кВт/м² (табл. 3.11).

Таблица 3.11

Технические характеристики материалов и веществ

Вещества, материалы	Массовая скорость выгорания, $V_{\text{выг}}$, кг/(м ² ·с)	Теплота горения, Q , кДж/кг	Плотность потока пламени пожара, $q^{\text{св}}$, кВт/м ²
Ацетон	0,047	28400	1200
Бензол	0,08	30500	2500
Бензин	0,05	44000	1780–2200
Керосин	0,05	43000	1520
Мазут	0,013	40000	1300
Нефть	0,02	43700	874
Древесина	0,015	19000	260
Каучук натуральный	0,013	42000	460
Пиломатериалы	0,017	14000	150

3.3.2. Пожар разлития

При нарушении герметичности сосуда, содержащего сжиженный горючий газ или жидкость, часть (или вся) жидкости может заполнить поддон или обваловку, растечься по поверхности грунта или заполнить какую-либо естественную впадину.

Если поддон или обваловка имеют вертикальный внутренний откос, то глубину заполнения h (м) можно найти по формуле:

$$h = m_{\text{ж}} / (\rho_{\text{ж}} F_{\text{под}}), \quad (3.31)$$

где – $m_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{ж}}$ – масса и 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 естественными и искусственно созданными границами (дороги, дренажные канавы и т.п.), а если такая информация

отсутствует, то принимается толщина разлившегося слоя, равной $h = 0,05$ м, и определяют площадь разлива $F_{\text{раз}}$ (м^2) по формуле

$$F_{\text{под}} = m_{\text{ж}} / (h\rho_{\text{ж}}). \quad (3.32)$$

Отличительной чертой пожаров разлития является «накрытие» (рис. 3.2) с подветренной стороны, которое может составлять 25–50 % диаметра зеркала разлива ($D = 2r = \sqrt{4F_{\text{раз}} / \pi}$).

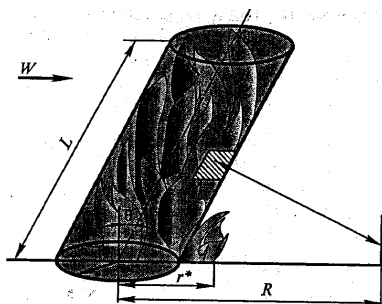


Рис. 3.2. Расчетная схема пожара разлития

Пламя пожара разлития при расчете представляется в виде наклоненного по направлению ветра цилиндра конечного размера (см. рис. 3.2), причем угол наклона θ зависит от безразмерной скорости ветра $W_{\text{в}}$:

$$\cos \theta = 0,75 (W_{\text{в}})^{-0,49}.$$

Геометрические параметры факела пожара разлития находятся по формуле Томаса:

$$\frac{L}{D} = a \left(\frac{m_{\text{выг}}}{\rho_{\text{в}} \sqrt{gD}} \right)^b W_{\text{в}}^C, \quad (3.33)$$

где $W_{\text{в}} = w(m_{\text{выг}}gD/\rho_{\text{п}})^{-1/3}$ – безразмерная скорость ветра; $m_{\text{выг}}$ – массовая скорость выгорания, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $\rho_{\text{п}}$, $\rho_{\text{в}}$ – плотность пара и воздуха, соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – ускорение силы тяжести $\text{м}/\text{с}^2$; D – диаметр зеркала разлива, м; w – скорость ветра, $\text{м}/\text{с}$.

Эмпирические коэффициенты по формуле Томаса ($a = 55$; $b = 0,67$ и $c = -0,21$) получены по результатам экспериментов, выполненных для широкого диапазона изменения параметров:

$$10^{-3} \leq L/D \leq 10; \quad 10^{-6} \leq \frac{m_{\text{выг}}}{r_{\text{в}} \sqrt{gD}} < 10^{-2}.$$

Скорость выгорания жидкостей определяют, как правило, экспериментально. Для экспертной оценки скорости выгорания $m_{\text{выг}}$, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, можно воспользоваться эмпирической формулой:

$$m_{\text{выг}} = C\rho_{\text{ж}}Q_{\text{н}}^p / L_{\text{исп}}, \quad (3.34)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; $Q_{\text{н}}^p$ – низшая теплота сгорания топлива, $\text{Дж}/\text{кг}$; $L_{\text{исп}}$ – скрытая теплота испарения жидкости, $\text{Дж}/\text{кг}$, $C = 1,25 \cdot 10^{-6}$ $\text{м}/\text{с}$ – коэффициент пропорциональности, значение которого, получено путем обработки многочисленных экспериментальных данных по выгоранию большинства органических жидкостей и их смесей.

Плотность теплового потока, падающего на элементарную площадку, расположенную на уровне грунта (см. рис. 3.2), $q^{\text{пад}}$, $\text{кВт}/\text{м}^2$, вычисляется по формуле:

$$q^{\text{пад}} = q^{\text{соб}} \varphi \exp[-7,0 \cdot 10^{-4}(R-r)], \quad (3.35)$$

где φ – угловой коэффициент излучения с площадки на боковой поверхности пламени пожара разлива на единичную площадку, расположенную на уровне грунта (рис. 3.2), определяемый по графику на рис. 3.3; $q^{\text{соб}}$ – средняя по поверхности плотность потока собственного излучения пламени, $\text{кВт}/\text{м}^2$.

Для ориентировочных расчетов можно принять следующие значения $q^{\text{соб}}$ ($\text{кВт}/\text{м}^2$):

Сжиженный природный газ (метан) – 150...170;

Нефть – 60...80;

Сжиженный нефтяной газ – 50...60;

Мазут – 50...70;

Бензин – 120...140;

Керосин – 80...100.

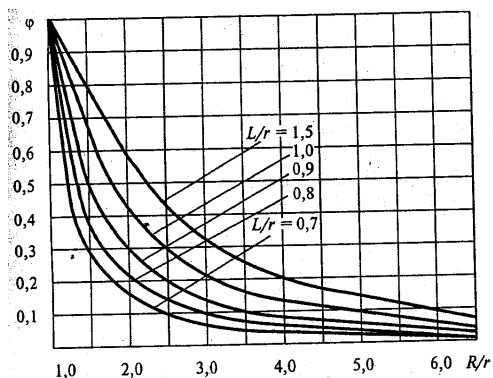


Рис. 3.3. Зависимость углового коэффициента излучения ϕ с цилиндрического пламени пожара разлития на элементарную площадку от R/r

3.3.3. Горение парогазовоздушного облака

Крупномасштабное диффузионное горение парогазовоздушного (ПГВ) облака, реализуемое при разгерметизации резервуара с горючей жидкостью или газом под давлением, носит название «огненный шар». Плотность теплового потока, падающего с поверхности «огненного шара» на элементарную площадку на поверхности мишени $q^{\text{пад}}$, кВт/м², равна

$$q^{\text{пад}} = q^{\text{соб}} \phi \exp\left[-7,0 \cdot 10^{-4} \left(\sqrt{X^2 + H^2} - D_{\text{эф}}/2\right)\right], \quad (3.36)$$

где $q^{\text{соб}}$ – плотность потока собственного излучения «огненного шара», кВт/м² (допускается принимать равной 450 кВт/м²); ϕ – угловой коэффициент излучения с «огненного шара» на единичную площадку на облучаемой поверхности; X – расстояние от точки на поверхности земли непосредственно под центром «огненного шара» до облучаемого объекта, м; H – высота центра «огненного шара», м, которую допускается принимать равной $0,5 \cdot D_{\text{эф}}$; $D_{\text{эф}}$ – эффективный диаметр «огненного шара», м, определяемый по формуле

$$D_{\text{эф}} = 5,33m^{0,327}, \quad (3.37)$$

где m – масса горючего вещества, кг.

Угловой коэффициент излучения с «огненного шара» на единичную площадку облучаемой поверхности при $H = 0,5D_{\text{эф}}$ определяется по формуле

$$\phi = \frac{1}{4\left[1 + \left(X / D_{\text{эф}}\right)^2\right]^{1,5}}. \quad (3.38)$$

Время существования «огненного шара» τ , с, рассчитывается по формуле

$$\tau = 0,92m^{0,303}. \quad (3.39)$$

3.3.4. Пожар в населенном пункте и на промышленных объектах

Пожарная обстановка в населенных пунктах определяется, исходя из характеристики застройки, огнестойкости зданий и категории пожарной опасности объектов.

Степень огнестойкости зданий и сооружений зависит от устойчивости их основных конструкций в условиях воздействия высоких температур при пожаре.

Для зданий, согласно СНиП 21-01-97 «Пожарная безопасность зданий и сооружений», установлено пять степеней огнестойкости:

I степень – предел огнестойкости несущих элементов (ПОНЭ) не менее 2 ч;

II степень – ПОНЭ не менее 1,5 ч;

III степень – ПОНЭ не менее 45 мин;

IV степень – ПОНЭ не менее 15 мин;

V степень – ПОНЭ не нормируется.

Следует учитывать также возможность возникновения пожаров при взрывах в случае повреждения газовых и электрических сетей и при избыточном давлении на фронте ударной волны $\Delta P_{\text{ф}} = (30 \dots 40)$ кПа в зданиях I и II степеней огнестойкости и $\Delta P_{\text{ф}} = (20 \dots 30)$ кПа – в зданиях IV и V степеней огнестойкости.

Категория пожарной опасности на объекте устанавливается исходя из характеристики взрывопожароопасности веществ и материалов, обращающихся (хранящихся, транспортируемых, перерабатываемых и т.д.) на производстве (табл. 3.12).

Таблица 3.12

Характеристика помещений по взрывопожарной и пожарной опасности

Категория помещения	Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении
А взрывопожароопасная	Горючие газы, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки не более 28 °С в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные парогазовоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа Вещества и материалы, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом в таком количестве, что расчетное избыточное давление взрыва в помещении превышает 5 кПа
Б взрывопожароопасная	Горючие пыли или волокна, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки более 28 °С, горючие жидкости в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные пылевоздушные или паровоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа
В1-В4 пожароопасные	Горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых они имеются в наличии или обращаются, не относятся к категориям А или Б
Г	Негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени; горючие газы, жидкости и твердые вещества, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива
Д	Негорючие вещества и материалы в холодном состоянии

В помещениях объекта категорий А и Б пожары могут возникнуть при разрушении технологических систем и последующих взрывах с избыточным давлением на фронте ударной волны $\Delta P_{\text{ф}} = (5 \dots 30)$ кПа.

Плотность застройки объекта (населенного пункта) P , %, определяется по формуле

$$P = 100 S_{\text{зд}}/S_{\text{р}}, \quad (3.40)$$

где $S_{\text{зд}}$ – площадь, занимаемая зданиями, м^2 ; $S_{\text{р}}$ – площадь, занимаемая объектом, м^2 .

Номограмма, связывающая вероятность распространения пожара P , %, и плотность застройки P , %, представлена на рис. 3.4.

Продолжительность пожара $\tau_{\text{пож}}$, ч, равна

$$\tau_{\text{пож}} = m/(S_{\text{об}}V_{\text{выг}}), \quad (3.41)$$

где m – масса горючего вещества, кг; $S_{\text{об}}$ – площадь объекта, м^2 ; $V_{\text{выг}}$ – массовая скорость выгорания, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, определяемая по табл. 5.29, скорость распространения пожара зависит от топографических и климатических условий, скорости ветра и влажности воздуха.

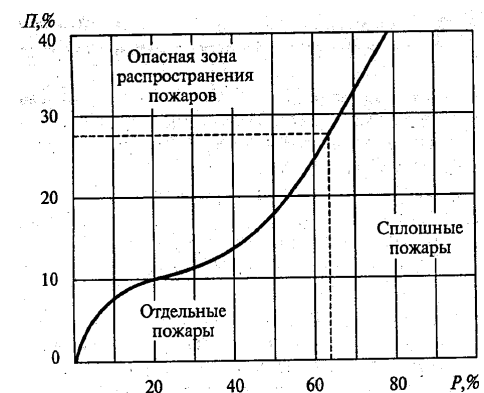


Рис. 3.4. График для определения вероятности (P) распространения пожара по плотности застройки (P)

Ориентировочно можно принять, что в населенных пунктах с деревянной застройкой скорость распространения пожара при скорости ветра $w_{\text{в}} = (3 \dots 4)$ м/с составляет $V_{\text{пож}} = 150 \dots 300$ м/ч при времени развития пожара $\tau_{\text{пож}} = 0,5$ ч. В населенных пунктах с каменными зданиями при той же скорости ветра $V_{\text{пож}} = 60 \dots 120$ м/ч.

3.3.5. Оценка поражающего воздействия пожаров

При пожарах зона ЧС включает зону горения, теплового воздействия, зону задымления.

Зона горения – часть пространства, в которой образуется пламя или огненный шар из продуктов горения.

Зона теплового воздействия – часть пространства, примыкающего к зоне горения, в котором происходит воспламенение или изменение состояния материалов и конструкций и поражающее действие на незащищенных людей.

Основным поражающим фактором пожаров является термическое воздействие, обусловленное тепловым излучением пламени.

Термическое воздействие определяется величиной плотности потока поглощенного излучения $q^{полг}$, кВт/м², и времени теплового излучения τ , с.

Плотность потока поглощенного излучения $q^{полг}$ связана с плотностью потока падающего излучения $q^{пад}$ соотношением $q^{полг} = \varepsilon \cdot q^{пад}$, где ε – степень черноты (поглощательная способность) тепловоспринимающей поверхности. Чем ниже степень черноты (больше отражательная способность), тем меньше при прочих равных условиях величина $q^{полг}$ (далее q , кВт/м²).

Человек ощущает сильную (едва переносимую) боль, когда температура верхнего слоя кожи превышает 45 °С. Время достижения «порога боли» τ , с, определяется по формуле

$$\tau = (35/q)^{1,33}. \quad (3.42)$$

Различают три степени термического ожога кожи человека (табл. 3.13).

Таблица 3.13

Характеристика ожогов кожи человека

Степень ожога	Повреждаемый слой	Характеристика	Доза воздействия, кДж/м ²
I	Эпидермис	Покраснение кожи	Менее 42
II	Дерма	Волдыри	42–84
III	Подкожный слой	Летальный исход	Более 84

Время воспламенения горючих материалов τ , с, при воздействии на них теплового потока полностью q , кВт/м², определяется по формуле

$$\tau = A/(q - q_{кр})^n, \quad (3.43)$$

где $q_{кр}$ – критическая плотность теплового потока, кВт/м²; A , n – константы для конкретных материалов (например, для древесины $A = 4300$, $n = 1,61$).

Значения $q_{кр}$ для разных материалов и результаты расчета по формуле (3.43) приведены в табл. 3.14.

Таблица 3.14

Критические тепловые нагрузки ($q_{кр}$) и продолжительность воспламенения (τ) при различной плотности теплового потока

Вещество, материал	$q_{кр}$, кВт/м ²	Плотность теплового потока, q , кВт/м ²				
		20	50	100	150	200
Солома	7,0	70,3	10,2	2,9	1,4	0,91
Пенопласт	7,40	73,7	10,3	2,9	1,5	0,91
Хлопок-волокно	7,50	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	0,94
Картон фибровый	10,88	124,1	11,9	3,1	1,5	0,94
Темная древесина, ДСП	12,56	172,3	12,7	3,2	1,6	0,96
Бензин А-66	12,6	173,8	12,8	3,2	1,6	0,96
Древесина сосновая	12,8	181,5	12,9	3,3	1,6	0,96
Резина	7,0	70,3	10,2	3,4	1,6	1,02
Битумная кровля	7,0	70,3	10,2	3,4	1,6	1,02
Пластик слоистый	7,0	70,3	10,2	3,4	1,6	0,97
Фанера	7,0	70,3	10,2	3,4	1,6	0,97
Бензин А-78	7,0	70,3	10,2	3,4	1,7	0,98
Древесина крашения	7,0	70,3	10,2	3,4	1,7	0,99
Древесина обугленная	7,0	70,3	10,2	3,4	1,7	1,0

Особенно опасным является нагрев резервуаров с нефтепродуктами, которые могут воспламениться при воздействии теплового излучения (табл. 3.15).

Таблица 3.15

Время воспламенения τ резервуара с нефтепродуктами в зависимости от величины плотности потока теплового излучения q

q , кВт/м ²	34,9	27,6	24,8	21,4	19,9	19,5
τ	5	10	15	20	29	Более 30

Расчет протяженности зон теплового воздействия $R(m)$ при горении зданий и промышленных объектов производится по формуле

$$R = 0,282R^* \sqrt{\frac{q^{\text{соб}}}{q_{\text{кр}}}}, \quad (3.44)$$

где R^* – приведенный размер очага горения; $q^{\text{соб}}$ – плотность потока собственного излучения пламени пожара, кВт/м² (табл. 3.11); $q_{\text{кр}}$ – критическая плотность потока излучения пламени пожара, падающего на облучаемую поверхность и приводящую к тем или иным последствиям, кВт/м² (табл. 3.16).

Таблица 3.16

Значение времени (ϵ) теплового облучения, вызывающего поражающий эффект, при различных критических значениях плотности потока падающего излучения $q_{\text{кр}}$

$q_{\text{кр}}, \text{кВт/м}^2$	Ожог человека		Возгорание ГЖ	Возгорание ЛВЖ	Возгорание древесины
	I степени	II степени			
40	Менее 1,0	Менее 1,0	180	–	–
35	Менее 1,0	Менее 1,0	–	180	–
30	1,0	2,0	–	–	240
20	2,0	3,0	–	–	600
15	4,0	5,0	–	–	–
10	6,0	9,0	–	–	–
5	16	25	–	–	–
4,2	20	40	–	–	–
1,5	Безопасно	Безопасно	–	–	–

Примечание. ГЖ – горючие жидкости и вещества (мазут, торф, масло и т.п.); ЛВЖ – легко воспламеняющиеся жидкости (ацетон, бензол, спирт).

Размеры зоны теплового воздействия рассчитывают по соотношениям, определяющим: безопасное расстояние $R_{\text{без}}$, м, при заданном уровне интенсивности теплового излучения для человека, объекта, материала и т.д.

Пожар разлития, горение здания:

$$R_{\text{без}} = R^* \sqrt{\frac{\alpha q^{\text{соб}}}{q_{\text{кр}}}}. \quad (3.45)$$

Горение ПГВ облака (огненный шар)

$$R_{\text{без}} = \sqrt{\frac{\alpha MQ}{2\pi q_{\text{кр}} \tau}}, \quad (3.46)$$

где α – коэффициент, характеризующий геометрию очага горения: $\alpha = 0,02$ – если источник излучения (горения) плоский (разлив на поверхности земли или воды, нефти, бензина, ЛВЖ и др.); $\alpha = 0,08$ – если источник излучения объемный (горящее здание, резервуар);

$q^{\text{соб}}$ – удельная теплота пожара, кДж/м²·с, т.е. количество тепла излучаемого с единицы площади пламени в единицу времени (табл. 3.11);

Q – удельная теплота сгорания, кДж/кг, т.е. количество тепла, выделяемого при сгорании 1 кг горючего вещества;

m – масса горючего вещества, кг;

τ – время горения (свечения огненного шара), с;

α – коэффициент, учитывающий долю энергии, идущей на лучистый теплообмен (для древесины $\alpha = 0,4$, для нефтепродуктов $\alpha = 0,6$);

$q_{\text{кр}}$ – заданная интенсивность теплового излучения, кДж/м²·с – критерий поражения человека, воспламенения материала или их безопасности (табл. 3.16)

R^* – приведенный размер очага горения (пожара):

При применении вероятностного подхода к определению поражающего фактора теплового воздействия на человека значения $P_{\text{пор}}$ определяют по табл. 1.5 с использованием для случая летального исхода при термическом поражении следующее выражение для пробит-функции Pr:

$$\text{Pr} = -14,5 + 2,56 \ln(q^{1,33} \cdot \tau). \quad (3.47)$$

Время термического воздействия τ , с, для случаев пожара разлития и горения здания (сооружения, штабеля и т.п.) равно

$$\tau = \tau_0 + x/u, \quad (3.48)$$

где τ_0 – характерное время обнаружения пожара (допускается принимать 5 с); x – расстояние от места расположения человека до зоны, где плотность теплового излучения не превышает 4 кВт/м², м; u – скорость движения человека (допускается принимать 5 м/с).

Для случая огненного шара время термического воздействия принимается равным времени существования огненного шара.

Рассчитав значения $q^{\text{пад}}$ и t по формулам (3.36) и (3.48) несложно по формуле (3.47) определить величину пробит-функции, а по табл. 1.5 вероятность летального исхода при термическом поражении $P_{\text{пор}}$.

Зона задымления является опасной для человека при содержании оксида углерода свыше 0,2 %, углекислого газа свыше 6 %, кислорода менее 17 %. При наличии в зоне горения аварийных химически опасных веществ (АХОВ), пластмасс, фанеры могут выделяться токсичные продукты: фенол, формальдегид, хлористый водород, цианистый водород, оксиды азота и другие вещества (табл. 3.17).

Скорость дымообразования V_d , кг/м²·с, равна скорости выгорания $V_{\text{выг}}$ (табл. 3.11) с учетом коэффициента дымообразования D_m и показателя токсичности дыма LC и определяется по формуле

$$V_d = V_{\text{выг}} \cdot D_m \cdot LC; \quad (3.49)$$

$$D_m = \frac{V}{l \cdot m} \cdot \ln \frac{E_0}{E_{\text{мин}}}, \quad (3.50)$$

где V – объем пространства горения, м²;

l – длина светового луча в дыму, м;

m – масса сгоревшего материала, кг;

$E_0, E_{\text{мин}}$ – освещенность участка горения без задымления и в дыму, лк.

Таблица 3.17

Токсические вещества, выделяющиеся при задымлении

Токсическое вещество	Исходные материалы при пожаре	Смертельно опасные концентрации через 5-10 мин		Опасные концентрации через 30 мин	
		%	мг/л	%	мг/л
Оксид углерода	Каучук, органическое стекло, винипласт	0,5	6	0,2	2,4
Хлористый водород	Винипласт, каучук, пластикат	0,3	4,5	0,1	1,5
Фосген	Фторопласт	0,005	0,25	0,0026	0,1
Оксид азота	Нитрон, органическое стекло	0,05	1,0	0,01	0,2
Сероводород	Линолеум	0,08	1,1	0,04	0,6
Сернистый газ	Каучук, сера	0,3	8,0	0,04	1,1

Зона задымления при пожаре имеет форму трапеции (рис. 3.5).

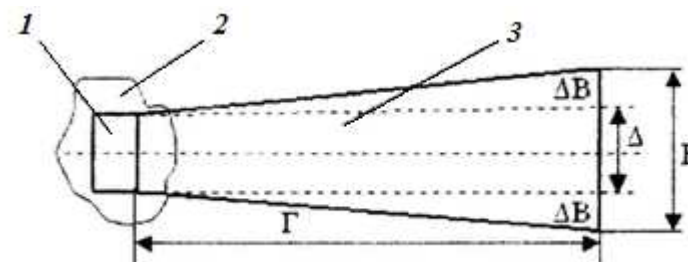


Рис. 3.5. Зоны поражающего воздействия на человека при пожаре: 1 – горящее сооружение; 2 – зона теплового воздействия; 3 – зона задымления; Δ – ширина зоны горения, м

Глубину опасной по токсическому действию части зоны задымления Γ , м, определяют по соотношению

$$\Gamma = \frac{34,2}{K_1} \cdot \left[\frac{m}{K_2 V_n D} \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (3.51)$$

где m – масса токсичных продуктов горения, кг;

D – токсичная доза, мг·мин/л;

V_n – скорость переноса дыма, равная (1,5–2) V_b , м/с;

K_1 – коэффициент шероховатости поверхности: открытая поверхность – 1; степная растительность, сельхозугодия – 2; кустарник, отдельные деревья – 2,5; городская застройка, лес – 3,3;

K_2 – коэффициент степени вертикальной устойчивости атмосферы (инверсия – 1; изотермия – 1,5; конвекция – 2).

Ширину зоны задымления определяют по формуле

$$B = \Delta + 2\Delta B, \quad (3.52)$$

где Δ – ширина зоны горения, м;

$\Delta B = 0,1 \cdot \Gamma$ – при устойчивом ветре (отклонения менее $\pm 6^\circ$);

$\Delta B = 0,4 \cdot \Gamma$ – при неустойчивом ветре (отклонение более 6°);

3.4. Прогнозирование и оценка обстановки при химических авариях

3.4.1. Химически опасные объекты. Зона химического заражения

Бурное развитие химической промышленности обусловило возрастание техногенных опасностей, приводящих к крупным химическим авариям, сопровождаемым значительным материальным ущербом и большими человеческими жертвами.

Подтверждением тому являются произошедшие в мире в конце XX века крупные химические аварии, в том числе авария на химическом заводе в Севезо (Италия, 1976), авария века в Бхопале (Индия, 1984), авария на ПО «Азот» (Литва, 1989).

В настоящее время на территории России насчитывается более трех тысяч химически опасных объектов. Сто сорок шесть городов с численностью населения более ста тысяч человек в каждом расположены в зонах повышенной химической опасности.

Под химически опасным объектом понимается объект, на котором хранят, перерабатывают, используют или транспортируют опасные химические вещества, при аварии на котором или при разрушении которого может произойти гибель или химическое заражение людей, сельскохозяйственных животных и растений, а также химическое заражение окружающей природной среды.

Все эти объекты классифицируются по степени химической опасности. В основу этой классификации положена степень опасности объекта для населения и территорий (табл. 3.18).

Таблица 3.18

Классификация объектов по химической опасности

Степень химической опасности объекта	Количество человек, попадающих в зону химического заражения при аварии, тыс. чел.
I	Более 75
II	От 40 до 75
III	Менее 40
IV*	Оценке не подлежит

Примечание. * – зона возможного заражения аварийно химически опасным веществом.

Аварийно химически опасное вещество (АХОВ) – это опасное химическое вещество, применяемое в хозяйственной деятельности, при аварийном выбросе (разливы, просыпи) которого может произойти химическое загрязнение окружающей среды в поражающих живые организмы концентрациях (токсодозах).

По воздействию на организм человека АХОВ делятся на четыре класса: I класс – чрезвычайно опасные; II – класс – высоко опасные; III – класс – умеренно опасные; IV – мало опасные.

К чрезвычайно опасным АХОВ относятся:

- некоторые соединения металлов (мышьяка, ртути, свинца, кадмия, цинка и др.);
- карбонаты металлов;
- вещества, содержащие цианогруппу (синильная кислота и ее соли);
- соединения фосфора;
- галогены (хлор, бром, фтор);
- некоторые другие соединения.

К высоко опасным АХОВ относятся:

- минеральные и органические кислоты (H_2SO_4 , HCl , HNO_3 , уксусная и др.);
- щелочи (аммиак, $NaOH$, KOH и др.);
- серосодержащие соединения (сульфиды, сероуглерод и т.д.);
- некоторые спирты и альдегиды кислот (фармальдегид, метиловый спирт и др.);
- фенолы, креозолы и их производные;
- некоторые другие вещества.

Опасность заражения аварийно химически опасным веществом (АХОВ) приземного слоя атмосферы, зданий и сооружений, местности, открытых водоисточников, а в отдельных случаях и грунтовых вод при химических авариях определяется физико-химическими свойствами АХОВ их способность переходить из жидкого состояния в парообразное.

В результате возникновения аварий на различных производственных объектах с жидкими (газообразными) АХОВ или пожаров с твердыми химическими веществами с образованием аэрозолей АХОВ в районах, прилегающих к очагу поражения, может создаться сложная химическая обстановка на значительных площадках с образованием обширных зон химического заражения.

Под зоной химического заражения понимается территория или акватория, в пределах которой распространены или куда привнесены

опасные химические вещества в концентрациях или количествах, создающих опасность для жизни и здоровья людей, для сельскохозяйственных животных и растений в течение определенного времени. Она включает территорию непосредственного разлива АХОВ (горения веществ, образующих АХОВ) и территорию, над которой распространилось облако зараженного воздуха с поражающими концентрациями.

Величина зоны химического заражения зависит от физико-химических свойств, токсичности, количества разлившегося (выброшенного в атмосферу) АХОВ, метеорологических условий и характера местности.

Размеры зоны химического заражения характеризуются глубиной и шириной распространения облака зараженного воздуха с поражающими концентрациями и площадью разлива (горения) АХОВ. Внутри зоны могут быть районы со смертельными концентрациями.

Основной характеристикой зоны химического заражения является глубина распространения облака зараженного воздуха. Она может колебаться от нескольких десятков метров до десятков километров.

Первичным облаком называется облако загрязненного воздуха, образующееся при разрушении емкости в результате мгновенного перехода в атмосферу всего при или части содержимого в ней АХОВ.

Вторичное облако – это облако загрязненного воздуха, образующееся в результате испарения разлившегося АХОВ с подстилающей поверхности.

Глубина зоны химического заражения для АХОВ определяется глубиной распространения первичного и вторичного облаков зараженного воздуха и в значительной степени зависит от метеорологических условий, рельефа местности и плотности застройки объектов.

Существенное влияние на глубину зоны химического заражения оказывает степень вертикальной устойчивости приземного слоя воздуха.

Обычно рассматриваются для таких задач прогнозирования три основных типа устойчивости атмосферы:

- неустойчивая (конвекция), когда нижний слой воздуха нагрет сильнее верхнего. Характерна для солнечной летней погоды;
- безразличная (изотермия), когда температура воздуха на высотах до 30 м от поверхности земли почти одинакова. Характерна для переменной облачности в течение дня, облачного дня и облачной ночи, а также дождливой погоды;

– устойчивая (инверсия), когда нижние слои воздуха холоднее верхних. Характерна для ясной ночи, морозного зимнего дня, а также для утренних и вечерних часов (табл. 3.19).

Таблица 3.19

Степень вертикальной устойчивости атмосферы

Скорость ветра, м/с	Ночь		Утро		День		Вечер	
	Ясно, перемен. облачность	Сплошная облачность	Ясно, перемен. облачность	Сплошная облачность	Ясно, перемен. облачность	Сплошная облачность	Ясно, перемен. облачность	Сплошная облачность
>2	ин	из	из(ин)	из	кон(из)	из	из	из
2-3,9	ин	из	из(ин)	из	из	из	из(ин)	из
>4	ин	из	из	из	из	из	из	из

Примечание. Обозначения: ин – инверсия, из – изотермия, кон – конвекция.

Инверсия способствует распространению облака зараженного воздуха на более значительные расстояния от места разлива (горения) АХОВ, чем изотермия и конвекция. Наименьшая глубина распространения АХОВ наблюдается при конвекции.

Существенное влияние на глубину зоны химического заражения оказывает площадь разлива АХОВ. Она может колебаться в широких пределах – от нескольких сотен до нескольких тысяч квадратных метров. Наличие земляной обваловки, поддона, железобетонной ограждающей стенки ограничивает площадь разлива АХОВ и способствует сокращению глубины распространения зараженной атмосферы.

В зависимости от глубины распространения облака АХОВ в зоне заражения может быть один или несколько очагов химического поражения. Очагом химического поражения принято называть территорию с находящимися на ней объектами, в пределах которой в результате воздействия АХОВ произошли массовые поражения людей, сельскохозяйственных животных и растений. Такими объектами могут быть административные, промышленные, сельскохозяйственные предприятия и учреждения, жилые кварталы населенных пунктов, городов и другие объекты.

Потери рабочих, служащих и населения в очагах химического поражения зависят от токсичности, величины концентрации АХОВ и времени пребывания людей в очаге поражения, степени их защищенности и своевременности использования индивидуальных средств защиты (противогазов). Характер поражения людей, находящихся в зоне химического поражения, может быть различным. Он определяется главным образом токсичностью АХОВ и полученной токсодозой.

3.4.2. Основные допущения при прогнозировании химического заражения

При заблаговременном прогнозировании обстановки при химических авариях с целью определения размеров зоны защитных мероприятий применяются следующие допущения:

- емкости, содержащие опасные химические вещества (ОХВ), разрушаются полностью;
- толщина слоя ОХВ, разлившегося свободно по подстилающей поверхности, принимается равной 0,05 м по всей площади разлива или 0,5 м – в случае разрушения изотермического хранилища аммиака;
- при проливе ОХВ из емкостей, имеющих самостоятельный поддон (обваловку) высотой H , м, толщина слоя жидкости принимается равной $h = H - 0,2$ (м);
- при аварии на газо- и продуктопроводах величина выброса ОХВ принимается равной его максимальному количеству, содержащемуся в трубопроводе между автоматическими отсекающими;
- предельное время пребывания людей в зоне заражения принимается равным времени испарения ОХВ, но не более 4 ч.

Исходными данными для прогнозирования являются:

- общее количество ОХВ на опасном химическом объекте (ОХО) и данные по его размещению в емкостях и технологических трубопроводах;
- количество ОХВ, выброшенных в атмосферу, и характер их разлива (в поддон, в обваловку или на грунт);
- токсические свойства ОХВ;
- метеорологические условия (температура воздуха, скорость ветра на высоте 10 м, состояние приземного слоя воздуха); при заблаговременном прогнозе принимают, что температура воздуха равна 20 °С, скорость ветра – 1 м/с, а состояние атмосферы – инверсия.

3.4.3. Расчет зоны химического заражения

Внешние границы зоны заражения ОХВ рассчитывают по ингаляционной пороговой токсодозе $D_{пор}$, мг·мин/л.

Глубины зон заражения первичным Γ_1 , км, и вторичным Γ_2 , км, облаками определяется по табл. 3.20 в зависимости от скорости ветра w_B , м/с, и эквивалентного количества опасного химического вещества (ОХВ) Q_3 , т, полная глубина зоны заражения определяется как

$$\Gamma_{зар} = \begin{cases} \Gamma_{зар} = \Gamma_1 + 0,5 \cdot \Gamma_2, & \text{если } \Gamma_1 > \Gamma_2; \\ \Gamma_{зар} = \Gamma_1 + 0,5 \cdot \Gamma_1, & \text{если } \Gamma_1 < \Gamma_2. \end{cases} \quad (3.53)$$

Предельно возможное значение глубины переноса воздушных масс $\Gamma_{пред}$, км, равно

$$\Gamma_{пред} = u\tau, \quad (3.54)$$

где τ – время полного испарения или ликвидации источника химического заражения, ч; u – скорость переноса переднего фронта зараженного воздуха при заданной скорости ветра и степени вертикальной устойчивости атмосферы можно определить по табл. 3.19.

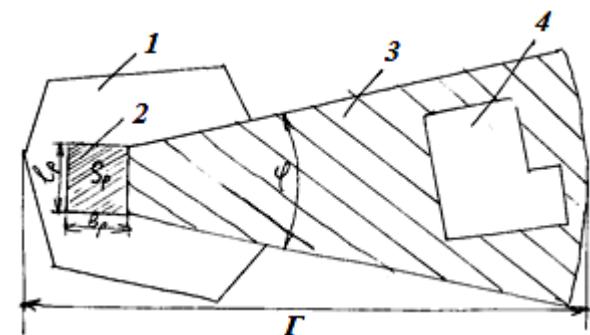


Рис. 3.6. Схема зоны химического заражения:
1 – производственная территория; 2 – зона разлива АХОВ; 3 – зона химического загрязнения; 4 – населенный пункт

Таблица 3.20

Глубины зон возможного заражения ОХВ, км

Скорость ветра, м/с	Эквивалентные количества ОХВ, т															
	0,01	0,05	0,1	0,5	1	3	5	10	20	30	50	70	100	300	500	1000
1	0,38	0,85	1,25	3,16	4,75	9,18	12,53	19,20	29,56	38,13	52,67	65,23	89,91	165	231	363
2	0,25	0,59	0,84	1,92	2,86	5,35	7,20	10,83	16,44	21,02	28,73	35,35	44,09	87,79	121	189
3	0,22	0,48	0,68	1,53	2,17	3,99	5,34	7,96	11,94	15,18	20,59	25,21	31,30	61,47	84,50	130
4	0,19	0,42	0,59	1,33	1,88	3,29	4,36	6,46	9,62	12,18	16,43	20,05	24,80	48,18	65,92	101
5	0,17	0,38	0,53	1,19	1,68	2,91	3,75	5,53	8,19	10,33	13,88	16,89	20,82	40,11	54,67	83,60
6	0,15	0,34	0,48	1,09	1,53	2,66	3,43	4,88	7,20	9,06	12,1	14,79	18,13	34,67	47,09	71,70
7	0,14	0,32	0,45	1,00	1,42	2,46	3,17	4,49	6,48	8,14	10,87	13,17	16,17	30,73	41,63	53,16
8	0,13	0,30	0,42	0,94	1,33	2,30	2,97	4,20	5,92	7,42	9,90	11,98	14,68	27,75	37,49	56,70
9	0,12	0,28	0,40	0,88	1,25	2,17	2,80	3,96	5,60	6,86	9,12	11,03	13,50	25,39	34,24	51,60
10	0,12	0,26	0,38	0,84	1,19	2,06	2,66	3,76	5,31	6,50	8,50	10,23	12,54	23,49	31,61	47,53
11	0,11	0,25	0,36	0,80	1,13	1,96	2,53	3,58	5,06	6,20	8,01	9,61	11,74	21,91	29,44	44,15
12	0,11	0,24	0,34	0,76	1,08	1,88	2,42	3,43	4,85	5,94	7,67	9,07	11,05	20,58	27,61	41,30
13	0,10	0,23	0,33	0,74	1,04	1,80	2,37	3,29	4,66	5,70	7,37	8,72	10,48	19,45	26,04	38,90
14	0,10	0,22	0,32	0,71	1,00	1,74	2,24	3,17	4,49	5,50	7,10	8,40	10,04	18,46	24,69	36,81
15	0,10	0,22	0,31	0,69	0,97	1,68	2,17	3,07	4,34	5,31	6,86	8,11	9,7	17,60	23,50	34,98

Примечания. 1. При скорости ветра больше 15 м/с размеры зон заражения принимать как при скорости ветра 15 м/с.

2. При скорости ветра меньше 1 м/с размеры зон заражения принимать как при скорости ветра 1 м/с.

Таблица 3.21

Скорость переноса переднего фронта облака зараженного воздуха при различном состоянии атмосферы

Скорость ветра, м/с	Состояния атмосферы		
	Инверсия	Изотермия	Конвекция
1	5	6	7
2	10	12	14
3	15	18	21
4	21	24	28
5	–	29	–
6	–	35	–
7	–	41	–
8	–	47	–
9	–	53	–
10	–	59	–
11	–	65	–
12	–	71	–
13	–	76	–
14	–	82	–
15	–	88	–

За истинную глубину зоны заражения принимается величина

$$\Gamma = \min \{ \Gamma_{\text{зар}}, \Gamma_{\text{пред}} \}. \quad (3.55)$$

В зависимости от скорости приземного ветра, обуславливающей флуктуации его направления, зоны возможного заражения наносятся на карты в виде круга или сектора с угловыми размерами, указанными в табл. 3.22.

Таблица 3.22

Угловые размеры зоны возможного заражения ОХВ

Скорость ветра, м/с	Не более 0,5	Более 0,5 – не более 1,0	Более 1 – не более 2,0	Более 2,0
Угловые размеры, град	360	180	90	45

Площадь зоны фактического заражения ОХВ ($S_{\text{ф}}, \text{км}^2$), находящейся внутри зоны возможного заражения, определяется по формуле

$$S_{\text{ф}} = k_8 \Gamma^2 \tau^{0,2}, \quad (3.56)$$

где Γ – глубина зоны заражения, км; τ – время с момента аварии; k_8 – коэффициент, учитывающий влияние степени вертикальной устойчивости воздуха на ширину зоны заражения: для инверсии он равен 0,081, изотермии – 0,133 и конвекции – 0,235.

Количественные характеристики выброса ОХВ для расчетов параметров зоны заражения определяются по его эквивалентному значению Q_3 , под которым понимается такое количество хлора, масштаб заражения которым при инверсии равен масштабу заражения при тех же условиях заданным количеством данного ОХВ, перешедшим в первичное (вторичное) облако.

Эквивалентное количество ОХВ в первичном облаке $Q_{3,1}$, т, определяется по формуле

$$Q_{3,1} = k_1 k_3 k_5 k_7 Q_0, \quad (3.57)$$

где k_1 – коэффициент, зависящий от условий хранения ОХВ (см. табл. 3.23); k_3 – коэффициент, равный отношению пороговой.

Таблица 3.23

**Характеристик ОХВ и вспомогательные коэффициенты
для определения глубин зон заражения**

№ п/п	Наименование ОХВ	Плотность ОХВ ρ , т/м ³		$T_{кип}$, °С	$D_{пор}$ мгХ/мин/л	k_1	k_2	k_3	k_i , при различных температурах воздуха, °С						
		Газ	жидкость						-40	-20	0	+20	+40		
1	Аммиак:														
	Хранение под давлением	0,0008	0,681	-33,42	15,0	0,18	0,025	0,04	0/0,9	0,3/0,9	0,6/0,1	1,0/1,0	1,4/1,0		
	Изотерм. Хранение	-	0,681	-33,42	15,0	0,01	0,025	0,04	0/0,9	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0		
2	Водород:														
	Мышьяковистый	0,0035	1,64	-62,47	0,2**	0,17	0,054	0,857	0/1,0	0,5/1,0	0,8/1,0	1,0/1,0	1,2/1,0		
	Фтористый	-	0,989	12,52	4,0	0	0,028	0,15	0,1	0,2	0,5	1,0	1,0		
	Хлористый	0,0016	1,191	-85,1	2,0	0,28	0,037	0,30	0,64/1	0,6/1,0	0,8/1,0	1,0/1,0	1,2/1,0		
	Бромистый	0,0036	1,490	-66,77	2,4*	0,13	0,055	6,0	0,2/1,0	0,5/1,0	0,8/1,0	1,0/1,0	1,2/1,0		
Цианистый	-	0,687	25,7	0,2	0	0,026	3,0	0	0	0,4	1,0	1,3			
3	Диметил-амин	0,002	0,680	6,9	1,2*	0,06	0,041	0,5	0/0,1	0/0,3	0/0,8	1,0/1,0	2,5/1,0		
4	Метиламин	0,0014	0,699	-6,5	1,2*	0,13	0,034	0,5	0/0,3	0/0,7	0,5/1,0	1,0/1,0	2,5/1,0		
5	Метил:														
	Бромистый	-	1,732	3,6	1,2*	0,04	0,039	0,5	0/0,2	0/0,4	0/0,9	1,0/1,0	2,3/1,0		
	Хлористый	0,0023	0,983	-23,76	10,8*	0,125	0,044	0,056	0/0,5	0,1/1,0	0,6/1,0	1,0/1,0	1,5/1,0		
6	Метилмеркаптан	-	0,857	5,95	1,7*	0,06	0,043	0,353	0/0,1	0/0,3	0/0,8	1,0/1,0	2,4/1,0		
7	Оксиды азота	-	1,491	21,0	1,5	0	0,040	0,4	0	0	0,4	1,0	1,0		
8	Оксид этилена	-	0,862	10,7	22**	0,05	0,041	0,27	0/0,1	0/0,3	0/0,7	1,0/1,0	3,2/1,0		
9	Сернистый ангидрид	0,0029	1,462	-10,1	1,8	0,11	0,049	0,333	0/0,2	0/0,5	0,3/1,0	1,0/1,0	1,7/1,0		
10	Сероводород	0,0015	0,964	-60,35	16,1	0,27	0,042	0,036	0,3/1,0	0,5/1,0	0,8/1,0	1,0/1,0	1,2/1,0		
11	Сероуглерод	-	1,263	46,2	45	0	0,021	0,013	0,1	0,2	0,4	0,1	2,1		
12	Соляная кислота	-	1,198	-	2	0	0,021	0,3	0	0,1	0,3	1,0	1,6		
13	Формальдегид	-	0,815	-19,0	0,6*	0,19	0,034	1,0	0/0,4	0/1,0	0,5/1,0	1,0/1,0	1,5/1,0		
14	Фосген	0,0035	1,432	8,2	0,6	0,05	0,061	1,0	0/0,1	0/0,3	0/0,7	1,0/1,0	2,7/1,0		
15	Фосфор треххлористый	-	1,57	75,3	3,0	0	0,010	0,2	0,1	0,2	0,4	1,0	2,3		
16	фосфора хлорокись	-	1,675	107,2	0,06*	0	0,003	10,0	0,05	0,1	0,3	1,0	2,6		
17	Тор	0,0017	1,512	-188,2	0,95	0,95	0,038	3,0	0,7/1,0	0,8/1,0	0,9/1,0	1,0/1,0	1,1/1,0		
18	Хлор	0,0032	1,558	34,1	0,6	0,18	0,052	1,0	0/0,9	0,3/1,0	0,6/1,0	1,0/1,0	1,4/1,0		
19	Хлорпикрин	-	1,658	112,3	0,2	0	0,002	3,0	0,03	0,1	0,3	1,0	2,9		
20	Хлорциан	0,0021	1,220	12,6	0,75	0,75	0,046	0,80	0/0	0/0	0/0,6	1,0/1,0	3,9/1,0		

Примечания: 1. В столбцах 8–12 в числителе k_i для первичного облака, в знаменателе – для вторичного. 2. В столбце 5 численные значения токсидоз, помеченных звездочками, определены по соотношению $D_{пор} = 240k$ ПДК_{р,з}, где ПДК_{р,з} – предельно допустимая концентрация рабочей зоны, мг/л; $k = 5$ для раздражающих ОХВ (помечены одной звездочкой) и $k = 9$ для прочих ОХВ (помечены двумя звездочками). 3. Значения k_1 для изотермического хранения аммиака приведено для случая разлива в поддон.

Токсодозы хлора к поровой токсидозе рассматриваемого ОХВ (см. табл. 3.23); k_5 – коэффициент, учитывающий степень вертикальной устойчивости атмосферы: 1 – для инверсии, 0,23 – для изотермии и 0,8 – для конвекции; k_7 – коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха (см. табл. 3.23): для сжатых газов $k_7 = 1$; Q_0 – количество разлившегося (выброшенного) ОХВ, т.

Для сжиженных газов, не вошедших в табл. 3.23, значение коэффициента k_7 принимается равным 1, а значение k_1 определяется по выражению

$$k_1 = C_p \Delta T / L_{исп},$$

где C_p – удельная теплоемкость жидкого ОХВ, кДж/(кг·К); ΔT – разность температур жидкого ОХВ до и после разрушения емкости, град; $L_{исп}$ – удельная теплота испарения, кДж/кг.

Эквивалентное количество ОХВ во вторичном облаке $Q_{3,2}$, т, определяется по формуле

$$Q_{3,2} = (1 - k_1) k_2 k_3 k_4 k_5 k_6 k_7 Q_0 / (h \rho_{ж}), \quad (3.58)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкой азы ОХВ, т/м³ (см. табл. 3.23); h – толщина слоя разлившегося жидкого ОХВ, м;

k_2 – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств ОХВ (см. табл. 3.23); k_4 – коэффициент, учитывающий скорость ветра (табл. 3.24); k_6 – коэффициент, учитывающий время, прошедшее с начала аварии τ (ч), равный

$$k_6 = \begin{cases} \tau^{0,8} & \text{при } \tau < \tau_{исп}; \\ \tau_{исп}^{0,8} & \text{при } \tau > \tau_{исп}; \\ 1 & \text{при } \tau_{исп} < 1 \text{ ч.} \end{cases}$$

Здесь $\tau_{исп}$ – время, прошедшее после аварии, ч; $\tau_{исп}$ – время испарения ОХВ, ч, определяемое по формуле

$$\tau_{исп} = \frac{h\rho_{ж}}{k_2 k_4 k_7}. \quad (3.59)$$

Коэффициенты k_2, k_4, k_7 определяем по табл. 3.23, при определении $Q_{3,2}$ для веществ, не указанных в табл. 3.23, коэффициент k_7 принимается равным 1, а коэффициента k_2 определяется по формуле

$$k_2 = 8,1 \cdot 10^{-6} P_{нас} \sqrt{M}, \quad (3.60)$$

где $P_{нас}$ – давление насыщенного пара вещества при заданной температуре воздуха, мм рт. ст; M – молекулярная масса вещества.

Таблица 3.24

Значение коэффициента k_4 в зависимости от скорости ветра

Скорость ветра, м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
k_4	1	1,33	1,67	2,0	2,34	2,67	3,0	3,34	3,67	4,0	5,68

3.4.4. Прогнозирование количества пострадавших среди персонала и населения

Основными исходными данными для расчета являются:

- наличие факторов поражения (первичное и вторичное облака либо только вторичное облако);
- средняя плотность населения в зоне заражения исходя из допущения, что население распределено по территории равномерно;
- доля населения, которую планируется защитить тем или иным способом (укрытие в жилых и производственных помещениях, транспорте, убежищах и других защитных сооружениях; использование индивидуальных средств защиты и проведение эвакуации);
- степень защищенности населения при использовании определенного способа защиты.

Количество населения, попавшего в зону заражения, N , чел., рассчитывается исходя из средней плотности по формуле

$$N = P_{г} S_{г} + P_{зз} S_{зз}, \quad (3.61)$$

где $P_{г}$ и $P_{зз}$ – плотность населения соответственно в городе и загородной зоне, чел./км²; $S_{г}$ и $S_{зз}$ – площади территории в городе и загородной зоне, приземный слой воздуха которых подвергся заражению, км².

Численность пораженного населения определяется его защищенностью

$$N_{пор} = N \sum_{i=1}^n P_i (1 - K_{защ,i}),$$

$$\text{при } \sum_{i=1}^n P_i = 1 \quad (3.62)$$

$$\text{или } N_{пор} = N (1 - K_{защ}^{cp}),$$

где $N_{пор}$ – количество пораженного населения, чел.; N – численность населения, оказавшегося в зоне фактического заражения, чел.; P_i – доля населения, защищаемая от действия ОХВ i -м способом; $K_{защ,i}$ – коэффициент защиты укрытия i -го способа; $K_{защ}^{cp}$ – среднее значение коэффициента защищенности населения с учетом его пребывания открыто на местности, в транспорте, жилых и производственных зданиях (табл. 3.25).

Таблица 3.25

Коэффициент защищенности населения по месту его пребывания

№ п/п	Место пребывания или применяемые средства защиты	Время пребывания				
		15 мин	30 мин	1 ч	2 ч	3-4 ч
1.	Открыто на местности	0	0	0	0	0
2.	В транспорте	0,95	0,75	0,41	–	–
3.	В производственных помещениях	0,67	0,5	0,25	0,09	0
4.	В жилых и общественных помещениях	0,97	0,92	0,80	0,38	0,09
5.	В убежищах:					
	С режимом регенерации воздуха	1	1	1	1	1
	Без режима регенерации воздуха	1	1	1	1	1
6.	В средствах индивидуальной защиты органов дыхания	0,7	0,7	0,7	0,7	0

Примечание. Коэффициент защищенности населения при использовании противогазов приведен для района пребывания людей не менее 1000 м от источника заражения.

В случае образования первичного и вторичного облаков заражения сначала рассчитывают количество пораженных от первичного облака ($N_{пор,1}$). Расчет количества человек, пораженных ОХВ вторичного облака, производится путем вычитания числа пораженных от первичного облака из общего количества населения в зоне заражения.

Для оценки распределения людей по степеням поражения приближенно можно принять, что структура пораженного населения соответствует данным табл. 3.26.

Таблица 3.26

Структура населения, пораженного ОХВ

Характер поражения	Смертельный	Тяжелой и средней степени	Легкой степени	Пороговые
Показатель	10%	15%	20%	55%

Для оценки глубины зон с разной степенью поражения можно принять, что:

- глубина зоны, где могут наблюдаться смертельные поражения, составляет $G_{см} = 0,3 \cdot Г$,
- глубина зоны, где могут быть поражения не ниже средней степени тяжести, составляет $G_{т. и ср.} = 0,5 \cdot Г$,
- глубина зоны, где могут поражения не ниже легкой степени, составляет $G_{лег} = 0,7 \cdot Г$.

Время прохода облака ОХВ к заданному объекту $\tau_{подх}$, ч, зависит от скорости переноса облака воздушным потоком и определяется по формуле

$$\tau_{подх} = x/u, \quad (3.63)$$

где x – расстояние от источника заражения до заданного объекта, км; u – скорость переноса переднего фронта облака зараженного воздуха, км/ч.

Более строго пространственное распределение и степень поражения людей получают, используя вероятностный подход к определению поражающего фактора $P_{пор}$ по пробит-функции Pr в виде:

$$Pr = a + b \cdot \ln(C^n \tau), \quad (3.64)$$

где a , b и n – константы для каждого конкретного ОХВ (см. табл. 3.27); τ – время воздействия ОХВ, мин; C – концентрация ОХВ в конкретной точке зоны заражения, ppm , связанная с концентрацией вещества в мг/л соотношением

$$C_{ppm} = 62360 C_{мг/л} (273,15 + t) / (M \cdot P),$$

где C_{ppm} , $C_{мг/л}$ – концентрация ОХВ, выраженная ppm и мг/л, соответственно; t – температура воздуха, °С; M – молекулярная масса ОХВ, кг/кмоль; P – давление воздуха, мм рт. ст.

Таблица 3.27

Значения коэффициентов a , b и n в формуле (3.64) для случая смертельного поражения

Вещество	a	b	n
Акролеин	-4,931	2,049	1
Акролонитрил	-24,42	3,008	1,43
Аммиак	-30,90	1,85	2
Бензол	-104,78	5,3	2
Бром	-4,04	0,92	2
Угарный газ	-32,98	3,7	1
Четыреххлористый углерод	-1,29	0,408	2,5
Хлор	-3,29	0,92	2
Формальдегид	-7,24	1,3	2
Соляная кислота	-16,85	2,0	1
Цианистоводородная кислота	-24,42	3,008	1,43
Фтористоводородная кислота	-30,87	3,354	1
Сероводород	-26,42	3,008	1,43
Бромистый метил	-50,81	5,27	1
Метилизоцианат	-0,642	1,637	0,653
Оксид азота	-8,79	1,4	2
Фосген	-14,27	3,686	1
Оксид пропилена	-2,415	0,509	2
Диоксид серы	-10,67	2,1	1
Толуол	-1,794	0,408	2,5

В самом простом случае для точечного источника наседающей примеси на уровне земли приближенное значение концентрации ОХВ в точке по направлению ветра можно найти по выражению, вытекающему из нормального закона распределения на плоскости:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right], \quad (3.65)$$

где $C(x, y, z)$ – значение концентрации в точке с координатами x, y, z , мг/л; Q – мощность источника выброса, г/с; u – скорость ветра, м/с; σ_y, σ_z – стандартные отклонения на расстоянии x по осям Y и Z , м.

Величины стандартных отклонений от расстояния x определяются по следующим формулам:

$$\sigma_y = \begin{cases} \frac{C_3 x (13212 + x/u)}{13812 \sqrt{1 + 1 \cdot 10^{-3} x}} & \text{при } x/u \geq 600; \\ \frac{C_3 x}{\sqrt{1 + 1 \cdot 10^{-3} x}} & \text{при } \frac{x}{u} < 600; \end{cases} \quad (3.66)$$

$$\sigma_z = g(x) f(z_0, x), \quad (3.67)$$

$$\text{где } g(x) = \frac{A_1 x^{D_1}}{1 + A_2 x^{D_2}} \quad (3.68)$$

$$f = (z_0, x) = \begin{cases} \ln [C_1 x^{D_1} (1 + C_2 x^{D_2})] & \text{при } z_0 < 0,1 \text{ м;} \\ \ln \left[\frac{C_1 x^{D_1}}{1 + X_2 x^{D_2}} \right] & \text{при } z_0 \geq 0,1 \text{ м.} \end{cases} \quad (3.69)$$

Коэффициенты $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, C_3, D_1, D_2$ определяются по табл. 3.28 и 3.29.

Таблица 3.28

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 3.29

Величины коэффициентов C_1, C_2, D_1, D_2 в зависимости от размера шероховатости z_0

$z_0, \text{ см}$	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 3.30

Шероховатость поверхности z_0 в зависимости от типа местности, где происходит рассеяние

Тип местности	$z_0, \text{ см}$
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

Величина σ_z , рассчитанная по формуле (3.67), не должна превосходить величины σ_z , указанные в табл. 3.31.

Таблица 3.31

Максимальное значение σ_z

Класс стабильности атмосферы	$\sigma_z, \text{ м}$
Конвекция	640
Изотермия	400
Инверсия	220

Если это имеет место, то вместо величины, рассчитанной по формуле (3.67), следует использовать соответствующее данному классу стабильности атмосферы значение из табл. 3.31.

3.5. Прогнозирование и оценка обстановки при радиационных авариях

3.5.1. Общая характеристика радиационно опасных объектов и радиационных аварий

Радиационно опасный объект – это объект, на котором хранят, перерабатывают, используют или транспортируют радиоактивные вещества, при аварии на котором или его разрушении может произойти облучение ионизирующим излучением или радиоактивное загрязнение людей, сельскохозяйственных животных и растений, объектов народного хозяйства, а также окружающей природной среды.

К радиационно опасным объектам относятся:

- предприятия ядерного топливного цикла (предприятия ЯТЦ);
- атомные станции (АС), атомные электрические станции (АЭС), атомные теплоэлектроцентрали (АТЭЦ), атомные станции теплоснабжения (АСТ);
- объекты с ядерными энергетическими установками (объекты с ЯЭУ): корабельные, космические;
- исследовательские ядерные реакторы;
- ядерные боеприпасы (ЯБП) и склады их хранения;
- объекты размещения и хранения делящихся материалов;
- установки технологического, медицинского назначения и источники тепловой и электрической энергии, в которых используются радионуклиды;
- территории и водоемы, загрязненные радионуклидами в результате имевших место радиационных аварий, ядерных взрывов в мирных целях, а также производственной деятельности предприятий ЯТЦ.

В настоящее время общепризнанным является утверждение специалистов о том, что ядерная энергетика является одной из наиболее «чистых» отраслей производства. Сравнительный анализ опасности различных объектов показывает, что риск смертельных поражений от выбросов АЭС при нормальной их работе в 400 раз меньше, чем от выбросов вредных веществ, источниками которых являются ТЭС. Вместе с тем радиационные аварии (аварии с выбросом радиоактивных веществ) на радиационноопасных объектах имеют очень серьезные последствия (Три-Майл-Айленд в США, 1979, Чернобыльская АЭС на Украине, 1986).

Радиационная авария – авария на радиационно опасном объекте, приводящая к выходу или выбросу радиоактивных веществ и (или) ионизирующих излучений за предусмотренные проектом для нормальной эксплуатации данного объекта границы в количествах, превышающих установленные пределы безопасности его эксплуатации.

Наиболее серьезные последствия имеют радиационные аварии на атомных станциях (АС).

На российских АС работают следующие типы ядерных реакторов:

- водоводяные энергетические реакторы электрической мощностью 440 МВт (ВВЭР–440) и 1000 МВт (ВВЭР–1000) на тепловых нейтронах;
- реакторы большой мощности, канальные, электрической мощностью 1000 МВт (РБМК–1000), водоводяные, на тепловых нейтронах;
- реакторы жидкометаллические на быстрых нейтронах электрической мощностью 600 МВт (БН–600);
- реакторы энергетические графитовые паровые на тепловых нейтронах, электрической мощностью 12 МВт (ЭГП–12).

Наиболее тяжелыми радиационными авариями на АС, сопровождаемыми выбросом урана и продуктов его деления за пределы санитарно-защитной зоны и радиоактивным загрязнением окружающей среды, являются запроектные аварии, обусловленные разгерметизацией первого контура реактора с разрушением или без разрушения активной зоны (Чернобыль, 1986).

Под запроектной (гипотетической) аварией понимается такая авария, которая вызывается не учитываемыми для проектных аварий исходными событиями и сопровождается дополнительными по сравнению с проектными авариями отказами систем безопасности.

В случае возникновения аварии должны быть приняты практические меры для восстановления контроля над источником излучения и сведения к минимуму доз облучения, количества облученных лиц, радиоактивного загрязнения окружающей среды, экономических и социальных потерь, вызванных радиоактивным загрязнением.

При радиационной аварии или обнаружении радиоактивного загрязнения ограничение облучения осуществляется защитными мероприятиями, применимыми, как правило, к окружающей среде и (или) к человеку. Эти мероприятия могут приводить к нарушению нормальной жизнедеятельности населения, хозяйственного и

социального функционирования территории, т.е. являются вмешательством, влекущим за собой не только экономический ущерб, но и неблагоприятное воздействие на здоровье населения, психологическое воздействие на население и неблагоприятное изменение состояния экосистем. Поэтому при принятии решений о характере вмешательства (защитных мероприятиях) следует руководствоваться следующими принципами:

- предлагаемое вмешательство должно принести обществу и прежде всего облучаемым лицам больше пользы, чем вреда, т.е. уменьшение ущерба в результате снижения дозы должно быть достаточным, чтобы оправдать вред и стоимость вмешательства, включая его социальную стоимость (принцип обоснования вмешательства);

- форма, масштаб и длительность вмешательства должны быть оптимизированы таким образом, чтобы чистая польза от снижения дозы, т.е. польза от снижения радиационного ущерба за вычетом ущерба, связанного с вмешательством, была бы максимальной (принцип оптимизации вмешательства).

Исходя из указанных принципов при планировании защитных мероприятий на случай радиационной аварии органами Госсанэпиднадзора устанавливаются уровни вмешательства (дозы и мощности доз облучения, уровни радиоактивного загрязнения) применительно к конкретному радиационному объекту и условиям его размещения с учетом вероятных типов аварии, сценариев развития аварийной ситуации и складывающейся радиационной обстановки.

При аварии, повлекшей за собой радиоактивное загрязнение обширной территории, на основании контроля и прогноза радиационной обстановки устанавливается зона радиационной аварии. В зоне радиационной аварии проводится контроль радиационной обстановки и осуществляются мероприятия по снижению уровней облучения населения на основе изложенных принципов и подходов.

3.5.2. Биологическое действие ионизирующего излучения и единицы его измерения

Ионизирующее излучение – это излучение, взаимодействие которого с веществом приводит к образованию в этом веществе ионов разного знака. К ионизирующему излучению относятся следующие виды излучений корпускулярной и волновой природы:

- альфа-излучение (α -излучение) – потоки α -частиц (ядер гелия), испускаемых при ядерных превращениях. Повсеместно распространенным α -излучателем является радон, который всегда присутствует в воздухе жилых и производственных помещений;

- бета-излучение (β -излучение) – потоки электронов с непрерывным энергетическим спектром, испускаемые при ядерных превращениях;

- гамма-излучение (γ -излучение) – электромагнитное ионизирующее излучение, испускаемое при ядерных превращениях;

- рентгеновское излучение – коротковолновое ($\lambda \sim 10^{-2}$ нм) электромагнитное излучение, генерируемое установками медицинского и промышленного назначения.

Под действием ионизирующего излучения в биологической ткани происходит образование ионов, которые быстро переходят в очень активные радикальные частицы – свободные радикалы, вызывающие разрушения и повреждения клеточных структур.

Нарастание числа необратимых биологических дефектов может привести к возникновению острой лучевой болезни или же проявляется в увеличении риска отдаленных последствий – онкологических и генетических заболеваний. Медленное накопление дозы излучения менее опасно, так как в этом случае поврежденные ткани организма частично восстанавливаются.

Ионизирующее излучение и его взаимодействие с веществом описываются рядом характеристик и показателей. Рассмотрим основные из них.

Активность радиоактивного вещества – число ядерных превращений в единицу времени. Единицей измерения активности является 1 распад в секунду – беккерель (Бк). Внесистемная единица активности – кюри (Ки) связана с беккерелем следующим образом: $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$. Активностью в 1 Ки обладает 1 г радона-226 в равновесии со своими дочерними продуктами распада (ДПР).

Поглощенная доза излучения D – отношение средней энергии $\Delta \bar{W}$, переданной излучением веществу в некотором элементе объема, к массе вещества в этом объеме

$$D = \frac{\Delta \bar{W}}{\Delta m}. \quad (3.70)$$

Единицей измерения поглощенной дозы является 1 джоуль на килограмм или грэй (Гр): 1 Дж/кг = 1 Гр.

Для оценки биологического эффекта воздействия излучения произвольного состава используется понятие **эквивалентной дозы** с единицей измерения зиверт (Зв). Зиверт – это доза любого вида излучения, которая создает такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 Гр эталонного рентгеновского или γ – излучения. Внесистемной единицей эквивалентной дозы является Бэр. Один Бэр – это эквивалентная доза любого излучения, которое создает такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 Рад. эталонного излучения. Таким образом, 1 Зв = 100 Бэр. Связь между эквивалентной дозой $H_{T,R}$ и дозой D_T , поглощенной в ткани или органе T выражается формулой:

$$H_{T,R} = W_R D_{T,R}, \quad (3.71)$$

где W_R – безразмерный взвешивающий коэффициент, характеризующий биологическую эффективность излучения. Значения коэффициента W_R для некоторых видов излучения R приведены в табл. 3.32.

Таблица 3.32

Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения W_R

Вид излучения, R	Взвешивающий коэффициент, W_R
Электромагнитное излучение любой интенсивности	1
Электроны любых энергий	1
Нейтроны	5–20
Протоны	5
Альфа-частицы	20

Доза эффективная E используется для оценки риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека:

$$E = \sum_T W_T H_T, \quad (3.72)$$

где H_T – эквивалентная доза для ткани T , W_T – безразмерный взвешивающий коэффициент для этой же ткани или органа (табл. 3.33).

Эффективная доза также измеряется в зивертах.

Таблица 3.33

Взвешивающие коэффициенты W_T некоторых тканей и органов человека

Ткань или орган, T	Взвешивающий коэффициент, W_T
Гонады	0,2
Костный мозг	0,12
Легкие	0,12
Желудок	0,05
Печень	0,05
Щитовидная железа	0,05
Кожа	0,01

Доза эффективная коллективная S_E – величина, определяющая полное воздействие излучения на группу людей:

$$S_E = \sum_i E_i N_i, \quad (3.73)$$

где E_i – средняя эффективная доза для i -й подгруппы людей; N_i – число людей в этой подгруппе. Единицей измерения эффективной коллективной дозы является 1 человеко-зиверт (чел.·Зв).

Рассматриваются также **среднегодовые эффективные эквивалентные дозы**, измеряемые в миллизивертах за год (1 мЗв/год) или в бэрах за год (1 Бэр/год).

Вся совокупность неблагоприятных последствий облучения людей объединяется понятием радиационного риска:

$$R = P(E) r_E E, \quad (3.74)$$

$$\bar{R} = P(S_E) r_E S_E, \quad (3.75)$$

где R , \bar{R} – индивидуальный и коллективный риски; E , S_E – среднегодовые индивидуальные и коллективные дозы облучения; $P(E)$, $P(S_E)$ – вероятности событий, создающих дозы E и S_E ; r_E – коэффициент риска, для которого приняты следующие значения:

$$r_E = 5,6 \cdot 10^{-1} \text{ 1/чел.·Зв} \text{ – для профессионалов;}$$

$$r_E = 7,3 \cdot 10^{-1} \text{ 1/чел.·Зв} \text{ – для населения.}$$

Предельное значение индивидуального риска для персонала принимается равным 10^{-3} за год, для населения $5 \cdot 10^{-5}$ за год. Пренебрежимым считается уровень риска, равный 10^{-6} за год.

3.5.3. Мероприятия по защите населения в случае радиационной аварии

Принятие решений о мерах защиты населения в случае крупной радиационной аварии с радиоактивным загрязнением территории проводится на основании сравнения прогнозируемой дозы, предотвращаемой защитным мероприятием, с уровнями А и Б, приведенными в табл. 3.34 («Нормы радиационной безопасности. Гигиенические нормативы СП 2.6.1.758-99»).

Таблица 3.34

Критерии для принятия неотложных решений по защите населения в начальном периоде аварийной ситуации

Меры защиты	Предотвращаемая доза за первые 10 сут., мГр			
	На все тело		Щитовидная железа, легкие, кожа	
	уровень А	уровень Б	уровень А	уровень Б
Укрытие	5	50	50	500
Иодная профилактика:				
взрослые	-	-	250*	2500*
дети	-	-	100*	1000*
Эвакуация	50	500	500	5000

Примечание. *Только для щитовидной железы.

Если уровень облучения, предотвращаемого защитным мероприятием, не превосходит уровня А, нет необходимости в выполнении мер защиты, связанных с нарушением нормальной жизнедеятельности населения, а также хозяйственного и социального функционирования территории.

Если предотвращаемое защитным мероприятием облучение превосходит уровень А, но не достигает уровня Б, решение о выполнении мер защиты принимается по принципам обоснования и оптимизации с учетом конкретной обстановки местных условий.

Если уровень облучения, предотвращаемого защитным мероприятием, достигает и превосходит уровень Б, необходимо выполнение соответствующих мер защиты, даже если они связаны с нарушением нормальной жизнедеятельности населения, хозяйственного и социального функционирования территории.

На поздних стадиях радиационной аварии, повлекшей за собой загрязнение обширных территорий долгоживущими радионуклидами, решения о защитных мероприятиях принимаются с учетом сложившейся радиационной обстановки и конкретных социально-экономических условий.

При прогнозировании возможной радиационной обстановки определяются размеры зон для принятия неотложных решений по защите населения в начальном периоде аварии по критериям, приведенным в табл. 3.34. При этом рассматривается радиационная обстановка, возникающая в случае наиболее опасных аварий, отнесенных к 7 классу по шкале МАГАТЭ, для условий открытой местности и незащищенного населения.

Метеорологические условия в момент разрушения ядерного энергетического реактора оказывают решающее влияние на размеры зон радиоактивного загрязнения и характеризуют направление и динамику рассеяния радиоактивных веществ определяется степенью вертикальной устойчивости атмосферы и скоростью распространения облака выброса.

В целях определения радиоактивного загрязнения местности и приземного слоя атмосферы на жизнедеятельность населения и условия проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ на загрязненных территориях производится выявление и оценка радиационной обстановки.

Выявление и оценка возможной радиационной обстановки при разрушении ядерного энергетического реактора методом прогнозирования проводятся как заблаговременно при планировании мероприятий защиты населения на случай возникновения чрезвычайных ситуаций на АЭС, так и в начальный период развития аварии, когда данные радиационной разведки отсутствуют или поступают в недостаточном объеме.

Для таких задач прогнозирования обычно рассматривают три основных типа устойчивости атмосферы: конвекция, изотермия, инверсия, а в качестве исходных данных используют наиболее вероятные средние метеорологические условия. Поэтому в рамках данных ограничений, не может быть обеспечена удовлетворительная точность прогноза радиационной обстановки на расстояниях более 200 км.

При выявлении и оценке радиационной обстановки в начальный период развития ЧС в качестве исходных данных используются реальные метеорологические условия.

При выявлении радиационной обстановки решаются следующие задачи:

- определение размеров зон радиоактивного загрязнения местности и отображение их на картах (планах, схемах);
- определение размеров зон облучения щитовидной железы детей и взрослого населения за время прохождения облака и отображение их на картах (планах, схемах).

Исходными данными для выявления радиационной обстановки методом прогнозирования являются:

- а) информация об АЭС; тип ядерного энергетического реактора (РБМК, ВВЭР); электрическая мощность ЯЭР, МВт; координаты АЭС ($X_э$, $Y_э$), км; астрономическое время разрушения реактора T_p (дата и время);
- б) метеорологические характеристики: скорость и направление ветра на высоте 10 м; облачность (ясно, переменная, сплошная);
- в) при необходимости дополнительная информация приводится отдельно при рассмотрении каждой конкретной задачи.

3.5.4. Определение зон радиоактивного загрязнения

Зоны радиоактивного загрязнения представляют собой участки местности, ограниченные изолиниями доз внешнего облучения, которые может получить незащищенное население при открытом расположении за промежутки времени, определяемые с момента начала выброса радиоактивных веществ (время формирования заданной дозы облучения). Фактическое время формирования дозы облучения меньше на время подхода облака (рис. 3.7).

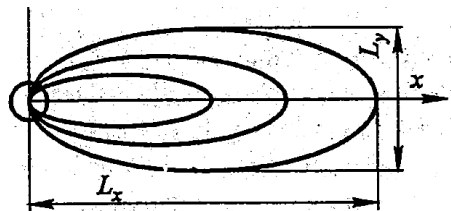


Рис. 3.7. Зоны радиоактивного заражения при радиационной аварии

Приведенное время подхода радиоактивного облака t_n , ч, отсчитываемое с момента начала выброса радиоактивных веществ в атмосферу, определяется по формуле:

$$t_n = \varphi \frac{X}{U_0}, \quad (3.76)$$

где X – расстояние до аварийного реактора по оси следа радиоактивного облака, км; U_0 – скорость ветра на высоте флюгера (10 м), м/с; φ – коэффициент, учитывающий распределение скорости ветра по высоте и размерность величин X и U_0 и принимающий значения при конвекции – 0,23, изотермии – 0,20, инверсии – 0,09.

Степень вертикальной устойчивости атмосферы, соответствующая погодным условиям и времени суток, определяется по табл. 3.19.

По табл. 3.35 определяются глубины прогнозируемых зон радиоактивного загрязнения L_x , соответствующие заданным значениям дозы внешнего облучения и времени ее формирования, погодным условиям, типу ЯЭР, а также находятся глубины прогнозируемых зон облучения щитовидной железы, соответствующие заданной дозе облучения.

Максимальные ширины зон L_y , км, (на середине глубин) определяются по формуле

$$L_y = AL_x, \quad (3.77)$$

где A – коэффициент, зависящий от степени вертикальной устойчивости атмосферы и принимающий значения при конвекции – 0,20, изотермии – 0,06, инверсии – 0,03.

Площади зон радиоактивного загрязнения S , км², и облучения щитовидной железы находятся по формуле:

$$S = 0,8L_xL_y. \quad (3.78)$$

Используя найденные размеры, зоны в масштабе карты отображаются в виде правильных эллипсов (см. рис. 3.7).

При решении задач с разрушением реакторов типа ВВЭР–440 глубины зон определяются умножением данных, рассчитанных для реактора ВВЭР–1000, на коэффициент 0,663:

$$L_{x(\text{ВВЭР-440})} = 0,663L_{x(\text{ВВЭР-1000})}. \quad (3.79)$$

Таблица 3.35

Глубины зон радиоактивного загрязнения и облучения щитовидной железы для принятия неотложных решений по защите населения в начальном периоде аварии для реакторов РБМК–1000 при различной степени вертикальной устойчивости атмосферы и скорости ветра (м/с) на высоте 10 м

Зона	Конвекция			Изотермия			Инверсия		
	≤2	3	4	≤2	5	≤7	≤2	3	4
Укрытые (уровень А, 5 за первые 10 сут. на все тело)	$\frac{240}{>300}$	$\frac{200}{>240}$	$\frac{190}{>220}$	$\frac{>280}{>260}$	$\frac{>300}{>200}$	$\frac{>260}{>300}$	$\frac{250}{275}$	$\frac{>280}{210}$	$\frac{>300}{>250}$
Укрытые (уровень Б, 50 за первые 10 сут. на все тело)	$\frac{55}{110}$	$\frac{40}{110}$	$\frac{35}{80}$	$\frac{140}{200}$	$\frac{163}{300}$	$\frac{160}{295}$	$\frac{140}{140}$	$\frac{185}{130}$	$\frac{220}{180}$
Эвакуация (уровень Б, 100 мГр за первые 10 сут. на все тело)	$\frac{10}{21}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{6}{11}$	$\frac{45}{70}$	$\frac{30}{44}$	$\frac{25}{53}$	$\frac{60}{57}$	$\frac{60}{50}$	$\frac{50}{50}$
Иодная профилактика Взрослые:									
Уровень А, 250 мГр за первые 10 сут. для щитовидной железы	$\frac{90}{140}$	$\frac{69}{125}$	$\frac{51}{98}$	$\frac{160}{120}$	$\frac{185}{235}$	$\frac{195}{240}$	$\frac{160}{185}$	$\frac{190}{220}$	$\frac{205}{270}$
Уровень Б, 2500 мГр за первые 10 сут. для щитовидной железы	$\frac{48}{28}$	$\frac{11}{20}$	$\frac{9}{14}$	$\frac{60}{90}$	$\frac{48}{90}$	$\frac{40}{78}$	$\frac{77}{105}$	$\frac{85}{120}$	$\frac{87}{130}$
Дети:									
Уровень А, 100 мГр за первые 10 сут. для щитовидной железы	$\frac{255}{278}$	$\frac{277}{275}$	$\frac{198}{270}$	$\frac{277}{260}$	$\frac{287}{300}$	$\frac{297}{300}$	$\frac{243}{257}$	$\frac{280}{290}$	$\frac{290}{300}$
Уровень Б, 1000 мГр за первые 10 сут. для щитовидной железы	$\frac{91}{141}$	$\frac{80}{124}$	$\frac{54}{101}$	$\frac{157}{178}$	$\frac{179}{178}$	$\frac{190}{232}$	$\frac{161}{187}$	$\frac{184}{218}$	$\frac{192}{265}$

Примечание. В числителе приведены значения для РБМК–1000, а в знаменателе – для ВЭР–1000.

3.6. Прогнозирование и оценка обстановки при гидродинамических авариях

3.6.1. Общая характеристика гидродинамически опасных объектов и гидродинамических аварий

Гидродинамически опасный объект (ГОО) – сооружение или естественное образование, создающее разницу уровней воды до и после него. К ГОО относятся гидротехнические сооружения напорного фронта и естественные плотины.

В настоящее время в России значительное количество водохранилищ за 40–50 и более лет эксплуатации имеют значительный износ, а их оборудование физически и морально устарело. Особую тревогу среди них вызывают 1400 аварийных водохозяйственных объектов, основная часть которых построена хозяйственным способом, без составления необходимой проектно-сметной документации и с неудовлетворительным качеством производства работ. Эти объекты предназначались в основном для нужд сельхозпредприятий, которые в настоящее время акционированы, раздроблены и не могут обеспечить поддержание ГОО в технически исправном состоянии. Для таких сооружений сроки эксплуатации 30 и более лет являются критическими по условиям обеспечения безопасности. По данным мировой статистики, именно при эксплуатации объектов более 30–40 лет возрастает вероятность аварий гидротехнических сооружений. Положение усугубляется еще тем, что в последнее время идет активная незаконная застройка периодически затопляемых территорий гидроузлов, чем создается предпосылка к созданию чрезвычайных ситуаций в этих зонах, особенно в паводковый период или при возникновении гидродинамической аварии.

Гидродинамическая авария – авария на гидротехническом сооружении (ГТС), связанная с распространением с большой скоростью воды и создающая угрозу возникновения техногенной чрезвычайной ситуации.

Авария на ГТС может произойти из-за воздействия сил природы (землетрясения, ураганы, обвалы, оползни и т.д.), конструктивных дефектов, нарушения правил эксплуатации, воздействия паводков, разрушения основания, недостаточности выбросов и т.д., а в военное время – как результат воздействия по ним средств поражения.

При прорыве плотины в ней образуется проран, от размеров которого зависят объем и скорость падения вод верхнего бьефа в нижний бьеф ГОО и параметры волны прорыва.

Катастрофическое затопление, являющееся следствием гидродинамической аварии, заключается в стремительном затоплении местности волной прорыва. Масштабы последствий гидродинамических аварий зависят от параметров и технического состояния гидроузла, характера и степени разрушения плотины, объемов запасов воды в водохранилище, характеристик волны прорыва и катастрофического наводнения, рельефа местности, сезона и времени суток происшествия и многих других факторов.

3.6.2. Поражающие факторы гидродинамической аварии

Основными поражающими факторами катастрофического затопления являются: волна прорыва, характеризующая высотой волны и скоростью движения, и длительность затопления.

Волна прорыва – волна, образующаяся во фронте устремляющегося в пролом потока воды, имеющая, как правило, значительную высоту гребня и скорость движения и обладающая большой разрушительной силой. Она образуется при одновременном наложении двух процессов: падения воды из верхнего в нижний бьеф, порождающего волну, и резкого увеличения объема воды в месте падения, что вызывает переток воды из этого места в другое, где уровень воды ниже.

Волна прорыва, с гидравлической точки зрения, является волной перемещения, которая в отличие от ветровых волн, возникающих на поверхности больших водоемов, обладает способностью переносить в направлении своего движения значительные массы воды. Поэтому волну прорыва следует рассматривать как определенную массу воды, движущуюся вниз по реке и непрерывно изменяющую свою форму, размеры и скорость.

Разрушительное действие волны прорыва является результатом:

- резкого изменения уровня воды в нижнем и верхнем бьефах при разрушении напорного фронта;
- непосредственного воздействия массы воды, перемещающейся с большой скоростью;
- изменение прочностных характеристик грунта в основании сооружений вследствие фильтрации и насыщения его водой;
- размыва и перемещения больших масс грунта;
- перемещения с большими скоростями обломков разрушенных зданий и сооружений и их таранного воздействия.

Воздействие волны прорыва на объекты подобно воздействию ударной волны воздушного ядерного взрыва, но отличается от него в первую очередь тем, что действующим телом является вода.

Схематично продольный разрез такой сформировавшейся волны показан на рис. 3.8.

Начало волны называется фронтом волны, который, перемещаясь с большой скоростью, выдвигается вперед. Фронт волны может быть очень крутым при перемещении больших волн на участках, близких к разрушенному гидроузлу, и относительно пологим – на больших расстояниях от гидроузла.

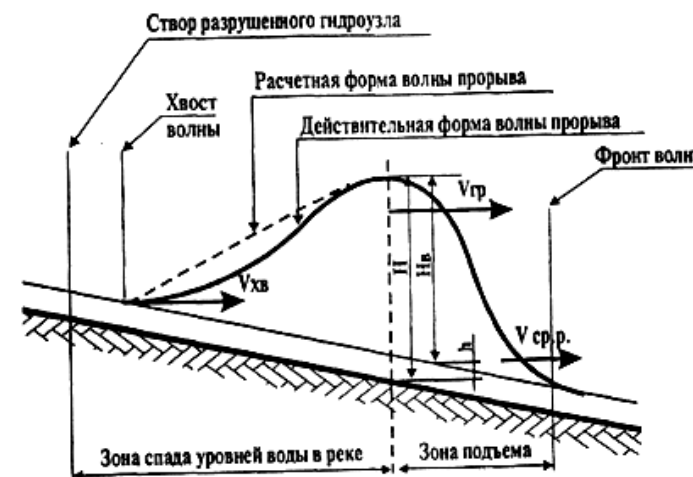


Рис. 3.8. Схематичный продольный разрез волны прорыва

Зона наибольшей высоты волны называется гребнем волны, который движется, как правило, медленнее, чем ее фронт. Еще медленнее движется конец волны – хвост волны. Вследствие различия скоростей этих трех характерных точек волна постепенно растягивается по длине реки, соответственно уменьшая свою высоту и увеличивая длительность прохождения. При этом в зависимости от высоты волны и уклонов реки на различных участках, а также неодинаковой формы и шероховатости русла и поймы может наблюдаться некоторое временное ускорение движения гребня, с «перекашиванием» волны, т.е. с относительным укорочением зоны подъема по сравнению с зоной спада.

Прорыв плотин приводит к затоплению местности. Зона затопления образуется следующим образом. Волна прорыва в своем движении вдоль русла реки непрерывно изменяет высоту, скорость движения, ширину и другие параметры. Эта волна имеет зоны подъема уровней воды и зоны их спада, которые называются фронтом волны прорыва. Фронт волны прорыва может быть очень крутым при перемещении больших волн на участках, близких к разрушенному ГОУ, и относительно пологим на значительном удалении от него.

Вслед за фронтом волны прорыва высота ее начинает интенсивно увеличиваться, достигая через некоторое время максимума,

превышающего бровки берегов реки, в результате чего начинается затопление пойм. При этом образуются косые течения, которые формируют так называемый головной клин, имеющий в плане форму криволинейного треугольника.

После прекращения подъема уровней по всей ширине потока наступит более или менее длительный период движения, близкий к установившемуся. Этот период будет тем длительнее, чем больше объем водохранилища. Последний фазой образования зоны затопления является спад уровней. После прохождения волны прорыва остается переувлажненная пойма и сильнодеформированное русло реки, так как скорость воды в волне может превышать расчетные неразмывающие скорости для грунтов, слагающих дно реки и поймы.

3.6.3. Определение параметров волны прорыва

Главные параметры волны прорыва (глубина, ширина, скорость движения) в каждом створе изменяются не только по длине и высоте, но и по ширине потока, т.е. поток является пространственным и очень сложным по форме.

Так как волна прорыва является основным поражающим фактором при разрушении гидротехнического сооружения, то для определения показателей обстановки в зоне катастрофического затопления необходимо определить ее параметры.

Основными параметрами волны прорыва являются ее высота H_b , м; средняя скорость движения V , км/ч; время добегания волны прорыва до расчетных створов реки t , ч; продолжительность прохождения волны через эти створы T , ч.

Исходными данными для расчета этих параметров являются:

- глубина водохранилища перед плотиной, H , м;
- ширина водохранилища перед плотиной B , м;
- площадь зеркала водохранилища S , м²;
- глубина реки ниже плотины h , м;
- скорость течения реки V_p , м/с;
- гидравлический уклон дна реки i (перепад в метрах высоты уровня дна реки на 1000 м ее длины);
- ширина прорана – бреши в теле плотины B_i , м, также относительная его ширина \tilde{B}_i .

По размера водохранилища можно рассчитать его объем:

$$W = \frac{HS}{3}, \text{ м}^3, \quad (3.80)$$

а также время полного опорожнения водохранилища в результате разрушения плотины

$$T_{\text{оп}} = \frac{WA}{3600\mu B_i H \sqrt{H}}, \text{ ч}, \quad (3.81)$$

где $A \approx 2$ коэффициент кривизны формы водохранилища, μ – параметр, характеризующий форму русла реки (при параболической форме русла и поймы реки $\mu = 0,6$).

При моделировании образования и движения волны прорыва принимаются следующие основные предположения:

- разрушение плотины гидроузла происходит мгновенно;
- при частичном разрушении плотины считается, что образуется один проран, который находится в самом глубоком месте и доходит до дна водохранилища;
- форма и размеры прорана со временем не меняются;
- река по ее длине считается состоящей из участков с однородными, т.е. не изменяющимися на протяжении данного участка ширинами, глубинами, уклонами и средними скоростями движения волны прорыва (табл. 3.36).

Таблица 3.36

Средняя скорость движения волны прорыва, км/ч

Характеристика русла и поймы	$i = 0,01$	$i = 0,001$	$i = 0,0001$
На реках с широкими затопленными поймами	4–8	1–3	0,5–1
На извилистых реках с заросшими или неровными каменистыми поймами, с расширениями и сужениями поймы	8–14	3–8	1–2
На реках с хорошо разработанным руслом, с узкими и средними поймами без больших сопротивлений	14–20	8–12	2–5
На слабоизвилистых реках с крутыми берегами и узкими поймами	24–28	12–16	5–10

Расчет параметров волны прорыва ведется в следующем порядке:

1. Определение высоты волны прорыва в створе разрушений плотины (первый створ):

$$H_{B1} = 0,6H - h. \quad (3.82)$$

2. Определение времени прохождения волны прорыва через створ разрушенной плотины равного времени полного опорожнения водохранилища (формула):

$$T_1 = T_{\text{он}}. \quad (3.83)$$

3. Определение характеристик движения волны прорыва на первом участке:

а) по табл. (3.36) находим среднюю скорость волны на первом участке V_1 ;

б) определяем время добегаания волны прорыва до второго створа:

$$t_1 = \frac{L_1}{V_1}, \quad (3.84)$$

где L_1 – длина первого участка реки;

в) находим отношение времени добегаания волны прорыва до второго створа ко времени прохождения волны через первый створ t_1/T_1 и по его величине с помощью табл. 3.37 находим значения отношений H_{B2}/H_{B1} и T_2/T_1 .

Таблица 3.37

Значения отношений высоты волны прорыва и продолжительность ее прохождения через створы

t_1/T_1	H_{B2}/H_{B1}	T_2/T_1
0,00	1	1
0,1	0,9	1,1
0,25	0,8	1,3
0,4	0,7	1,5
0,55	0,6	1,6
0,7	0,5	1,7
0,95	0,4	1,9
1,25	0,3	2,2
1,5	0,3	2,6
≥ 2	0,3	3

Если значение соотношения t_1/T_1 попадает в интервал между двумя соседними табличными значениями, то для определения величины других отношений следует воспользоваться методом линейной

интерполяции. Введем обозначения: $t_1/T_1 = x$, $H_{B2}/H_{B1} = y$, $T_2/T_1 = z$. Пусть $x_1 < x < x_2$. Тогда

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1); \quad z = z_1 + \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1}(x - x_1). \quad (3.85)$$

Высота волны прорыва во втором створе и время прохождения волны через второй створ определяются по формулам:

$$H_{B2} = H \cdot y, \quad T_2 = T_1 \cdot z. \quad (3.86)$$

4. Расчет движения волны прорыва на следующих участках имеет некоторые особенности. Рассмотрим участок с порядковым номером n . Время добегаания волны до $n + 1$ створа определяется по формуле:

$$t_n = \frac{L_n}{V_n}, \quad (3.87)$$

где L_n – заданная длина n -го участка реки, V_n – средняя скорость движения волны на n -м участке, определяемая по табл. (3.36). Далее вычисляется отношение $t_n/(T_n + t_1 + t_2 + \dots + t_{n-1})$, которое подставляется в первый столбец табл. (3.37) вместо t_1/T_1 . Во втором столбце таблицы находим значение отношения $H_{B(n+1)}/H_{Bn}$, в третьем – значение T_{n+1}/T_n , где H_{Bn} и T_n – высота волны прорыва в n -м створе и времени прохождения его, а $H_{B(n+1)}$ и T_{n+1} – те же параметры волны в следующем $(n + 1)$ -м створе.

По результатам расчета строится график прохождения волны прорыва. На горизонтальной оси откладывается расстояние от створа разрушенной плотины (первый створ). Вертикальных осей три. Слева – оси уровня местности H_M , м и высоты волны прорыва H_B , м. Справа – ось времени t , ч.

График прохождения волны включает в себя следующие линии:

– линия движения гребня волны – прямая, соединяющая точки (0;

$$0) \text{ и } \left(\sum_{i=1}^n L_i; \sum_{i=1}^n t_i \right);$$

– линия движения фронта волны – прямая, выходящая из точки (0; 0) и лежащая ниже линии движения гребня (время добегаания фронта волны примерно на 20 % меньше времени добегаания гребня);

- линия движения хвоста волны – прямая, которая начинается в точке $(0; T_{0n})$ и заканчивается в точке $\left(\sum_{i=1}^n L_i; \sum_{i=1}^n t_i + T_{n+1}\right)$;
 - линия изменения высоты волны прорыва.
- Пример графика движения волны прорыва показан на рис. 3.9.

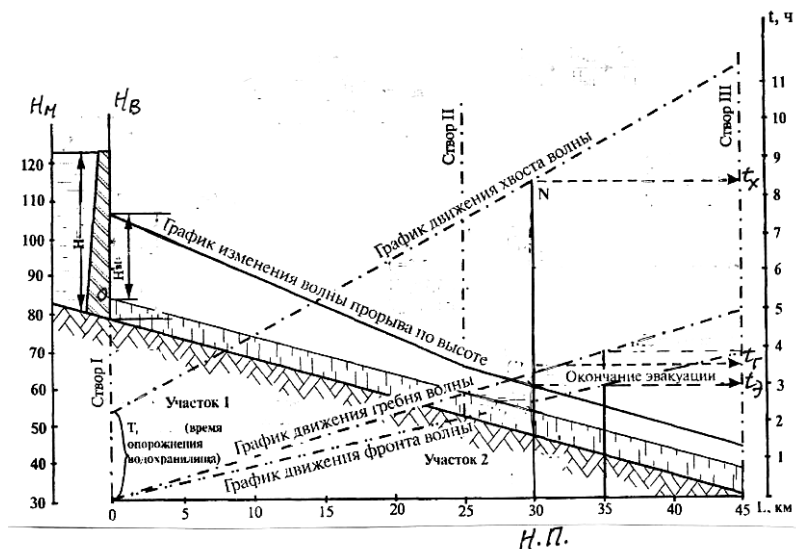


Рис. 3.9. График движения волны прорыва

3.6.4. Оценка разрушений в зонах затопления

С помощью графика движения волны прорыва выполняется оценка возможных последствий затопления и определяются исходные данные для планирования мероприятий по защите населения. В частности, определяется время $t_э$, в течение которого возможна эвакуация, находится продолжительность и площадь затопления, а также параметры волны прорыва в любом заданном створе.

Степень разрушения зданий и сооружений под воздействием гидротока волны прорыва определяется величиной удельной волновой нагрузки. Здания и сооружения подвергаются – в

зависимости от величины удельной волновой нагрузки – слабому, среднему, сильному и полному разрушению.

Зная высоту волны и скорость движения гребня волны, степень разрушения может быть определена по табл. 2.15 и 2.16.

Вопросы для самопроверки

1. Основные упрощающие допущения, принимаемые при моделировании ЧС техногенного характера.
2. Приведите основные положения моделирования взрыва конденсированных взрывчатых веществ.
3. Изложите основные положения взрыва парогазовоздушного облака в открытом и ограниченном пространствах. Чем отличаются эти модели?
4. Приведите методы оценки и прогнозирования обстановки при взрывах.
5. Приведите основные виды пожаров и методы оценки их поражающего воздействия.
6. Как определяются зоны термического и токсического поражения при пожарах?
7. Приведите классификацию химически опасных объектов.
8. Основные положения расчета зоны химического заражения.
9. Как выполняется прогнозирование и расчет потерь среди персонала и населения в случае химической аварии?
10. Приведите классификацию радиационно опасных объектов и радиационных аварий.
11. В чем проявляется биологическое действие ионизирующего излучения и в каких единицах оно измеряется?
12. Методы расчета зон радиоактивного заражения и мероприятий по защите населения.
13. Общая характеристика гидродинамических аварий и их поражающих факторов.
14. Методы расчета параметров волны прорыва.
15. Как строится и используется график движения волны прорыва?
16. Методы оценки и прогнозирования обстановки в зоне гидродинамического затопления.

Глава 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОБЪЕКТОВ С МАССОВЫМ ПРЕБЫВАНИЕМ ЛЮДЕЙ ОТ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

4.1. Моделирование защищенности объектов от террористических нападений

Наиболее общим показателем защищенности объектов от террористических действий является вероятность недопущения террористического акта $P_{\text{нта}}$. Недопущение теракта можно представить в виде совмещения двух случайных событий: своевременного обнаружения нарушителей и прибытия сил охраны к месту вторжения и успеха сил охраны в столкновении с нарушителями. В соответствии с этим:

$$P_{\text{нта}} = P_o \cdot P_c, \quad (4.1)$$

где P_o – вероятность своевременного реагирования на попытку осуществления теракта, а P_c – вероятность успеха сил охраны в пресечении теракта.

Для определения вероятностей P_o и P_c важное значение имеет правильный выбор наиболее вероятного места и способа осуществления теракта, а также построение достаточно адекватной модели нарушителя, т.е. параметров, характеризующих численность, вооруженность и подготовленность террористов. В настоящее время наиболее простым и надежным методом определения количественных характеристик вероятного террористического нападения является метод парных сравнений, осуществляемых группой экспертов.

Предположим, что экспертам необходимо количественно ранжировать n предположений относительно возможного террористического проявления. Экспертам предлагаются все возможные пары утверждений (всего таких пар будет $n(n-1)/2$), относительно которых они должны определить, какое из двух предположений более вероятно.

Результаты парных сравнений всех предположений k -м экспертом можно представить в виде матрицы $D^k = \{\delta_{ij}^k\}$, элементы которой определяются следующим образом:

$$\delta_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если } a_i > a_j; \\ 0, & \text{если } a_i < a_j. \end{cases} \quad (4.2)$$

Здесь выражение $a_i > a_j$ означает, что предположение a_i представляется более вероятным, чем предположение a_j .

Восприятие многомерных объектов, какими являются модели нарушителей, субъективно и неоднозначно, поэтому можно считать, что в процессе сравнений будет выполняться условие транзитивности согласно которому из условий $a_i > a_j$ и $a_j > a_k$ следует условие $a_i > a_k$. Очевидно, что если $\delta_{ij} = 1$, то $\delta_{ji} = 0$, т.е. исходная матрица парных сравнений несимметрична.

Задачей метода парных сравнений является приписывание предположениям чисел v_1, v_2, \dots, v_n , которые выражают усредненное мнение экспертов о них. Исходные данные метода представляют собой совокупность полученных от экспертов матриц парных сравнений D^1, D^2, \dots, D^r , где r – число экспертов. Оценками v_1, v_2, \dots, v_n являются математические ожидания некоторых гипотетически существующих распределенных по определенному закону случайных величин $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$, отвечающих сравниваемым допущениям.

Считая выборку экспертов однородной, можно найти относительную частоту предпочтений i -го предположения j -му, т.е. относительную частоту выполнения условия $a_i > a_j$:

$$P(a_i > a_j) = p_{ij} = \frac{\left(\sum_{k=1}^r \delta_{ij}^k \right)}{r}. \quad (4.3)$$

Элементы матрицы $\{p_{ij}\}$ обладают следующими свойствами: $0 < p_{ij} < 1$, $p_{ij} + p_{ji} = 1$. Закон сравнительного суждения Терстоуна утверждает: чем чаще объект a_i предпочитается объекту a_j , тем дальше отстоят друг от друга шкальные значения этих объектов. Отсюда следует:

$$P(\xi_1 > \xi_2) = p_{ij} \text{ или } P(\xi_j > 0) = p_{ij}, \quad (4.4)$$

где $\xi_{ij} = \xi_i - \xi_j$. Если величины ξ_i и ξ_j распределены по нормальному закону с параметрами m_i , σ_i и m_j , σ_j то величина ξ_{ij} также распределена по нормальному закону с параметрами:

$$m_{ij} = m_i - m_j, \sigma_{ij} = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2 - 2r_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j}, \quad (4.5)$$

где r_{ij} – коэффициенты корреляции между ξ_i и ξ_j . Из формулы вероятности попадания нормальной случайной величины в заданный интервал получим:

$$P(0 < \xi_{ij} < \infty) = 1/2 + \Phi(z_{ij}) = p_{ij}, \quad (4.6)$$

где

$$z_{ij} = m_{ij} / \sigma_{ij}, \quad (4.7)$$

$\Phi(z_{ij})$ – функция Лапласа, значения которой можно найти по специальным таблицам.

Числа z_{ij} , найденные путем численного решения уравнения

$$\Phi(z_{ij}) = p_{ij} - 0,5, \quad (4.8)$$

образуют антисимметричную матрицу $\{z_{ij}\}$, для которой $z_{ij} = -z_{ji}$. Предположим, что мнения каждого эксперта о различных предположениях не зависят друг от друга, а мера уверенности в своем выборе у различных экспертов примерно одинакова. Тогда $r_{ij} = 0$, $\sigma_i = \sigma_j = \sigma$, а $\sigma_{ij} = \sqrt{2} \cdot \sigma$. В этом случае формула (4.7) принимает вид:

$$m_i - m_j = z_{ij} \sqrt{2} \sigma. \quad (4.9)$$

Числа m_i и m_j можно рассматривать в качестве шкальных значений опасностей a_i и a_j . Принимая за единицу искомой шкалы число $\sqrt{2} \sigma$, перепишем соотношение (4.9) в виде

$$m_i - m_j = z_{ij}. \quad (4.10)$$

Соотношение (4.10) определяет систему $n \cdot (n-1)/2$ линейных уравнений для n неизвестных m_1, m_2, \dots, m_n .

Поскольку число неизвестных меньше числа уравнений, то эта система переопределена и должна решаться методом наименьших квадратов.

Согласно этому методу приближенное решение системы должно минимизировать сумму квадратов невязок, которые получаются при подстановке этого решения во все уравнения:

$$S = \sum_{ij} (m_i - m_j - z_{ij})^2 \rightarrow \min.$$

Отметим, что найденные в результате решения системы (4.10) числа m_j не имеют содержательного смысла. Имеют смысл лишь их относительные величины, позволяющие ранжировать рассматриваемые предположения по величине их вероятностей.

Основным фактором, который принимается экспертами во внимание при определении P_0 , является обеспеченность объекта инженерно-техническими средствами охраны (ИТСО). В зависимости от существующего уровня террористических угроз, экономических, временных и иных ограничений экспертно должна быть определена требуемая (рекомендуемая) обеспеченность объекта ИТСО. В качестве количественного показателя обеспеченности объекта ИТСО можно взять отношение количества фактически размещенных средств к их требуемому количеству. Однако различные технические средства вносят различный вклад в обеспечение своевременного прибытия сил охраны к критическому элементу объекта (месту вторжения). Нормированная на единицу значимость средств k -го типа β_k может быть оценена через их стоимость (цену) C_k (считаем, что в условиях рыночной экономики и конкуренции эффективность средства охраны пропорциональна его стоимости):

$$\beta_k = \frac{C_k}{\sum_{k=1}^n C_k}, \quad (4.11)$$

где n – количество типов средств охраны. Обеспеченность объекта средствами охраны с учетом их значимости β_k определяется выражением:

$$\alpha = \frac{\sum_{k=1}^n \beta_k N_k}{\sum_{k=1}^n \beta_k N_{kt}}. \quad (4.12)$$

Здесь N_k – количество установленных средств охраны k -го типа; N_{kt} – требуемое их количество.

В случаях, когда соотношение (4.11) неприменимо, коэффициенты β_k могут быть определены экспертно. Для этого каждый эксперт из их группы численностью N_3 оценивает значимость каждого типа средств охраны числом $e \in (0;1)$. Усредненная оценка получается по формуле:

$$e_k = \frac{\sum_{j=1}^{N_3} e_j}{N_3}. \quad (4.13)$$

Нормирование полученных оценок на единицу выполняется так:

$$\beta_k = \frac{e_k}{\sum_{i=1}^n e_i}. \quad (4.14)$$

Вероятность обнаружения нарушителей и своевременного прибытия сил охраны к месту вторжения P_o зависит от α , но вид этой зависимости не может быть определен однозначно. В качестве зависимости $P_o(\alpha)$ может быть выбрана любая монотонно возрастающая функция, удовлетворяющая следующим условиям:

1. $P_o|_{\alpha=0} = P_{o0}$,
2. $P_o|_{\alpha=1} = P_{o1}$,
3. $\lim_{\alpha \rightarrow \infty} P_o(\alpha) = 1$,

$$\alpha \rightarrow \infty. \quad (4.15)$$

Здесь P_{o0} – начальное значение показателя защищенности объекта при отсутствии ИТСО. Величина P_{o0} определяется исходной

(начальной) инженерно-технической укрепленностью объекта; P_{o1} – нормативное значение показателя защищенности, соответствующее требуемой обеспеченности объекта ИТСО.

Значения показателей начальной (без ИТСО) и нормативной (при требуемом оснащении учреждения средствами охраны) защищенности объекта определяются теоретико-вероятностным методом или экспертно с учетом показателей аналогичных объектов или результатов учений.

Одна из простейших функций, удовлетворяющая перечисленным выше требованиям, имеет вид:

$$P_o(\alpha) = 1 - A \exp(-B\alpha), \quad (4.16)$$

где

$$A = 1 - P_{o0}, \quad B = \ln \frac{1 - P_{o0}}{1 - P_{o1}}. \quad (4.17)$$

После подстановки формул (4.17) в зависимость (4.16), приведем ее к виду:

$$P_o(\alpha) = 1 - (1 - P_{o0}) \left(\frac{1 - P_{o1}}{1 - P_{o0}} \right)^\alpha, \quad (4.18)$$

здесь $\left(\frac{1 - P_{o1}}{1 - P_{o0}} \right)^\alpha < 1$, поэтому $P_o(\alpha) \rightarrow \infty$.

Вторая составляющая вероятности недопущения теракта (4.1) – вероятность успеха отражения нападения террористов P_c полностью определяется соотношением сил охраны и террористов.

Вероятность положительного исхода столкновения охраны с нарушителями определяется в соответствии с уравнением Ланчестера:

$$P_c = 1 - (1 - P_m)^{k^2}, \quad (4.19)$$

где k – коэффициент, описывающий соотношение сил охраны и террористов; $P_m = 0,5$ – вероятность успеха сил охраны при равных возможностях ($k = 1$) с террористами.

Коэффициент соотношения сил охраны и террористов должен учитывать соотношение их численности, вооруженности и подготовленности:

$$k = \frac{k_1}{k_2 k_3}, \quad (4.20)$$

где k_1 – количество охранников, приходящихся на одного террориста; k_2 , k_3 – коэффициенты, показывающие во сколько раз усредненные боевые возможности террориста превосходят усредненные боевые возможности охранника по вооруженности и подготовленности или скольким охранникам эквивалентен один террорист по этим показателям.

При невозможности получения количественной оценки террористической уязвимости учреждения по приведенной выше схеме, группой экспертов методом парных сравнений выполняется ее качественно-количественный анализ.

Результаты моделирования антитеррористической защищенности объектов необходимо учитывать при планировании мероприятий по ее повышению.

4.2. Математическое моделирование пожарной безопасности объектов

Одним из условий обеспечения пожарной безопасности объектов является проведение специальных исследований, разработка математических моделей и алгоритмов, программ расчетов и внедрения систем экспертной оценки пожарной опасности объектов народного хозяйства, определение вероятности возникновения, развития пожаров, эффективности средств их тушения.

Пожарная опасность любого здания объекта заключается в возможности возникновения и развития пожара в результате образования и воспламенения пожаровзрывоопасных материалов в его помещениях, хранилищах и технологическом оборудовании и обуславливается свойствами и количеством имеющихся горючих веществ. При возникновении пожара возникает угроза здоровью и жизни персонала, связанная с воздействием опасных факторов пожара (ОФП). Предельные величины опасных факторов пожара приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Предельные величины опасных факторов пожара (ОФП)

№ п/п	ОФП	Предельная величина
1	Обрушение конструкции	Недопустимо
2	Температура, С°	70
3	Тепловое излучение, Вт/м ²	500
4	Содержание СО в воздухе, об. %	0,1
5	Содержание СО ₂ в воздухе, об. %	6,0
6	Содержание кислорода, об. %	Не менее 17,0
7	Потеря видимости на пожаре, раз.	2,4

Для обеспечения пожарной безопасности людей необходимо осуществление комплекса защитных территорий. В качестве основного критерия оценки эффективности мероприятий по снижению степени риска поражения людей может служить показатель эффективности, определяющий стоимость реализации мероприятия по снижению риска поражения людей, отнесенная к одному человеку, поражение которого предотвращено (к одному спасенному) за счет проведения данного мероприятия.

Пожары имеют различную природу происхождения, механизм и специфику воздействия на человека и оборудование. В связи с этим необходимо проведение идентификации характерных (специфических) опасностей на рассматриваемом объекте, прежде всего по физическому принципу. На сегодня для этих целей разработан целый ряд специальных методик. Среди наиболее широко применяемых за рубежом методов оценки фактического уровня пожарной опасности является метод Гретенера.

Данный метод позволяет:

- оценить потенциальную опасность возникновения пожара;
- оценить реальную пожароопасность помещений;
- определить мероприятия, необходимые для повышения пожарной безопасности объекта;
- определить требования к огнестойкости строительных конструкций;
- определить пригодность помещения для использования по новому назначению;
- определить тарифы по новому страхованию.

Основными показателями пожароопасности здания («объекта») являются численные значения параметров П (пожароопасность) и

У (уровень пожароопасности), которые рассчитываются по следующим уравнениям:

$$П = P \cdot A / 3 = O_n / 3, \quad (4.21)$$

$$У = П / П_d, \quad (4.22)$$

где П – пожароопасность объекта; У – уровень пожароопасности; P – потенциальная опасность, учитывающая влияние всех основных факторов, способствующих возникновению и развитию пожара; А – фактор активации, отражающий вероятность возникновения пожара, связанную с видом использования объекта; $O_n = P \cdot A$ – угроза возникновения пожара; 3 – фактор пожарозащиты, учитывающий влияние имеющихся на объекте пожарозащитных мероприятий; P_d – допустимое значение пожароопасности, величина которого учитывает угрозу для людей.

Если рассчитанное значение П не превышает P_d и, соответственно, $У < 1$, то объект считается достаточно защищенным. В противном случае, т.е. при $У > 1$, объект имеет повышенную пожароопасность.

Потенциальная опасность P рассчитывается как произведение следующих факторов:

$$P = q \cdot C \cdot r \cdot K \cdot i \cdot e \cdot g, \quad (4.23)$$

где q – фактор подвижной пожарной нагрузки; C – фактор горючести; r – фактор дымообразования; K – фактор токсичности; i – фактор неподвижной пожарной нагрузки; e – фактор этажности или высоты помещения; g – фактор размеров и формы площади объекта. Значения факторов рассчитываются или берутся из таблиц.

Пожарозащита 3 рассчитывается как произведение факторов, отражающих наличие имеющихся на объекте защитных мероприятий:

$$3 = N \cdot S \cdot F, \quad (4.24)$$

где N – нормативные мероприятия, рассчитывается как произведение факторов, отражающих выполнение мероприятий, предусмотренных действующими нормативами по пожаровзрывозащите; S – специальные мероприятия, рассчитывается как произведение факторов, отражающих наличие специальных мероприятий по

обнаружению пожара и борьбы с ним; F – строительные защитные мероприятия, рассчитывается как произведение факторов, отражающих огнестойкость строительных конструкций помещения; P_d – допустимое значение пожароопасности, рассчитывается как произведение:

$$P_d = 1,3 \cdot K_d, \quad (4.25)$$

где 1,3 – численное значение «нормальной» пожароопасности; K_d – поправочный коэффициент, учитывающие повышенную угрозу для людей в сооружениях массового посещения (школы, ВУЗы, кинотеатры, гостиницы и т.д.), а также здания с затрудненными условиями эвакуации людей (дома престарелых, больницы, приюты и т.п.).

Согласно данной методике конечные показатели пожарной опасности заносятся в бланк, представленный в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Бланк оценки пожароопасности объекта

Объект:	Адрес:
Тип постройки (одноэтажная, многоэтажная, крупнообъемная) Длина участка $l =$ м, ширина $b =$ м, площадь $lb =$ м ² , $l/b =$ Вид использования: Горючие материалы: $m_1 =$ кг (древесина), $m_2 =$ кг (ДСП), $m_3 =$ кг (линолеум), ...	
Подвижная нагрузка $Q_n = m_1 \cdot Q_{01} + m_2 \cdot Q_{02} \cdot Q_{0n/lb}$ МДж/м ² Горючесть (ВО, ЛВос, ЛВ, ТВ, ТГ, НГ) Дымообразование (высокое, умеренное, малое) Токсичность (малая, умеренная, высокая, чрезвычайная) Неподвижная нагрузка (конструкции негорюч., защищенные, горюч.) Этаж N..., высота ...м (подвальное, одноэтажное, многоэтажное) Форма помещения (площадь $lb =$ м ² , $l/b =$ Активация (небольшая, норм., повышенная, большая, очень большая) Угроза возникновения пожара $O_n = c \cdot r \cdot k \cdot i \cdot g \cdot A$	$q =$ $c =$ $r =$ $k =$ $i =$ $e =$ $g =$ $A =$ $O_n =$
Ручные огнетушители (достаточно, нет или недостаточно) Внутренние гидранты (достаточно, нет или недостаточно) Водоснабжение (резервуар, скважина, водоем; < 0,2; > 0,2 ; > 0,4 МПа) Длина мобильного водопровода (< 70 м, 70-100 м, > 100 м) Прошедшие инструктаж сотрудники (имеются, не имеются) Нормативные мероприятия $N = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4 \cdot n_5$	$n_1 =$ $n_2 =$ $n_3 =$ $n_4 =$ $n_5 =$ $N =$
Обнаружение пожара (охрана, АПС, сигнал с АУП)	$s_1 =$

Окончание табл. 4.2

Объект:	Адрес:
Передача сигнала в пож. службу (по телефону, автоматическая)	$s_2 =$
Пожарные службы (объектовая, пож. часть, опорный пункт)	$s_3 =$
Время прибытия пожарных (< 15 мин, 15-30 мин, > 30 мин)	$s_4 =$
Установки пожаротушения (спринкл., дренч., газов., порошок.)	$s_5 =$
Установки для отвода дыма и тепла (имеются, не имеются)	$s_6 =$
Специальные мероприятия $S = s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot s_4 \cdot s_5 \cdot s_6$	$S =$
Предел огнестойкости: несущих конструкций (> 1,5 ч; 1,5-0,5 ч; < 0,5 ч)	$f_1 =$
стен (> 1,5 ч; 1,5-0,5 ч; < 0,5 ч)	$f_2 =$
потолков (> 1,5 ч; 1,5-0,5 ч; < 0,5 ч)	$f_3 =$
относит. Площади проемов ($S_c =$ м ² , $S_{пр} =$ м ² , $S_{пр}/S_c =$ %)	$f_4 =$
Строительные мероприятия $F = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4$	$A =$
ПОЖАРООПАСНОСТЬ ОБЪЕКТА $\Pi = O_n/N \cdot S \cdot F$	$\Pi =$
Угроза для людей ($P_{кат} =$, $N_{этажа} =$, Колич. людей = чел.)	$K_A =$
ДОПУСТИМАЯ ПОЖАРООПАСНОСТЬ $\Pi_d = 1,3 \cdot K_A$	$\Pi_d =$
УРОВЕНЬ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ $У = \Pi/\Pi_d$	$У =$
Заключение:	
Рекомендация:	

Такие бланки должны быть составлены для всех учебных и вспомогательных зданий объекта.

Наряду с расчетом пожароопасности зданий и помещений объекта по методу Гретенера, целесообразно также оценить состояние их пожарной защиты вероятностным методом.

Вероятность возникновения на объекте в течение года пожара можно выразить соотношением:

$$P_{п} = P_{ст} \prod_{j=1}^q (1 - P_{пз})_j, \quad (4.26)$$

где $P_{ст}$ – статистическая оценка вероятности возникновения пожара на аналогичных объектах (например, для образовательных учреждений $P_{ст} \approx 0,01$); q – количество независимых рубежей пожарной защиты; $P_{пз}$ – условная вероятность пожарной защиты объекта, определяемая соотношением:

$$P_{пз} = 1 - P_{рп} (1 - P_{бор} \cdot P_{об} \cdot P_{пт}) (1 - P_{отм}), \quad (4.27)$$

$P_{рп}$ – вероятность развития пожара на объекте, определяемая по формуле:

$$P_{рп} = 1 - \exp(-t_{пт} / T_{рп}), \quad (4.28)$$

$T_{пт}$ – время запаздывания включения средств пожаротушения (время, необходимое для обнаружения пожара, передачи информации о пожаре, прибытия к месту пожара и развёртывания пожарных служб), которое определяется расчётным путём по формуле (4.30) при заданной вероятности $P_{пт}$ своевременного включения средств пожаротушения;

$T_{рп}$ – среднее время развития пожара, определяется на основе статистических данных (для образовательных учреждений $T_{рп} = 15-60$ мин);

$P_{бор}$ – вероятность безотказной работы средств обнаружения пожара, передачи информации и пожаротушения

$$P_{бор} = 1 - \exp(-t_{но} / T_{кр}), \quad (4.29)$$

$t_{но}$ – среднее время наработки на отказ системы обнаружения, передачи информации и тушения пожара ($t_{но} = 1-30$ тыс. ч);

$T_{кр}$ – период контроля работоспособности системы обнаружения, передачи информации и тушения пожара ($T_{кр} = 100-5000$ ч);

$P_{об}$ – вероятность безотказной работы оборудования и средств пожаротушения, которая может быть оценена по формуле (4.29);

$P_{пт}$ – вероятность своевременного включения средств пожаротушения

$$P_{пт} = 1 - \exp(-t_{пт} / T_{ср}), \quad (4.30)$$

$T_{ср}$ – среднее время включения средств пожаротушения с учётом инерционности средств обнаружения и передачи информации (ручной огнетушитель $T_{ср} = 1-2$ мин; АУП: $T_{ср} = 2-3$ мин, пожарная команда: $T_{ср} = 5-30$ мин);

$P_{отм}$ – вероятность получения ожидаемого эффекта от организационно-технических мероприятий по предотвращению возникновения и развития пожара в случае его возникновения

$$P_{отм} = 1 - \exp(-5M^5 / 1 + M^5), \quad (4.31)$$

M – относительная доля фактически выполненных мероприятий на объекте

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{\sum_{i=1}^m M_i}, \quad (4.32)$$

m и n – общее количество необходимых и количество фактически выполненных мероприятий на объекте;

M_i – экспертная балльная оценка степени результативности i -го мероприятия.

Формула (4.31) аппроксимирует опытные данные по результативности профилактических мероприятий. Согласно ей даже при выполнении всех основных организационно-технических мероприятий ($M = 1$) вероятность предотвращения пожара в среднем не превышает 0,92 из-за непредвиденных обстоятельств и человеческого фактора.

4.3. Моделирование факторов экологического риска

Неблагоприятные экологические ситуации для объектов с массовым пребыванием людей могут возникать не только в результате кратковременного воздействия сильнодействующих факторов, но и в следствии длительного воздействия сравнительно малоинтенсивных факторов. Кратковременное резкое повышение концентрации вредных веществ в воздухе и сопредельных средах может возникнуть в результате изменения режима работы предприятий, из-за неблагоприятных метеорологических условий или же в результате аварийных выбросов вредных и опасных производств. Риск возникновения чрезвычайных экологических ситуаций характеризуется данными, приведенными в табл. 4.3.

Постоянно действующими малоинтенсивными факторами, негативно влияющими на здоровье персонала объектов, является химическое загрязнение окружающей среды (воздуха, пищевых продуктов, почвы, питьевой воды, воды водных объектов), а также радиационный фон помещений.

Вредные химические соединения, загрязняющие внешнюю среду в результате выбросов автомобильного транспорта и промышленности, создают значительную химическую нагрузку на организм человека и

существенно повышают риск его заболеваний. Анализ данных об уровнях химического загрязнения производственной среды и среды обитания показывает, что приоритетными загрязнителями атмосферного воздуха являются диоксид азота, оксид углерода, взвешенные вещества (пыль), формальдегид, аммиак, фенол, сероводород и т.д. Основными загрязнителями питьевой воды являются свинец, ДДТ, хлороформ, мышьяк, кадмий, хром, бор и др.

Таблица 4.3

Характеристика потенциальной экологической опасности по федеральным округам РФ

Федеральный округ	Численность населения, тыс. чел.	Колич. радиационно-опасных объектов	Колич. химически-опасных объектов	Возможные потери населения при возникновении ЧС, тыс. чел.
Центральный	36241	18	371	700
Северо-Западный	14147	5	143	350
Приволжский	31440	10	174	400
Южный	21401	4	230	230
Уральский	12469	6	192	350
Сибирский	20411	3	128	200
Дальневосточный	6988	5	95	200

Основную часть времени работники учреждений проводят в помещениях, в которых они получают от 80 до 90 % общей химической нагрузки. В связи с этим величина индивидуального канцерогенного риска достигает уровня 10^{-3} – $5 \cdot 10^{-3}$. В табл. 4.4 приведены данные, характеризующие опасность факторов внешней среды.

Основным источником загрязнения воздушного бассейна городов, а следовательно и воздушной среды помещений учреждений, является автомобильный транспорт, вклад которого в общее загрязнение воздуха превышает 70 %.

Выбросы автотранспорта содержат более 20 вредных компонентов, среди которых акролеин, формальдегид, оксиды углерода, азота и серы, сажа, свинец, кадмий и канцерогенная группа углеводородов (бензопирен и бензоантроцен). Автомобильное загрязнение воздушной среды имеет ряд отличительных особенностей. Во-первых, число автомобилей быстро увеличивается, что ведет к непрерывному росту

валового выброса вредных веществ. Во-вторых, в отличие от промышленных источников загрязнения автомобиль является движущимся источником вредных выбросов, широко распространенным в жилых кварталах. В-третьих, сложная аэродинамическая обстановка в районах городской застройки и случайный характер потоков автотранспорта затрудняют расчет необходимого для прогнозирования риска заболеваний персонала пространственного и временного распределения концентрации вредных веществ вблизи объектов.

Таблица 4.4

Оценка риска влияния опасных факторов среды обитания

Ранг опасности	Фактор	Причина смерти или заболевания	Число случаев в год по РФ
Смертность			
1	ДТП	Несчастные случаи	30000
2	Загрязнение воздуха	Болезни органов дыхания и сердечно-сосудистые заболевания	22000
3	Радон	Рак легких	4000
Заболеваемость			
1	ДТП	Травмы	250000
2	Загрязнение воздуха	Болезни органов дыхания и сердечно-сосудистые заболевания	370000
6	Радон	Рак легких	9000

Положение усугубляется и тем, что выделение вредных примесей и прежде всего свинца автотранспортом производится непосредственное над поверхностью земли, практически в зоне дыхания человека. В результате этого содержание свинца в крови и тканях организма значительно возрастает (до 10 раз).

В связи с этим, одной из наиболее серьезных экологически зависимых болезней персонала объектов является отравление свинцом, обусловленное главным образом неконтролируемым применением этилированного автомобильного топлива.

Благодаря прекращению в большинстве развитых стран производства и использования этилированного бензина, вклад автотранспорта как источника загрязнения окружающей среды свинцом значительно снизился.

Однако, до настоящего времени в России существует проблема неконтролируемого производства и использования в качестве топлива для автотранспорта этилированного бензина, содержащего тетраэтилсвинец. Отсюда следует настоятельная необходимость перепланировки автомобильного движения и строительства объездных дорог для снижения вредной химической нагрузки в районах расположения учреждений с массовым пребыванием людей.

Среди опасных факторов среды обитания особое место занимает загрязнение воздуха взвешенными частицами, которое имеет место в районах расположения предприятий стройиндустрии, химической, металлургической и горнодобывающей промышленности.

Выявлен значительный рост смертности от респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний в ближайшие 1-2 дня после пиковых подъемов концентрации пыли в атмосферном воздухе.

При этом количество дополнительных смертей в сотни раз больше, чем от воздействия всех вместе взятых канцерогенных веществ, выбрасываемых в воздух. Установлено, что при среднегодовой концентрации пыли на территории РФ, равной 244 мкг/м³, подъем запыленности воздуха на каждые 10 мкг/м³ вызывает средний прирост смертности на 0,7 % от болезней органов дыхания и на 0,2 % от сердечно-сосудистых заболеваний в течение 1-2 дней после аварийного выброса пыли.

Для моделирования и расчета полей концентрации пыли в местах расположения объектов применяется система уравнений аэродинамики, теплопереноса и конвективной диффузии аэрозолей.

Для вычисления риска заболеваний R_3 из-за хронической интоксикации, вызванной химическим загрязнением среды обитания, используется соотношение:

$$R_3 = 1 - \exp \left(-0,174 \left(\frac{C}{C_{\text{ПДК}} K} \right)^\beta t \right), \quad (4.33)$$

где C – концентрация вредного вещества, действующего в течение времени t ; $C_{\text{ПДК}}$ – предельно-допустимая среднесуточная концентрация этого вещества; K, β – эмпирические параметры, значения которых приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Параметры для расчета риска хронической интоксикации

Класс опасности	Характеристика	β	K
1-й класс	Чрезвычайно опасные вещества	2,4	7,5
2-й класс	Высокоопасные вещества	1,31	6,0
3-й класс	Умеренно опасные вещества	1,00	4,5
4-й класс	Малоопасные вещества	0,86	3,0

При выполнении условия $C < C_{\text{пдк}}$ $\beta = 1$ независимо от класса опасности вещества.

Решение задачи снижения риска опасного влияния факторов среды обитания невозможно без улучшения качества внутренней среды помещений учреждений и, в том числе, обеспечения ее радиационной безопасности. Объемная активность радона в недостаточно проветриваемых помещениях подвалов, цокольных и нижних этажей зданий часто превышает предельно допустимую (200 Бк/м³ для существующих помещений и 100 Бк/м³ для проектируемых), что представляет реальную угрозу здоровью находящихся там людей.

Индивидуальный радиационный риск согласно нормам радиационной безопасности [НРБ-99] определяется по формуле:

$$R = P(E) \cdot r_E \cdot E, \quad (4.34)$$

где E – годовая эффективная доза облучения, $r_E = 7,3 \cdot 10^{-2}$ 1/чел · Зв – коэффициент риска для населения, $P(E)$ – вероятность событий, создающих дозу E .

Предельное значение индивидуального риска для населения устанавливается на уровне $5 \cdot 10^{-5}$ за год. Одним из основных источников облучения людей является радон. Мощность дозы облучения от радона зависит от многих факторов, основным из которых является объемная активность радона в воздухе помещения. Согласно последним данным мощность дозы, получаемой органами дыхания, равна примерно 10 нЗв/ч на 1 Бк/м³ объемной активности радона. Умножив эту величину на средние значения объемной активности радона и продолжительность пребывания работников в помещениях, получим приближенное значение индивидуальной дозы, получаемой ими за год.

По результатам обследования помещений объектов могут быть построены эмпирические распределения годовой эффективной дозы.

Статистическая обработка имеющихся данных показывает, что эти распределения достаточно точно соответствуют нормальному закону. В этом случае вероятность накопления годовой эффективной дозы E может быть найдено с помощью соотношений

$$P(E) = \Phi\left(\frac{E + \Delta E}{\bar{E}}\right) - \Phi\left(\frac{E - \Delta E}{\bar{E}}\right), \quad (4.35)$$

где Φ – функция Лапласа; \bar{E} – среднее выборочное значение годовой индивидуальной дозы облучения; ΔE – погрешность ее определения (~20%). Для определения полного радиационного риска, которому подвергаются работники, необходимо учитывать также радонное облучение, получаемое ими в домашних условиях, а также дополнительные дозы, получаемые от техногенных и внешних естественных источников.

4.4. Модель оптимального распределения ресурсов между основными направлениями и мероприятиями обеспечения безопасности объекта

В современных условиях в связи со значительным повышением вероятности реализации угроз террористического, криминального, техногенного, природного и иного характера система обеспечения комплексной безопасности (СОКБ) становится обязательным условием устойчивого функционирования и развития объектов различного назначения.

На предупреждение чрезвычайных ситуаций на объектах и в учреждениях выделяются бюджетные и внебюджетные средства. В связи с ограниченным объемом этих средств возникает необходимость оптимального их распределения между различными направлениями профилактической работы. Математическая модель, позволяющая найти оптимальное распределение ресурсов в условиях неопределенности, может быть построена на основе понятий теории игр.

Возникновение на объекте ЧС является случайным событием, которое может произойти по n различным сценариям. Профилактика наступления ЧС также должна вестись по различным направлениям. Предположим, что число этих направлений или защитных мероприятий равно m .

В зависимости от распределения сил и средств между этими мероприятиями, существуют различные смешанные стратегии деятельности учреждения по обеспечению его безопасности. Главным элементом этой деятельности является оптимальное распределение ограниченных ресурсов между различными системами безопасности с целью достижения минимального уровня риска, какой только возможен в данных условиях.

Основными исходными данными для разработки модели являются:

- перечень источников опасности и сценариев их перерастания в чрезвычайные ситуации террористического, криминального, природного и техногенного характера ЧС_{*j*}, *j* = 1, 2, ..., *n* с указанием величины комплексного показателя риска ПР_{*j*} для каждой ЧС;
- перечень превентивных мер защиты ПМ_{*i*}, *i* = 1, 2, ..., *m* с указанием их эффективности *E_{ij}* в случае возникновения ЧС_{*j*}.

Комплексный показатель риска определяется по формуле

$$\text{ПР}_j = \frac{R_j}{R}, \quad (4.36)$$

где $R_j = W_j Y_j$; $R = \sum_{j=1}^n R_j$; W_j – частота *j*-й ЧС, измеряемая средним

количеством случаев возникновения данной ЧС в течение года; Y_j – прогнозируемый денежный эквивалент ущерба, включая потери работоспособности, здоровья и гибель людей.

Величина комплексного показателя риска изменяется в пределах от 0 до 1.

Эффективность мер защиты E_{ij} представляет собой долю предотвращенного ущерба в результате применения *i*-й меры защиты в *j*-й ЧС.

Социально-экономическая эффективность применения *i*-й защитной меры в *j*-й ЧС может быть выражена показателем a_{ij} :

$$a_{ij} = \text{ПР}_j \cdot E_{ij}, \quad (4.37)$$

Эффективность всего комплекса мер защиты характеризуется матрицей *A*:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}. \quad (4.38)$$

Величины ПР_{*j*} и E_{ij} , необходимые для вычисления a_{ij} , определяются на основе статистических данных, методом анализа рисков, а также путем экспертных оценок.

Потенциальные возможности обеспечения безопасности объекта могут быть отображены с помощью специальной табл. 4.6:

Таблица 4.6

Потенциальные угрозы и превентивные меры защиты

ПМ _{<i>i</i>}	ЧС _{<i>j</i>}			
	ЧС ₁ Взрывы, пожары	ЧС ₂ Обрушения зданий	...	ЧС _{<i>n</i>} Стихийные бедствия
ПМ ₁	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}
ПМ ₂	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}
...
ПМ _{<i>m</i>}	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}

Деятельность по обеспечению защищенности объекта можно представить в виде игры его системы обеспечения комплексной безопасности против неопределенных обстоятельств, приводящих к ЧС. Матрицей этой игры является $A = (a_{ij})$.

Опыт показывает, что требуемая безопасность функционирования объекта может быть достигнута лишь с помощью комплекса различных мероприятий, т.е. путем применения смешанных стратегий. Смешанной стратегией называется применение превентивных мер защиты ПМ₁, ПМ₂, ..., ПМ_{*m*} с частотами, пропорциональными числам p_1, p_2, \dots, p_m , имеющим смысл вероятностей применяемых защитных мероприятий:

$$p_1 + p_2 + \dots + p_m = 1. \quad (4.39)$$

В случае применения смешанной стратегии (p_1, p_2, \dots, p_m) в *j*-й ЧС средний предотвращенный ущерб $\overline{\text{ПУ}}_j$ может быть найден как математическое ожидание:

$$E = \begin{pmatrix} 10 & 0,75 & 0,3 \\ 1 & 4 & 0,1 \\ 2 & 0,25 & 0,16 \end{pmatrix}.$$

Матрица A , характеризующая социально-экономическую эффективность комплексной безопасности, имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} 4,2 & 0,12 & 0,078 \\ 0,42 & 1,28 & 0,026 \\ 0,84 & 0,08 & 0,416 \end{pmatrix}.$$

Распределение средств, выделенных на безопасность, будет оптимальным, если средний предотвращенный ущерб при наступлении любой из рассматриваемых ЧС будет наибольшим. Такое распределение определяется решением следующей задачи линейного программирования:

$$\begin{cases} Z = x_1 + x_2 + x_3 \rightarrow \min; \\ 4,2x_1 + 0,42x_2 + 0,84x_3 \geq 1; \\ 0,24x_1 + 1,28x_2 + 0,08x_3 \geq 1; \\ 0,078x_1 + 0,026x_2 + 0,416x_3 \geq 1; \\ x_1, x_2, x_3 \geq 0. \end{cases}$$

Решение задачи (5.7), полученное с помощью пакета прикладных программ EXCEL имеет вид:

$$\begin{aligned} Z_{\min} &= 2,99; \\ x_1 &= 0; \quad x_2 = 0,63; \quad x_3 = 2,36. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что средняя величина предотвращенного ущерба составляет всего 0,33 млн руб. при распределении всех средств между системами антитеррористической и инженерной безопасности в отношении 1:4. Таким образом, в рассмотренном примере главную опасность для деятельности объекта представляет состояние его зданий, оборудования и инженерных сетей.

4.5. Методы математического моделирования систем обеспечения комплексной безопасности объектов

Система обеспечения комплексной безопасности (СОКБ) представляет собой совокупность инженерно-технических средств, организационных мероприятий и действий службы безопасности, предназначенных для защиты объекта в чрезвычайных ситуациях.

При создании СОКБ возможны два подхода: выбор наиболее рационального варианта построения системы из нескольких вариантов (задача анализа) и оптимизация параметров системы, т.е. назначение некоего набора оптимальных характеристик системы как исходных данных для ее создания (задача синтеза). При этом необходимо учитывать специфические особенности СОКБ:

1. Конфликтность интересов в системе «охрана-нарушитель».
2. Неопределенность исходных данных для проектирования и функционирования системы. В первую очередь это касается угроз, модели нарушителя, а также сценариев развития конфликтной ситуации.
3. Случайный характер временных параметров, в том числе случайность времени движения охраны и нарушителя, времени преодоления физических барьеров, момента срабатываний средств обнаружения и пр.
4. Трудоемкость организации эксперимента. Лучшим способом анализа эффективности СОКБ является организация учений, однако этот способ связан с привлечением значительных материальных и людских ресурсов и не получил широкого распространения. «Поведение» СОКБ целесообразно предварительно изучить с помощью ее математической модели.

Эффективность любой сложной технической системы (СТС) отражает ее приспособленность к выполнению своей целевой функции. Так, ГОСТ 34.003-99 определяет эффективность системы как «свойство, характеризующее степень достижения целей, поставленных при создании системы». В частности, эффективность СОКБ можно охарактеризовать как способность системы противостоять возникновению ЧС в рамках потенциальных угроз. Таким образом, эффективность СОКБ характеризует уровень защищенности объекта.

Существуют качественные и количественные методы анализа системы безопасности. Во многих случаях качественных оценок бинарного типа (соответствует/не соответствует требованиям) вполне

достаточно, чтобы ответить на вопрос, насколько защищен объект, а также наметить пути совершенствования инженерно-технической защиты. Более информативны количественные методы. Однако для того, чтобы «измерить» эффективность, необходимо иметь обоснованный критерий. Критерий эффективности (критерий оптимальности, критерий принятия решения) – признак, позволяющий дать сравнительную оценку предложенных альтернатив и выбрать оптимальное решение. На практике применяют следующие типы критериев:

1. Критерии типа «эффект-затраты», позволяющие оценивать достижение целей функционирования СОКБ при заданных затратах (так называемая экономическая эффективность).

2. Критерии, позволяющие оценить качество СОКБ по заданным показателям и исключить те варианты, которые не удовлетворяют заданным ограничениям (например, методы многокритериальной оптимизации).

3. Взвешивающие критерии – искусственно сконструированные критерии, позволяющие оценивать интегральный эффект (например, «линейная свертка» частных показателей).

К критерию эффективности должны предъявляться следующие требования:

- объективность – «прозрачность» математической модели и объективность оценок;
- представительность – отражение всех значимых сторон функционирования СОКБ;
- чувствительность оценки – выходной результат должен отражать варьирование входных данных в заданных параметрах;
- интерпретируемость – простая и удобная форма, пригодная для заключения об эффективности системы на основе данного критерия.

Основными методами анализа эффективности систем безопасности являются:

- детерминистический подход;
- методы многокритериальной оптимизации;
- логико-вероятностное моделирование;
- имитационное моделирование.

Детерминистический подход связан с заданием и последующей проверкой требований, содержащихся в научно-технической документации, техническом задании на проектирование, в рабочем проекте оборудования объекта средствами охранно-тревожной сигнализации. Схема реализации метода следующая:

1. Проводится категорирование объектов охраны в зависимости от их важности/потенциальной опасности, возможного и/или допустимого социально-экономического ущерба, от прогнозируемых угроз, типа объекта и других установленных и принятых критериев.

2. Для объектов каждой категории устанавливаются дифференцированные требования по организации охраны и инженерно-технической укрепленности конструктивных элементов объекта (в первую очередь ограждающих конструкций и элементов инженерно-технической укрепленности). Такой подход реализуется, например, в руководящих документах МВД России. При этом уровень защищенности должен соответствовать значимости объекта, выражаемой через его категорию, – в этом состоит основной принцип проектирования эффективной СОКБ.

3. Состояние СОКБ оценивается экспертным путем. Экспертная оценка – средство переработки слабоструктурированных данных, при котором используются суждения экспертов для подготовки обоснованных решений (заполняются опросные листы, содержащие формализованные перечни требований по охране объекта, в том числе по оснащению периметра объекта, его зданий, сооружений, по степени готовности, уровню обучения личного состава сил безопасности, по наличию комплекта нормативных документов, регламентирующих организацию охраны объекта).

Основой методов многокритериальной оптимизации является агрегирование информации о частных показателях качества. Среди них выделяют методы лексикографического упорядочивания, итерационные методы предпочтительного выбора, аксиоматический подход с использованием теории полезности и др.

Один из применяемых итерационных методов – метод «смещенного идеала». Пусть задано n объектов, оцененных по m критериям: $k_1 \dots k_m$. Процедура оптимизации такова:

1. Моделируются два многокритериальных объекта (МКО): «условно предпочтительный», формируемый из максимальных по полезности значений критериев ($\text{МКО}^+ = \{k_1, \dots, k_m^+\}$) и наихудший – из минимальных по полезности значений критериев: ($\text{МКО}^- = \{k_1, \dots, k_m^-\}$).

2. Задается вектор предпочтений, например $W_1 = (4,3,3,2)$. Он отражает предпочтения лица, принимающего решение в отношении оптимизируемых показателей эффективности.

3. Чтобы выявить объекты, которые не претендуют на предпочтительные, их сравнивают с идеальным, вычисляя

«расстояние» (метрику) до идеального. Так, объекты ранжируются по расстоянию от идеального объекта, например: $B_1 > B_4 > B_2 > B_3$. Наименее предпочтительный объект (B_3) исключается из рассмотрения, после чего процедура повторяется. Таким образом, исключая неподходящие объекты, в конце остается один, наиболее предпочтительный.

Логико-вероятностные методы позволяют получить количественную оценку риска как меры опасности. Эти методы применяются для анализа надежности и безопасности системы. В их основе лежат два понятия: степень риска и уровень защищенности. Степень риска $K_{\text{риск}}(y)$ – вероятность невыполнения СОКБ своей целевой функции. Дополняющая до единицы величина характеризует уровень защищенности $K_{\text{защ}}(y) = 1 - K_{\text{риск}}(y)$. Оценка защищенности – процедура оценки показателей $K_{\text{риск}}$, $K_{\text{защ}}$ для людей и материальных ценностей. Процедура анализа следующая:

1. Составляется сценарий развития опасности (граф вида «дерево»), представляющий собой логико-вероятностную модель формирования ЧС. Сценарий содержит события трех видов: иницирующие, промежуточные и конечное. Иницирующие события описывают входные воздействия на систему (преодоление нарушителем периметра объекта и пр.). Промежуточные события – логическая комбинация (конъюнкция или дизъюнкция) исходных. Конечное событие описывает опасное состояние системы (проникновение нарушителя на объект, возникновение пожара и пр.).

2. Аналитически граф описывается с помощью функции опасности системы $y(z_1...z_n)$, где $z_1...z_n$ – иницирующие события, а значение – конечное (опасное) событие. По этой функции можно выделить так называемые кратчайшие пути опасного развития событий. Каждый из них представляет собой минимальный набор иницирующих событий, конъюнкция (совмещение) которых приводит к опасному состоянию.

3. С помощью логико-вероятностных преобразований функция опасности системы приводится к одной из канонических форм и заменяется вероятностной функцией $P\{y(z_1...z_n)\}$. При этом необходимо иметь вероятности иницирующих событий $z_1...z_n$ (например, вероятность обнаружения преодоления периметра, вероятность прохода через КПП по подложному пропуску и пр.). Значение вероятностной функции P , при которой значение функции опасности y равно 1 (это означает наступление опасного события), и определяет степень риска, присутствующего в системе:

$$K_{\text{риск}}(y) = P\{y(z_1...z_n)\}=1.$$

Трудность здесь заключается в обеспечении достоверности исходных данных. Различают объективные и субъективные вероятности. Объективными являются характеристики технических средств охраны по результатам натурных испытаний ($P_{\text{обн}}$, $T_{\text{лс}}$, $P_{\text{ош2}}$ и пр.). Качественно иную (субъективную) природу имеют результаты анализа уязвимости, отражающие интуитивные представления о возможности и характере реализации угрозы.

Вероятностный подход к анализу базируется на предположениях о случайности и независимости временных параметров в системе «безопасности». Эффективность здесь понимается как вероятность пресечения или предотвращения опасных событий:

$P_{\text{пресеч}} = P_{\text{обн}} \cdot P_{\text{нейтр}}$, где $P_{\text{обн}}$ – вероятность обнаружения опасного события; $P_{\text{нейтр}}$ – вероятность его нейтрализации.

Один из методов оценки этих вероятностей – имитационное моделирование. Это вычислительный эксперимент, основанный на том известном факте, что при увеличении числа испытаний n относительная частота $W = m/n$ появления случайного события A в серии испытаний стремится к его вероятности в единичном испытании $W \Rightarrow p(A)$ при $n \Rightarrow \infty$. С помощью генератора случайных чисел получают выборки случайных величин, распределенных по известному закону с известными математическим ожиданием и дисперсией. Приведем пример. Периметр объекта оборудован системой охранной сигнализации с вероятностью обнаружения $P_{\text{обн}} = 0,95$. Для имитационного моделирования работы такой системы «разыгрывается» равномерно распределенное случайное число k от 0 да 1. Если $k \leq 0,95$, система сработала, в противном случае – нет. Таким же образом моделируется время движения сил охраны и нарушителя и другие случайные процессы в СОКБ.

Каждая конфликтная ситуация просчитывается много раз, по результатам набирается статистика предотвращений ЧС. Эффективность СОКБ оценивается статистически, как отношение числа предотвращений к общему числу испытаний. Количество опытов определяется исходя из того, что при заданной доверительной вероятности необходимо обеспечить требуемую точность оценки.

Вопросы для самопроверки

1. Изложите основные положения математического моделирования защищенности объектов от террористических нападений.
2. Приведите основные количественные методы оценки пожарной безопасности объектов.
3. Изложите основные подходы к моделированию экологического риска объектов.
4. Радоновая опасность и методы ее количественного описания.
5. Изложите методы оптимизации распределения ресурсов между отдельными направлениями предотвращения ЧС.
6. Изложите основные подходы к созданию системы комплексной безопасности объектов.
7. Приведите качественные и количественные методы оценки эффективности систем комплексной безопасности объектов.
8. Изложите суть логико-вероятностных методов оценки степени риска и уровня защищенности для людей и материальных ценностей.
9. Применение объективных и субъективных вероятностей при оценке уязвимости объекта.
10. Применение имитационного моделирования для оценки эффективности функционирования систем комплексной безопасности объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на научно-технический прогресс и принимаемые меры по обеспечению безопасности, защищенность людей и материальной сферы от катастроф природного и техногенного характера постоянно снижается. Изменение климата, создание высокорисковых объектов техногенной сферы (ядерное и химическое оружие, ядерные энергоустановки, ракетно-космические системы, химические комплексы, магистральные трубопроводы и др.) создают угрозу самому существованию человека. Поэтому вместо применяемого ранее принципа нулевого риска, предполагавшего возможность полного исключения техногенных катастроф, все шире используется более обоснованная концепция приемлемого риска. В этих условиях проблема снижения риска ЧС принимает количественный характер и требует для своего решения применения методов моделирования и прогнозирования природных и техногенных опасностей. Настоящее учебное пособие является введением в основные методы анализа и прогнозирования рисков. Его изучение будет способствовать повышению уровня теоретической подготовки, формированию навыков прогнозирования и расчета обстановки при возникновении ЧС, а также повышению культуры безопасности студентов специальности 280103 – Защита в чрезвычайных ситуациях.

Библиографический список

1. *Акимов, В. А.* Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах / В. А. Акимов, В. В. Лесных, Н. Н. Радаев. – М.: ЗАО «Деловой экспресс», 2004. – 437 с.
2. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера: учебное пособие / В. А. Акимов, Ю. Л. Воробьев, М. И. Фалеев и др. – М.: Высшая школа, 2006. – 592 с.
3. Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций: учебное пособие / под общ. ред. М.И. Фалеева. – Калуга: ГУП «Облиздат», 2001. – 400 с.
4. Обеспечение мероприятий и действий сил ликвидации чрезвычайных ситуаций. Часть 2. Книга 2. Оперативное прогнозирование инженерной обстановки в чрезвычайных ситуациях / под общ. ред. С.К. Шойгу / В.А. Акатьев, С.С. Волков, В.С. Гаваза и др. – М.: ЗАО «Фирма «Папирус»», 1998. – 176 с.
5. *Самарский, А. А.* Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры /А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – М.: Физматлит, 2002. – 320 с.
6. Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ	5
1.1. Математическое моделирование, как инструмент анализа и прогнозирования чрезвычайных ситуаций	5
1.2. Общие положения моделирования чрезвычайных ситуаций	12
1.3. Оценки и анализ риска возникновения чрезвычайной ситуации	15
1.4. Моделирование повторяемости чрезвычайных ситуаций	20
1.5. Единый вероятностный подход к оценке последствий ЧС	28
Глава 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПРИРОДНЫХ ОПАСНОСТЕЙ	35
2.1. Моделирование и оценка обстановки при землетрясениях	35
2.1.1. Общие понятия о землетрясениях	35
2.1.2. Количественные характеристики землетрясений	36
2.1.3. Оценка последствий землетрясений	39
2.2. Прогнозирование и оценка обстановки при ураганах	44
2.2.1. Общие сведения об ураганах	44
2.2.2. Последствия ураганов	45
2.3. Прогнозирование и оценка обстановки при наводнениях	50
2.3.1. Общая характеристика наводнений	50
2.3.2. Поражающие факторы наводнений и прогнозирование их последствий	54
2.4. Прогнозирование и оценка обстановки при лесных пожарах	59
2.4.1. Общая характеристика лесных пожаров	59
2.4.2. Чрезвычайная лесопожарная ситуация, её предпосылки, критерии и параметры	62
2.4.3. Количественные характеристики распространяющегося лесного пожара и его поражающие факторы	64
Глава 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ТЕХНОГЕННЫХ ОПАСНОСТЕЙ	68
3.1. Основные допущения	68
3.2. Прогнозирование последствий аварий, связанных со взрывами	68
3.2.1. Поражающие факторы взрывов. Взрыв конденсированных взрывчатых веществ	68

3.2.2. Моделирование взрыва парогазовоздушного облака в неограниченном пространстве	70
3.2.3. Взрыв парогазовоздушного облака в ограниченном пространстве	75
3.2.4. Прогнозирование обстановки при взрывах.....	77
3.3. Прогнозирование и оценка обстановки при пожарах	82
3.3.1. Основные характеристики пожаров	82
3.3.2. Пожар разлива	83
3.3.3. Горение парогазовоздушного облака	86
3.3.4. Пожар в населенном пункте и на промышленных объектах	87
3.3.5. Оценка поражающего воздействия пожаров	89
3.4. Прогнозирование и оценка обстановки при химических авариях	96
3.4.1. Химически опасные объекты. Зона химического заражения	96
3.4.2. Основные допущения при прогнозировании химического заражения	100
3.4.3. Расчет зоны химического заражения.....	101
3.4.4. Прогнозирование количества пострадавших среди персонала и населения	106
3.5. Прогнозирование и оценка обстановки при радиационных авариях	112
3.5.1. Общая характеристика радиационно опасных объектов и радиационных аварий	112
3.5.2. Биологическое действие ионизирующего излучения и единицы его измерения.....	114
3.5.3. Мероприятия по защите населения в случае радиационной аварии.....	118
3.5.4. Определение зон радиоактивного загрязнения	120
3.6. Прогнозирование и оценка обстановки при гидродинамических авариях	122
3.6.1. Общая характеристика гидродинамически опасных объектов и гидродинамических аварий.....	122
3.6.2. Поражающие факторы гидродинамической аварии	124
3.6.3. Определение параметров волны прорыва	126
3.6.4. Оценка разрушений в зонах затопления	130

Глава 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОБЪЕКТОВ С МАССОВЫМ ПРЕБЫВАНИЕМ ЛЮДЕЙ ОТ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ.....	132
4.1. Моделирование защищенности объектов от террористических нападений.....	132
4.2. Математическое моделирование пожарной безопасности объектов	138
4.3. Моделирование факторов экологического риска.....	144
4.4. Модель оптимального распределения ресурсов между основными направлениями и мероприятиями обеспечения безопасности объекта	149
4.5. Методы математического моделирования систем обеспечения комплексной безопасности объектов	155
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	161
Библиографический список.....	162

Учебное издание

Шаптала Владимир Григорьевич
Радоцкий Владимир Юрьевич
Шаптала Виталий Владимирович

ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Учебное пособие

Подписано в печать 29.12.10. Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 9,6. Уч.-изд. л. 10,4.
Тираж 57 экз. Заказ Цена
Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46