

4. ИЗМЕРЕНИЕ, ВЫЧИСЛЕНИЕ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОЦЕНОК РИСКА

Риск определяется как функция последствий инцидента (X) и его вероятность (W):

$$R = \{W, X\}$$

Не существует единственного способа измерения риска или представления его оценки. Здесь следует исходить из имеющихся информации и ресурсов, а также из того, для какого круга лиц предназначаются получаемые результаты.

Всегда необходимо помнить о том, что мы имеем дело с оценками. Для того, чтобы правильно использовать эти оценки соответствующим образом – для выработки на их основе технических и управленческих решений, для связей с общественностью и административными органами, очень важно, чтобы была известна потенциальная степень неопределенности этих оценок.

Для обоснования способов измерения риска и выбора способа представления оценок риска полезным оказался подход, разработанный американскими исследователями [4] при создании руководства по количественному анализу риска химических процессов. Мы посчитали целесообразным изложить этот подход (с некоторыми сокращениями и изменениями) в авторском варианте.

4.1. *Оценки риска*

4.1.1 ИНДЕКСЫ РИСКА

Индексы риска – это отдельные числа или табличные значения, которые могут использоваться либо в абсолютном, либо в относительном смысле. Существуют следующие ограничения на их использование: может не быть абсолютных критериев для принятия или отрицания риска и индексы не отражают полноту информации, специфику реализации сценариев производственных аварий и не позволяют оценивать эффективность мер по снижению потенциальной опасности объектов. Индексы последствий (например, индекс Доу и Монда) рассматривают риск только в относительном смысле. В качестве примера использования более полных индексов риска для относительной оценки можно составить таблицу, в которой будет проводиться сравнение Эквивалентных Социальных Затрат для диапазона мер возможного уменьшения риска; это позволит провести четкое ранжирование таких мер на основе социальной выгоды. Примерами использования индексов риска в абсолютном смысле являются оценки - Частоты Смертельных Несчастных Случаев

(ЧСНС), применяемые некоторыми компаниями.

Частота Смертельных Несчастных Случаев (ЧСНЧ) [Lees, 1996] – это оцененное число смертей от несчастных случаев на 10^8 часов подвергания риску (примерно 1000 продолжительностей рабочих жизней работников). ЧСНС – это индекс, представляемый одним числом, которое прямо пропорционально среднему индивидуальному риску. Единственным численным различием является период времени, который составляет один год для среднего индивидуального риска.

Индекс Индивидуальной Опасности – это Частота Смертельных Несчастных Случаев для конкретной опасности, где время подвергания риску определяется как фактическое время, в течение которого человек подвергается опасности рассматриваемого вида.

Средний Показатель Смертности [Lees, 1980] определяется как среднее число смертей от всех возможных несчастных случаев, которое можно ожидать в единицу времени. Этот показатель также известен под названием Число Смертей от Несчастных Случаев.

Показатель, называемый Индексом Удельной Смертности [Marshall, 1989], используется для оценки потенциальных опасностей при хранении токсичных материалов. Он заключается в оценке последствий крупной производственной аварии посредством установления зависимости масштабом последствий и массой опасного вещества. Этот показатель фактически представляет собой скорее Индекс Опасности, чем Индекс Риска, поскольку частота возникновения событий во внимание не принимается.

4.1.2 Индивидуальный риск

Индивидуальный риск – это условная вероятность смерти (травмы) человека при всех количественно заданных параметрах источника опасности. Здесь учитывается природа вреда для индивидуума, вероятность того, что этот вред будет нанесен, а также период времени, в течение которого это может произойти. Следует отметить, что индивидуальный риск одинаков независимо от того, подвергается риску один человек или много лиц.

Хотя основное внимание уделяется ущербу, для оценки его степени имеется лишь ограниченная информация. Таким образом, аналитик, занимающийся исследованием риска часто оценивает риск необратимого вреда или смерти от нежелательного случая, для чего регистрируется большой объем статистических данных.

Индивидуальный риск можно оценивать для индивидуума, в наибольшей степени подвергающегося опасности, для группы индивидуумов, находящихся в конкретных местах, или для среднего индивидуума в зоне воздействия. Для данного инцидента или нескольких инцидентов эти меры индивидуального риска имеют различное значение. Ниже приводятся определения некоторых значений индивидуального риска.

1. Контуры Индивидуального Риска. График кривых изориска (равновеликих рисков) выражает риск для отдельного лица в зависимости от его географического местонахождения. Контуры риска отражают ожидаемую частоту события, способного вызвать опасность данного уровня в конкретном месте вне зависимости от того, присутствует ли в этом месте кто-нибудь, подвергающийся такой опасности. Проводится оценка индивидуальных рисков для всевозможных местонахождений и определенные аналитические кривые изориска наносятся на карту.

2. Максимальный Индивидуальный Риск - это индивидуальный риск для человека (нескольких человек), подвергающегося (подвергающихся) максимальной опасности среди всего населения, которому может угрожать такая опасность. Зачастую это оператор, работающий на анализируемом устройстве, но это также может быть и отдельный человек - представитель обычного населения, живущего в зоне наивысшего риска. Максимальный Индивидуальный риск может быть определен по контурам риска посредством выделения человека, подвергающегося максимальному риску, с определением индивидуального риска в этой точке. Кроме того, этот показатель может быть определен путем вычисления индивидуального риска в любом географическом месте, где присутствуют люди, с нахождением из полученных результатов максимального значения.

3. Средний Индивидуальный Риск (для популяции, подвергающейся опасности) - это индивидуальный риск, усредненный по численности популяции, которая подвергается опасности от оборудования (например, все операторы в здании или люди, находящиеся в зоне наибольшего воздействия инцидента). Эта мера риска полезна только тогда, когда риск относительно равномерно распределен по популяции; если же риск не имеет равномерного распределения, использование этой меры может привести к неправильному выводу. Если лишь небольшое число людей подвергается очень высокому риску, а число людей, подвергающихся небольшому риску велико, применение такой меры может сделать

этот факт неочевидным.

4. Средний Индивидуальный Риск (для общей популяции) - это индивидуальный риск, усредненный по предварительно определенной популяции без учета того, все ли люди из этой популяции фактически подвергаются риску. Эта усредненная мера риска может ввести в крайнее заблуждение. Если отобранная популяция слишком велика, то в результате будет получена искусственно заниженная оценка усредненного индивидуального риска, так как большая часть этой популяции может быть вообще не подверженной риску от исследуемого оборудования.

5. Средний Индивидуальный Риск (число часов подвергания риску/общее число рабочих часов). Индивидуальный риск для некоторой деятельности может быть вычислен для продолжительности этой деятельности или усреднен по всему рабочему дню. Например, если оператор затрачивает 1 час времени на отбор проб при переключении реактора и 7 часов на работу в контрольном зале, индивидуальный риск от работы по отбору проб будет в 8 раз больше среднего индивидуального риска для всего рабочего дня в предположении, что при работе в контрольном зале оператор не подвергается никакому риску.

4.1.3 ОБЩЕСТВЕННЫЙ ИЛИ КОЛЛЕКТИВНЫЙ РИСК

Некоторые существенные инциденты могут воздействовать на большое число людей. Коллективный риск – это зависимость между частотой (вероятностью) и количеством пострадавших людей среди данного населения в результате реализации определенной угрозы. Наиболее часто он выражается в терминах распределения частот большого числа событий несчастных случаев. Однако, коллективный риск может быть также выражен в терминах, аналогичных индивидуальному риску. Например, вероятность 10 смертей от несчастных случаев в заданном месте с координатами x и y - это типичная мера коллективного риска. Для вычисления коллективного риска требуется та же самая информация о частоте и последствиях, что и для определения индивидуального риска. Кроме того, оценка коллективного риска требует определения популяции в зоне риска от некоторого оборудования. Это определение может включать тип популяции (например, популяция жителей, промышленная популяция, школьная популяция), вероятность присутствия людей или факторы смягчения. Примером общественного (коллективного) риска может служить воздушное путешествие. Например, в Великобритании бывает в среднем 10 крупных авиакатастроф в год.

Индивидуальный и коллективный риски – это различные представления одних и тех же основополагающих комбинаций частоты инцидентов и их последствий. Обе эти меры могут оказаться важными при оценке преимуществ мероприятий по уменьшению риска или при принятии решений о приемлемости оборудования в абсолютных терминах.

Различия между индивидуальным и коллективным риском могут быть проиллюстрированы следующим примером. В здании учреждения, расположенного вблизи от химического завода, в течение рабочего дня находится 400 человек, а в остальное время суток – 1 охранник. Если вероятность инцидента, приводящего к смертельным случаям в помещении учреждения, постоянна на протяжении всего дня, каждый человек в здании подвергается определенному индивидуальному риску. Этот индивидуальный риск не зависит от числа присутствующих в здании людей – он одинаков для каждого из четырехсот сотрудников, находящихся в учреждении в течение времени его работы, и для единственного охранника – в остальное время суток. Однако, коллективный риск в течение времени работы учреждения, когда в здании находятся 400 человек, существенно выше, чем в то время, когда в здании находится один человек.

4.1.4 МЕРЫ РИСКА УЩЕРБА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ

Риск для людей может быть определен в терминах ущерба для здоровья или смертности от несчастных случаев. Однако, здесь возникают проблемы, связанные со степенью заболеваний и со сравнимостью между различными типами ущерба для здоровья (тепловое воздействие, или воздействие взрыва, или воздействие токсичных веществ). При оценке риска, связанного с многочисленными опасностями, необходимо добавлять риски различного рода инцидентов. Например, как комбинируются ожоги второй степени, частичное поражение и поражение от токсичных газов? Даже там, где оценивается только один тип воздействия (например, порог подверженности риску от токсичных газов, что показывается на рисунке 4.1.1), различная продолжительность подвергания опасности может заметным образом влиять на серьезность ущерба для здоровья.

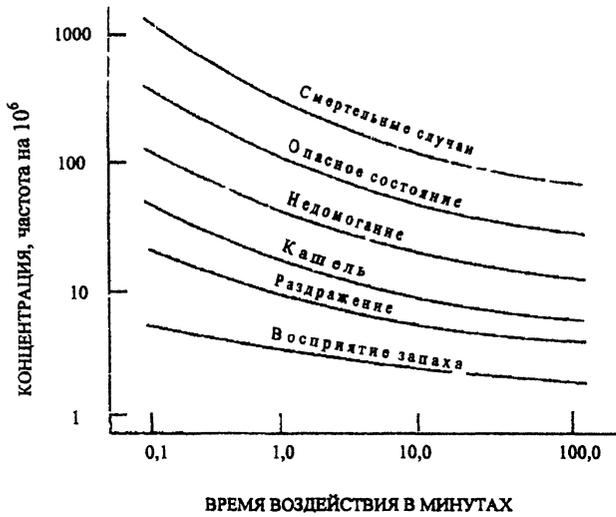


Рис. 4.1.1. Типичное отношение между уровнями поражения и концентрацией / временем подвергания риску для токсичных газов.

Многие оценки риска были проведены на основе учета смертельных исходов. Однако, существует неопределенность в том, что конкретно составляет фатальную дозу теплового излучения, воздействия взрыва или токсичных химических веществ. Если возникает желание оценить и ущерб для здоровья, и смертность, вычисление последствий могут быть повторены с использованием более низких интенсивностей воздействия, приводящего скорее к ущербу для здоровья, чем к смертельному исходу.

Для различных инцидентов эти отношения значительно отличались друг от друга. Случай выброса токсичных химических веществ в Бхопале вызвал примерно 2500 смертей и 20000 нарушений здоровья, а примерно 200000 человек обратились за медицинской помощью. Однако, такие отношения трудно сравнивать, поскольку степень ущерба часто неадекватно определяется при описании инцидента, а также потому, что нет возможности скоррелировать уровни смертности и ущерба для здоровья "между" рисками токсичных отравлений для большинства химических веществ.

4.2. Представление риска

Большой объем информации о частоте и последствиях, генерируемый при количественном анализе риска химических процессов (КАРПХ), должен быть интегрирован в представление, относительно простое для понимания и использования. Форма представления должна меняться в зависимости от цели использования результатов количественного анализа риска. Это представление может быть сделано на относительной основе (например, сравнение выгод от уменьшения риска при применении различных мероприятий) или на абсолютной основе (например, сравнение с "мишенью" риска).

Представление риска обеспечивает простое количественное описание риска, полезное для принятия решений, Число индексов, оцениваемых при количественном анализе риска химических процессов может быть очень большим. Представление риска уменьшает этот большой объем информации, приводя его к управляемому виду. Конечным результатом может стать индекс в виде единственного числа, таблица, график (например график, связывающий частоту и последствия) и/или карта риска (например график контуров индивидуального риска).

Так как индексы риска – это нахождение единственного числа, они обычно представляются в таблицах.

Обычными способами представления индивидуального риска являются графики контуров риска (смотрите рисунок 4.2.1) и профили индивидуального риска (рисунок 4.2.2) [Rijnmond, 1982].

График контуров риска показывает оценки индивидуального риска в конкретных точках карты. Контуров риска (кривые "изориска") соединяют точки с одинаковым риском вокруг установки. Места особой уязвимости (например, школы, больницы, места концентрации населения) могут быть легко идентифицированы.

Профиль индивидуального риска – это график индивидуального риска как функции расстояния от источника риска (рисунок 4.3). Этот тип графика является двумерным (риск против расстояния) и представляет собой упрощенный вариант графика контуров индивидуального риска.

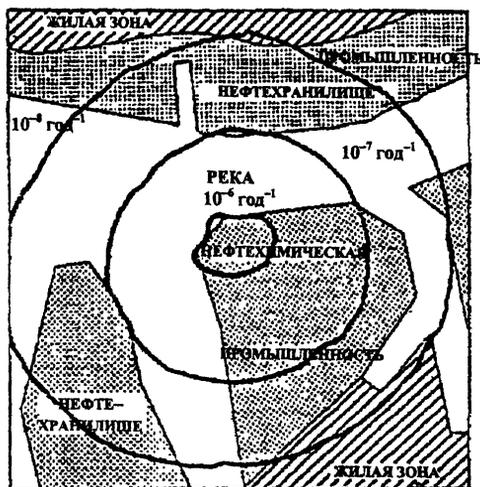


Рис. 4.2.1. Пример графика контуров индивидуального риска

Обычная форма представления коллективного риска известна как кривая, отражающая соотношение между частотой и числом смертельных исходов, как последствий инцидентов (кривая F-N от англ. Frequency - Number, т.е. "Частота - Число"). Кривая F-N - это график интегральной частоты против последствий (выраженных числом смертельных исходов). Обычно используется логарифмический график, поскольку частота и число смертельных исходов колеблется в пределах нескольких порядков.

На рисунке 4.2.3 показывается кривая F-N для одной установки сжиженного легковоспламеняющегося газа.

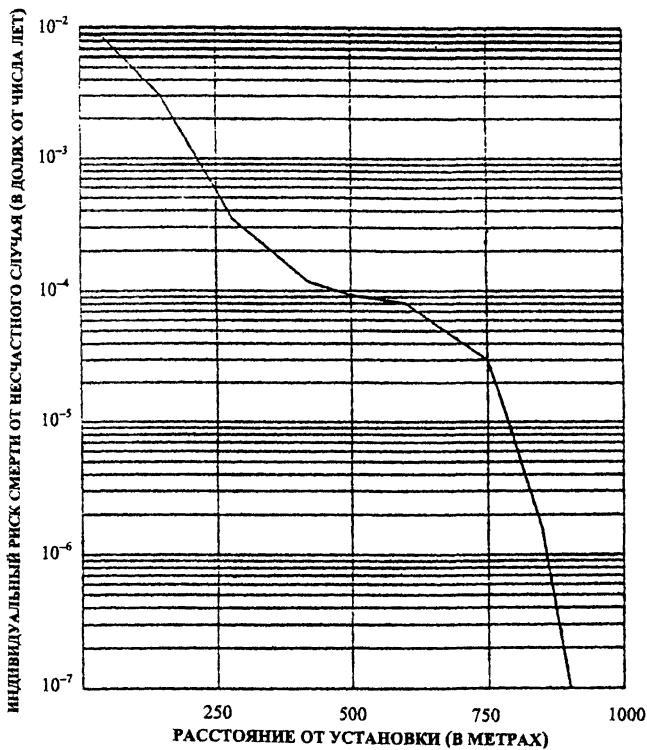


Рис. 4.2.2. Пример ежегодного профиля индивидуального риска.

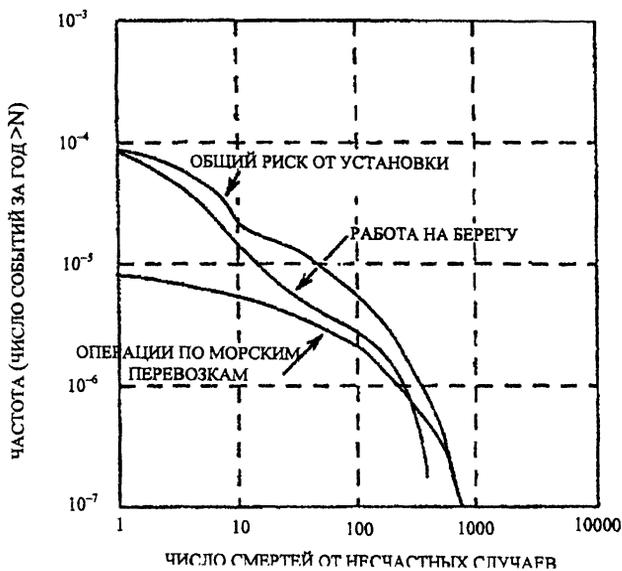


Рис. 4.2.3. Пример кривой F-N коллективного риска.

Другим способом представления коллективного риска является табличное представление риска для групп людей разной численности, которые подвергаются опасности (например, 1 - 10, 11 - 100, 101 - 1000). Это более грубая форма представления, чем кривая F-N. Хотя неспециалисты могут найти такой формат более легким для интерпретации, чем логарифмический график, здесь, как и в случаях с другими упрощениями, так же может быть потеряна информация. Например, если техническое исправление важного инцидента не влияет на частоту его встречаемости, но действительно уменьшает число людей, на которых оно влияет, с 80 до 40, в таблице не будет никаких изменений, так как и то, и другое значение попадает в диапазон от 11 до 100. Это изменение нашло бы свое отражение в графике F-N.

4.3. Выбор оценки риска и формата ее представления

К факторам, которые следует принимать во внимание при представлении мер риска, относятся следующие:

- (1) Цели исследования;

- (2) Требуемая глубина исследования;
- (3) Конечное использование;
- (4) Популяция, подвергающаяся риску.

Выбор уровня оценки риска может быть также ограничен тем, на что направлено исследование, а именно, на анализ риска для работников предприятия или для населения, живущего вокруг него. Для работников предприятия из-за их близости к риску обычно оценивается индивидуальный риск, но для больших предприятий с различными работающими популяциями могут также использоваться и оценки коллективного риска.

Принимая решение о том, какие форматы представления величины риска выбрать, необходимо учитывать следующие факторы:

- Потребности пользователя;
- Знания пользователя;
- Эффективность согласования результатов;
- Аудитория;
- Необходимость сравнительных представлений.

Наиболее часто желательно провести сравнение результатов исследования с другими оценками риска, и это определяет выбор. При этом мы получаем:

- сравнение альтернативных проектов процесса или вариантов ведения работы;
- сравнение текущих оценок риска с оценками риска других аналогичных систем, исследование которых проводилось ранее, с выявлением областей для уменьшения риска или для дальнейшего исследования;
- сравнение текущих оценок риска с другими внутренними оценками риска, которые были ранее приняты или отвергнуты, или сравнение текущей оценки риска с другими опубликованными исследованиями;
- сравнение оценок риска с другими вольными или невольными рисками для ранжирования текущей оценки риска относительно этих значений.

4.4. Вычисление риска

Рассмотрим процедуры для вычисления индивидуального риска, коллективного риска и индексов риска. Порядок обсуждения изменен по сравнению с предыдущими разделами данной главы потому, что

вычисления индексов риска используют некоторую информацию, получаемую при вычислениях оценок индивидуального и коллективного риска.

4.4.1. Индивидуальный риск

Вычисление индивидуального риска в некоторой географической точке вблизи установки предполагает, что вклады всех случаев проявления инцидента аддитивны. Таким образом, общий индивидуальный риск в каждой точке равен сумме индивидуальных рисков (в этой точке) от всех случаев проявления инцидента, связанных с исследуемой установкой:

$$IR_{x,y} = \sum_{i=1}^n IR_{x,y,i} \quad (4.4.1)$$

где $IR_{x,y}$ – общий индивидуальный риск смертельной травматизации в географической точке с координатами x и y (число возможных смертельных исходов в год),

$IR_{x,y,i}$ – индивидуальный риск смертельного исхода в географической точке с координатами x и y от i -го случая проявления инцидента (число смертельных исходов в год),

n – общее число случаев проявления инцидента, принимаемых во внимание в проводимом исследовании.

Входы для уравнения (4.4.1) получаются из следующего соотношения:

$$IR_{x,y,i} = f_i p_{ci} \quad (4.4.2)$$

где f_i – частота i -го случая проявления инцидента за год, получаемая из анализа частот, p_{ci} – вероятность того, что i -й случай проявления инцидента приведет в точке с координатами x и y к смертельному исходу; это значение получается из моделей последствий и воздействия.

В свою очередь, входы в уравнение 4.4.2 получаются из соотношения:

$$f_i = F_i p_{oi} p_{oi} \quad (4.4.3)$$

где F_i – частота инцидента I , имеющего i -й случай проявления как один из возможных случаев проявления этого инцидента (за год),

p_{oi} – вероятность того, что результат инцидента, имеющего

i -й случай проявления как один из возможных случаев проявления этого инцидента произойдет при условии, что произойдет сам этот инцидент I ,

$p_{\infty i}$ – вероятность того, что i -й случай проявления инцидента будет иметь место, при условии, что произойдет предшествующий инцидент I и результат инцидента, соответствующий i -му случаю проявления.

Вычисление значения f_i требует оценки вероятностей результата инцидента и случая проявления инцидента ($p_{\infty i}, p_{\infty}$) при условии возникновения инцидента I . Например, выпуск нетоксичного воспламеняемого материала (инцидент) может привести в результате к воспламенению в виде факела, к пожару в отстойнике, к «BLEVE»¹, к мгновенному воспламенению, к взрыву с неограниченным паровым облаком или, если не произойдет воспламенения, к безопасному рассеянию (результаты инцидента). Каждый из этих результатов имеет свою вероятность (p_{∞}). Некоторые из этих результатов будут в дальнейшем "разбиты" на случаи проявления инцидента в зависимости от места источника воспламенения и погодных условий. Каждый из таких случаев проявления инцидента имеет свою вероятность возникновения ($p_{\infty i}$). Обычно для оценки этих соотношений используется дерево событий.

Все методы вычисления индивидуального риска базируются на этих соотношениях. В общем случае эти уравнения должны применяться ко всем точкам, в которых должен быть вычислен индивидуальный риск. Способы упрощения могут уменьшить объем вычислений, но это повлияет на точность результатов. Однако, такие способы упрощения могут оказаться полезны при идентификации основных "вкладов" в риск. Когда они будут идентифицированы, они могут быть подвергнуты более детальному анализу.

¹ «BLEVE» - взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости, который происходит при неожиданном выбросе большой массы жидкости, находящейся под давлением, в атмосферу

4.4.2. КОНТУРЫ И ПРОФИЛИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО РИСКА

Предлагаются два примера подходов к вычислению оценки индивидуального риска в различных географических точках вокруг исследуемой установки и использования этой информации для генерации контуров и профилей риска [2]. Прежде всего обсуждается общий подход, требующей оценки индивидуального риска в каждой точке для исследования группы инцидентов, результатов инцидентов и случаев проявления инцидентов. Источник воспламенения и погодные данные могут быть использованы с различной степенью детальности, что определяется глубиной проводимого исследования. Этот подход, вообще говоря, требует вычислений на компьютере. Второй подход использует упрощенные предположения, ограничивающиеся, например, числом разных погодных условий и источников воспламенения, и подходит для проведения вычислений вручную.

а). Общий подход

Общий подход требует применения уравнений (4.4.1), (4.4.2) и (4.4.3) в каждой географической точке вокруг установки. На рисунке 4.6 проведена логическая диаграмма, показывающая процедуру вычисления. Применение общего подхода к реальной задаче, включающей детальную обработку источников воспламенения и широкий диапазон погодных условий, дает в результате крайне большое число случаев проявления инцидента. Требуется провести большое число отдельных вычислений и поэтому существенно необходимо использование вычислительных средств. Для таких вычислений риска существуют сложные компьютерные программы.

Процедура, реализующая общий подход, требует определения частоты и зон воздействия для каждого случая проявления инцидента. В результате получается список оценок индивидуального риска в рассматриваемых географических точках. Эти оценки риска могут быть затем вычерчены на карте местности. Контуров риска, соединяющие точки с одинаковым индивидуальным риском, могут быть вычерчены вручную или с помощью стандартных графических пакетов построения контуров.

Контуров индивидуального риска смертельной травматизации со смягчающими факторами (укрытие, убежище или эвакуация) могут отличаться в 10 и более раз от контуров без таких смягчающих факторов. Контуров индивидуального риска для конкретного уровня ущерба для здоровья будут различаться в большей степени, чем контуров смертности для той же самой установки. Цели исследования

должны устанавливать основу и форму вычислений индивидуального риска, определяя, будут ли учитываться смягчающие факторы. Возможная путаница от использования различных основ для оценки риска привела к тому, что многие оценивают контуры индивидуального риска смертности без смягчающих факторов или факторов присутствия, обеспечивая тем самым содержательную базу для исследований. Однако, во многих случаях это оказывается нереалистически консервативным подходом, особенно, если результаты исследования сравниваются с абсолютными значениями риска.

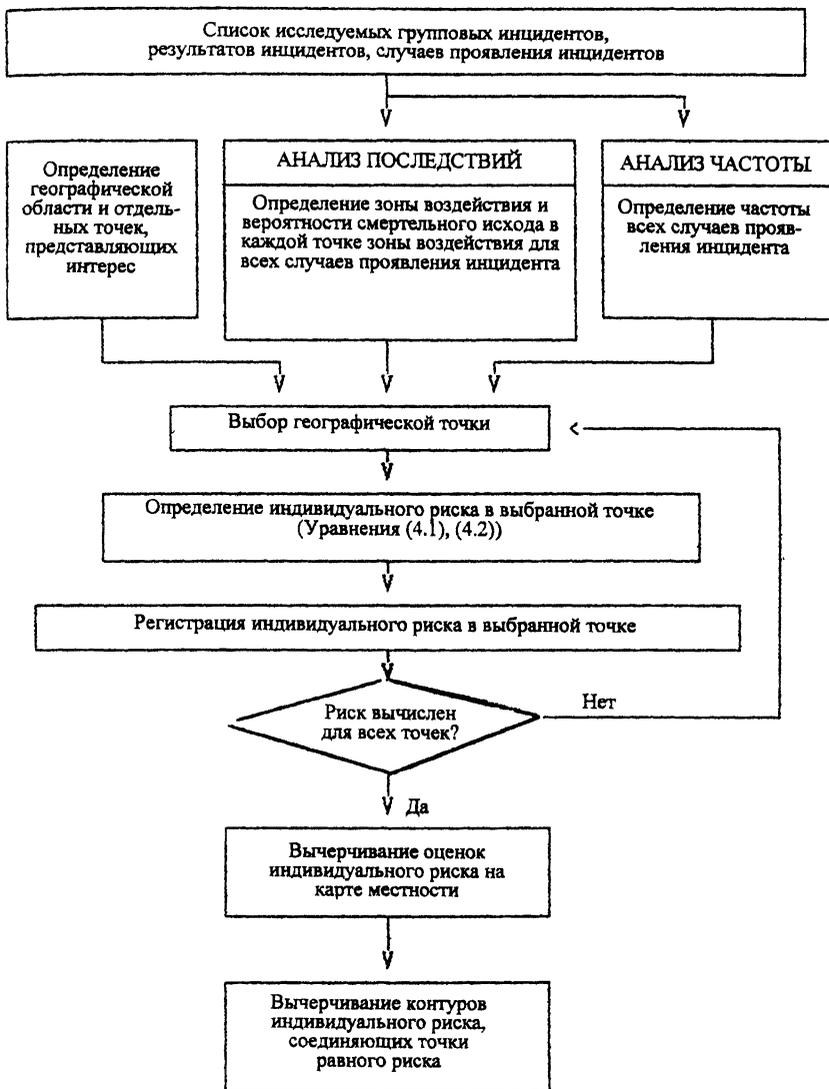


Рис. 4.4.1. Общая процедура для вычисления контуров индивидуального риска

б). Упрощенные подходы

Подход, описанный выше, может быть упрощен несколькими способами. Например, цели конкретного исследования могут не требовать полного знания географического распределения индивидуального риска. Вероятно, что цель исследования может быть достигнута и вычислением индивидуального риска в нескольких представляющих интерес точках. Например, может быть предпринято исследование по сравнению риска для нескольких потенциальных точек для контрольного построения, требующего оценки риска только в заданных точках рассматриваемой области.

Оценки индивидуального риска для точек, представляющих интерес, в точности те же самые, что и те, которые могли бы быть получены, если бы строились полные карты с контурами риска, так как в каждой точке выполняются такие же самые вычисления, но рассматривается меньшее число точек. Что при этом теряется, так это детальная информация о географическом распределении риска. Второй упрощенный подход основывается на следующих предположениях:

- Все опасности происходят от точечных источников.
- Распространение ветра равномерно (т.е. ветер с одинаковой вероятностью распространяется во всех направлениях).
- Можно использовать одну и ту же скорость ветра и один и тот же класс атмосферной стабильности.
- Никакие факторы смягчения не рассматриваются.
- Источники воспламенения распределены равномерно (т.е. вероятность воспламенения не зависит от направления).
- Эффекты последствий можно обрабатывать дискретно. Уровень эффекта внутри конкретной зоны воздействия постоянен (например, смертность составляет 100%), Вне этой зоны эффект не проявляется.

Использование этих предположений дает симметричные контуры риска – все контуры риска представляют собой окружности. Таким образом, индивидуальный риск, определенный в радиальном направлении от источника, определяет профиль риска и карту контуров риска. Этот тип вычисления индивидуального риска может подходить, например, для предварительного исследования новой установки до того, как будут приняты какие бы то ни было решения о размещении установки.

в). Процедура вычисления индивидуального риска с использованием упрощенного подхода.

Для этой процедуры требуется список всех инцидентов, результатов инцидентов, а также случаев проявления инцидентов, рассматриваемых в данном исследовании. Затем должны быть определены последствия (зоны воздействия) и частоты для всех случаев проявления инцидентов.

Для того, чтобы сгенерировать карту с контурами риска, выберите случай проявления инцидента с наибольшим радиусом зоны воздействия и начертите на карте соответствующую окружность (контур риска) с радиусом, равным радиусу зоны воздействия. Далее, определите, влияет ли на этот случай проявления инцидента направление ветра (например, облако воспламеняемого или токсичного газа будет двигаться по направлению ветра, а выпуск конденсированной фазы будет иметь одинаковое воздействие во всех направлениях независимо от направления ветра). Если направление ветра влияет на случай проявления инцидента, частота должна быть уменьшена на коэффициент направления ветра, с помощью которого учитывается тот факт, что ветер будет дуть в каком-то конкретном направлении только для части происходящих случаев проявления инцидента. Это вычисление эквивалентно разработке отдельных случаев проявления инцидента с учетом различных погодных условий в обсуждаемом выше общем подходе. Поскольку было сделано предположение о том, что ветер с равной вероятностью дует во всех направлениях, можно показать, что коэффициент направления равен $\theta_i/360$, где θ_i – угол, заключающий в себя зону воздействия случая проявления инцидента. Частота случая проявления инцидента, влияющая на конкретную точку в конкретном направлении, равна

$$f_{i,d} = f_i (\theta_i / 360) \quad (4.4.4)$$

где $f_{i,d}$ – частота, при которой i -й случай проявления инцидента воздействует на некоторую конкретную точку в некотором конкретном направлении в предположении равномерного распределения направлений ветра (за год);
 f_i – оцененная частота возникновения i -го случая проявления инцидента (за год);
 θ_i – угол, внутри которого находится зона воздействия i -го случая проявления инцидента (градусы).

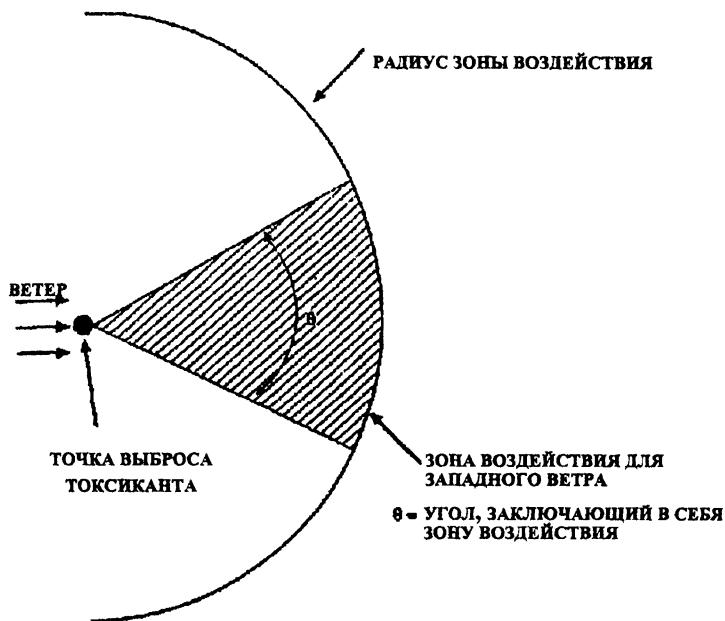


Рис. 4.4.2. Зона воздействия для случая проявления инцидента в зависимости от направления ветра для упрощенной процедуры оценки индивидуального риска

На следующем шаге выполняется назначение контуру значения индивидуального риска. Оно равно сумме частоты i -го случая проявления инцидента (пронормированного как описывается уравнением (4.4.4), если направление ветра влияет на точку зоны воздействия) и индивидуального риска следующего по отдаленности контура риска.

$$IRC_i = f_i \text{ (или } f_w) + IRC_{i-1} \quad (4.4.5)$$

где IRC_i – значение индивидуального риска на контуре рассматриваемого случая проявления риска (за год);
 IRC_{i-1} – значение индивидуального риска на следующем по отдаленности контуре риска (в год), а значения частот f_i и f_w определяются по уравнению (4.4.4).

Для первого вычерченного контура (для случая проявления инцидента с наибольшим радиусом зоны воздействия) значение IRC_{i1} равно нулю. Эта процедура продолжается до тех пор, пока не будут рассмотрены все случаи проявления инцидента. Карта имеет вид последовательности окружностей вокруг установки, для каждой из которых определено значение индивидуального риска.

Проведенное выше обсуждение включало процедуры для вычисления индивидуального риска во всех географических точках, окружающих установку, что позволяет построить карту с контурами риска. Разработка таких мер индивидуального риска требует знания о местной популяции только в той степени, в которой на эту популяцию могло бы повлиять возникновение опасности при, например, воспламенении источника с образованием облака.

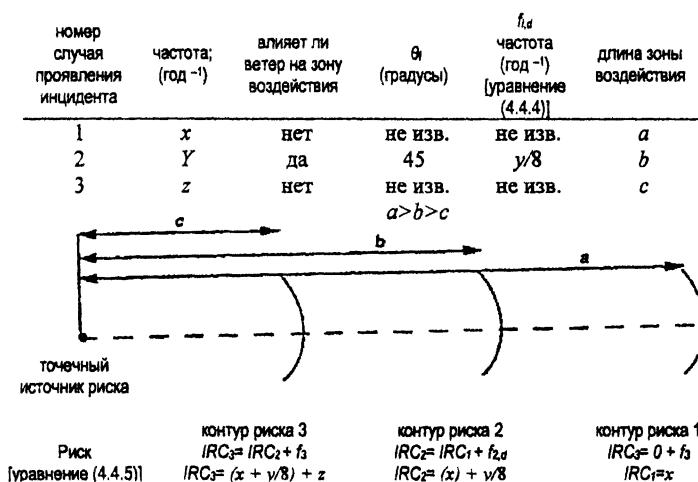


Рис. 4.4.3 Иллюстрация упрощенной процедуры вычисления индивидуального риска с рисунка 4.4.2. На первый и третий случаи проявления инцидента направление ветра не влияет. Второй случай проявления инцидента зависит от направления ветра.

Максимальный индивидуальный риск. Максимальный индивидуальный риск определяется посредством оценивания индивидуального риска во всех точках, где действительно присутствуют люди, с нахождением результатов, соответствующих максимальному индивидуальному риску,

Средний индивидуальный риск (для популяции, подверженной риску). Средний индивидуальный риск (для популяции, подверженной риску) определяется усреднением индивидуального риска по всем лицам, подвергающимся риску от установки. В первую очередь необходимо определить популяцию, на которую будет воздействовать хотя бы один случай проявления инцидента. Следует установить число людей в каждой точке в пределах самого отдаленного контура риска. Средний индивидуальный риск (для популяции, подверженной риску) вычисляется следующим образом:

$$IR_w = \sum_{xy} IR_{xy} P_{xy} / \sum_{xy} P_{xy} \quad (4.4.6)$$

где IR_w – средний индивидуальный риск для популяции, подверженной риску (в год);
 IR_{xy} – средний индивидуальный риск в точке с координатами x и y (в год);
 P_{xy} – число людей в точке с координатами x и y .
 Необходимо рассматривать только те точки, в которых действительно присутствуют люди, так как для точек, в которых нет людей $P_{xy} = 0$.

Средний индивидуальный риск (для всей популяции). Средний индивидуальный риск (для всей популяции) определяется посредством усреднения индивидуального риска по всей предварительно установленной популяции без учета того, вся ли популяция подвергается риску от установки. Например, предварительно установленная популяция - это люди, находящиеся внутри предприятия, или население города, на территории которого находится это предприятие. Вычисления аналогичны тем, которые описываются уравнением (4.4.6) за тем только исключением, что в знаменателе стоит предварительно установленная численность всей популяции:

$$IR_w = \sum_{xy} IR_{xy} P_{xy} / P_T \quad (4.4.7)$$

где P_T – общая численность популяции, предварительно установленная для усреднения индивидуального риска (число людей).

Эта мера индивидуального риска должна использоваться с осторожностью, поскольку полученное значение может оказаться очень низким из-за того, что в вычислении учитывается большое

число людей, не подверженных риску, но включенных в предварительно устанавливаемую популяцию.

4.4.3. Коллективный риск

Вся та информация, которая требовалась для вычисления индивидуального риска, необходима и для вычисления коллективного риска; кроме того здесь используется информация о популяции, окружающей установку. Для проведения детального анализа может потребоваться следующее:

- информация о типе населения (например, население, служащие, рабочие, популяция школ и больниц);
- информация о том, в какое время дня возможно воздействие (например, для школ);
- информация о том, в какое время рабочего дня возможно воздействие (например, для промышленных и образовательных зон, а также зон отдыха);
- информация о том, какой процент времени популяция находится внутри зоны воздействия, для оценки смягчающих факторов.

Различные распределения популяции могут обрабатываться с использованием одного средневзвешенного распределения популяции, но тем самым могут быть недооценены эффекты инцидентов, которые влияют на нечастые большие собрания людей. Частота инцидента для каждого распределения популяции равно относительной вероятности возникновения этого распределения популяции, умноженной на общую частоту инцидента.

а). Общая процедура

На рисунке 4.4.4 показана общая процедура для вычисления кривой F-N коллективного риска. Вначале выполняются такие же самые шаги, что и для вычисления индивидуального риска, т.е. оценка последствий (зон воздействия) и частот. Затем необходимо объединить эту информацию с данными о популяции для оценки числа людей, на которых влияет каждый случай проявления инцидента.

Число людей, на которых влияет каждый случай проявления инцидента, определяется следующим образом:

$$N_i = \sum_{x,y} P_{xy} P_{ci} \quad (4.4.8)$$

где N_i – число смертельных исходов из-за i -го случая проявления инцидента;
 $P_{x,y}$ – число людей в точке с координатами x и y , а p_{ii} определяется уравнением (4.4.2).

Необходимо определить число людей, на которых влияют все случаи проявления инцидента, получив в результате список всех случаев проявления инцидента, каждый со своей частотой (получаемой из анализа частот), и числом людей, на которых он воздействует. Затем эта информация должна быть преобразована к интегральному частотному виду для того, чтобы можно было бы построить кривую F-N.

$$F_N = \sum_i F_i \text{ для всех } i\text{-х случаев проявления инцидента, для которых } N_i \geq N$$

где F_N – частота всех случаев проявления инцидента, воздействующих на N или большее число людей;
 F_i – частота всех i -х случаев проявления инцидентов;
 N_i – число людей, на которых воздействует i -й случай проявления инцидента.

В результате получается набор данных, задающих F_N как функцию от N , которые затем вычерчиваются (обычно на логарифмическом графике) с целью получения кривой F-N.

Факторы смягчения (укрытие, убежище и эвакуация) могут быть включены в вычисления коллективного риска. Эти факторы уменьшают вероятность смертельных случаев (параметр p в уравнении (4.4.2)). Они будут различаться в зависимости от типа инцидента (например, пожар, взрыв, выброс токсина) и его продолжительности.

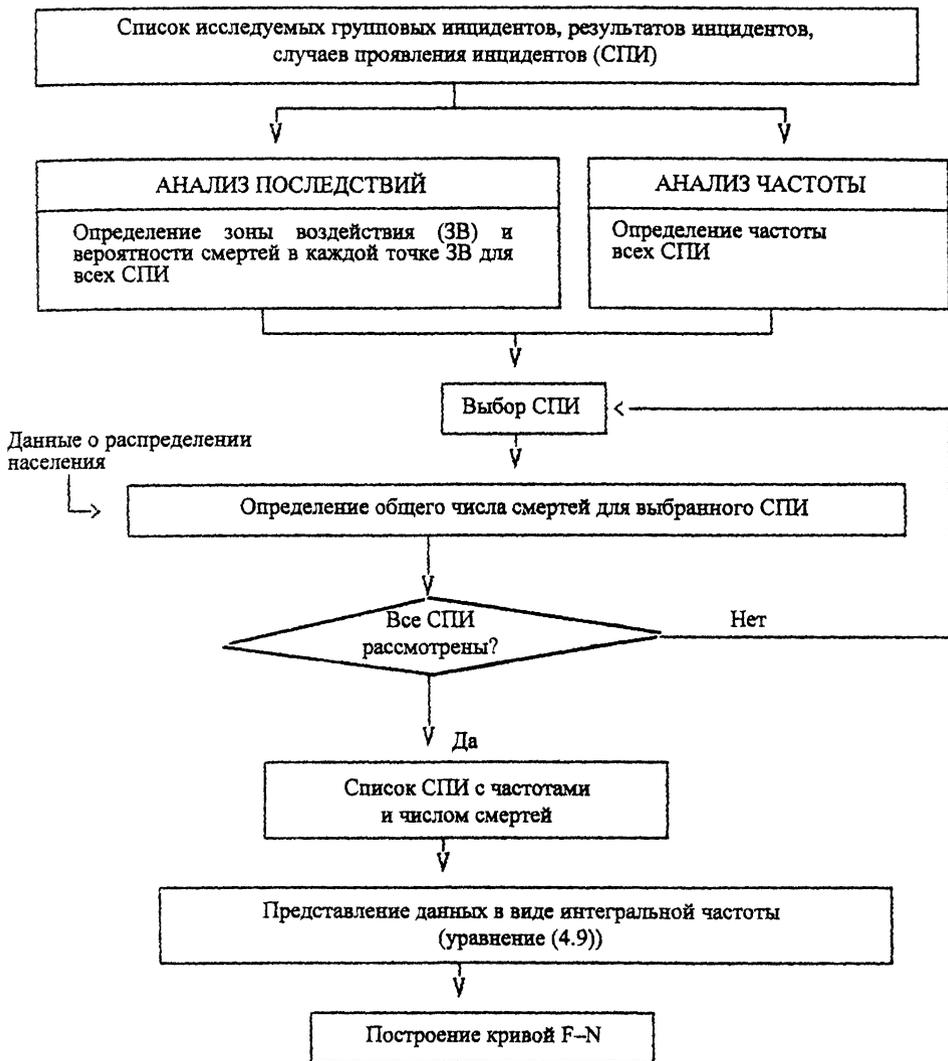


Рис. 4.4.4. Общая процедура для вычисления кривых F-N общественного риска.

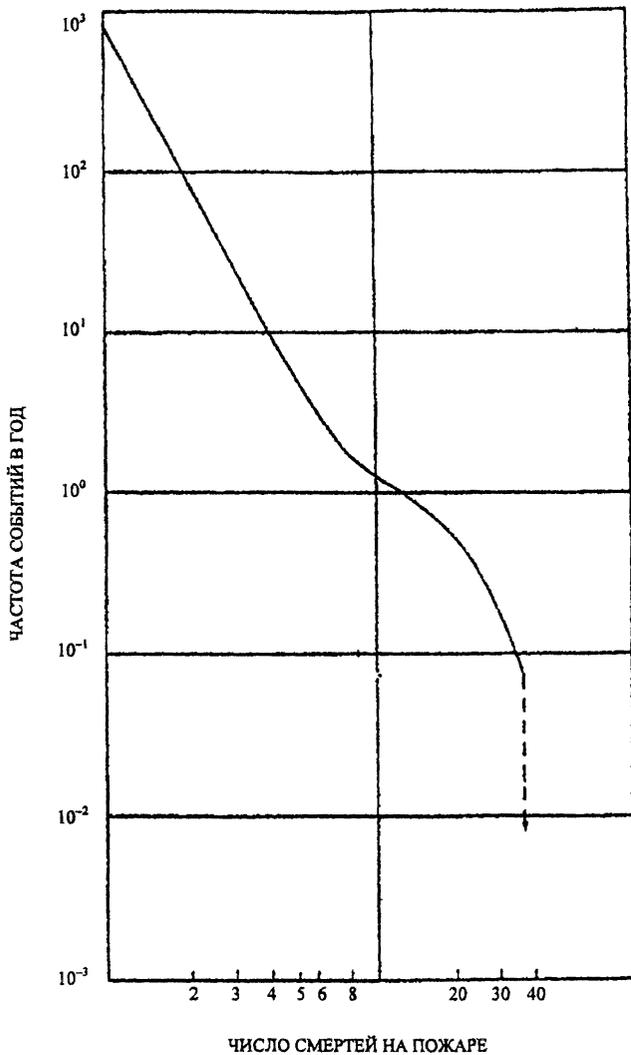


Рис. 4.4.5. График кривой F-N, построенный по статистическим данным о пожарах в Великобритании в 1968-1980 гг. Из (Маршалл, 1989).

4.4.4 РАСЧЕТ ИНДЕКСОВ РИСКА

а). Средний Показатель Смертности (СПС)

Средний Показатель смертности - это мера общественного риска, не относящаяся ни к какому конкретному лицу в каком-нибудь конкретном месте. Он может быть вычислен по следующей формуле:

$$\text{СПС} = \sum_{i=1}^n f_i N_i \quad (4.4.10)$$

- где f_i – частота i -го случая проявления инцидента (в год);
 N_i – число смертельных случаев, произошедших из i -го случая проявления инцидента;
 n – число исследуемых случаев проявления инцидента.

б). Индекс Индивидуальной Опасности (Частота Смертельных Несчастных Случаев (ЧСНС))

Единственным числовым различием между Частотой Смертельных Несчастных Случаев и Средним индивидуальным риском является период времени. Следовательно, в уравнение для расчета IR_{av} следует ввести коэффициент $1,14 \times 10^4$ (10^8 часов подвергания риску в год):

$$\text{ЧСНС} = IR_{av} (1,14 \times 10^4) \quad (4.4.11)$$

- где ЧСНС – Статистика Смертельных Несчастных Случаев (число смертельных исходов/ 10^8 часов подвергания риску);
 IR_{av} – Средний Индивидуальный Риск (в год) (из уравнения (4.4.6)).

Такое определение индекса индивидуальной опасности относится к людям, которые остаются в фиксированном месте, где индивидуальный риск является константой по времени. Для людей, которые передвигаются по зоне воздействия, индекс индивидуальной опасности вычисляется как взвешенное по времени среднее из ЧСНС в каждой точке, где человек проводит время. Исторически, полученное значение индекса индивидуальной опасности использовалась для оценивания риска, которому подвергаются работники.

в). Индекс Удельной Смертности

Наиболее простым методическим подходом к оценке потенциальной опасности промышленных объектов является концепция «удельной смертности». Удельная смертность для некоторой опасности [Маршалл, 1989] – это число погибших в результате этой опасности, отнесенное к количеству опасного вещества:

$$M = N / G, \quad (4.4.12)$$

где N – число погибших при реализации опасности, связанной с некоторым опасным веществом, чел.;

G – масса опасного вещества, вовлеченного в реализацию опасности, тонн;

M – удельная смертность данной опасности, чел/т.

Приводятся соотношения, позволяющие оценить поражающие действия при взрывных превращениях облаков топливо-воздушных смесей (ТВС) массой G :

$$M(G) = 3 \cdot G^{-0,333}, \quad (4.4.13)$$

$$N(G) = 3 \cdot P \cdot G^{0,666} \quad (4.4.14)$$

где P – плотность населения, тыс. чел/км².

Очевидно, что наиболее надежный способ оценки индекса смертности заключается в исследовании статистики реальных аварий. В таблице 4.4.1 приведены данные об удельной смертности для аварий с выбросом хлора, аммиака, метилизоцианата и других химических веществ [7].

Таблица 4.4.1

СДЯВ	Индекс смертности, чел/т промышленные объекты, хранилища
Хлор	0,50
Аммиак	0,05
Сероводород	0,20
Сернистый газ	0,13
Треххлористый фосфор	0,20
Метилизоцианат	12,5

Данные таблицы 4.4.1 справедливы при отсутствии у людей средств индивидуальной защиты

Индекс удельной смертности имеет следующие объективные преимущества:

- потенциальная опасность объектов может быть оценена при использовании минимальной исходной информации и в короткие сроки;
- концепция инварианта по отношению к природе объекта;
- применение не требует высокой квалификации.

К основным недостаткам следует отнести:

- применение не позволяет оценивать частотные характеристики аварии;
- концепция основана на обобщении статистических данных о последствиях аварий, при этом не учитываются особенности реализации сценариев промышленных аварий.

4.4.5. ПОКАЗАТЕЛИ РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ (УПРОЩЕННЫЙ ПОДХОД) [8]

Американское агентство по защите окружающей среды (EPA) предлагает использовать в процедуре оценки риска воздействия различных загрязнителей на здоровье населения упрощенный подход, основанный на концепции единичного риска. Единичный пожизненный риск есть риск для индивидуума от воздействия концентрации 1 мкг/м^3 воздушного загрязнителя или 1 нг/л водного загрязнителя в течение 70 лет или времени жизни.

$\text{Риск} = \{\text{Концентрация}\} \times \{\text{Единичный Риск}\} \times \{\text{Время Воздействия}\} / 70 \text{ лет}$

4.5. Неопределенность, чувствительность и важность

Неопределенность, чувствительность и важность – это центральные вопросы, которые возникают при использовании результатов риска.

4.5.1. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ

Ниже перечислены источники неопределенности в Количественном анализе риска химических процессов. Неопределенность моделей отражает слабости, недостатки и неадекватности, свойственные модели, и является мерой степени того, насколько плохо реальность представлена в модели. Неопределенности во входных параметрах модели происходят из-за неполноты имеющихся данных и

необходимости заполнения пробелов посредством оценки, вывода или мнения экспертов.

В настоящее время большее внимание уделяется неопределенностям в данных, чем неопределенностям в моделях или в качестве оценок, поскольку существуют математические методы для анализа таких неопределенностей в количественных терминах. Эти методы основываются на теории вероятностей и статистике. Неопределенности в моделях и в качестве оценок в меньшей степени поддаются количественному анализу и часто обрабатываются посредством анализа чувствительности.

Источники неопределенности в Количественном Анализе Риска Химических Процессов:

Описание системы

Описание процесса или его схемы некорректны или не соответствуют данным

Процедуры не представляют фактическую операцию

Карты местности и данные о популяции могут быть некорректны или в них не учтены все данные

Погодные данные из ближайшего доступного места могут быть несоответствующими действительности

Идентификация опасности

Распознавание основных опасностей может быть неполным

Методы скрининга, разработанные для выбора опасностей с целью дальнейшей оценки, могут не учитывать важные случаи

Методы анализа последствий

Неопределенности в физическом моделировании

Выбор несоответствующей модели

Некорректная или неадекватная физическая база для модели

Неадекватное обоснование

Неточные параметры модели

Неопределенности в данных для физических моделей

Входные данные (состав, температура, давление)

Исходные слагаемые для дисперсии и других моделей

Неопределенности в моделировании эффектов

Данные для животных не подходят для людей (особенно при анализе токсичности)

Могут быть опущены эффекты смягчения

Методы анализа частот

Неопределенности в моделировании

Экстраполяция исторических данных на операции большего масштаба могут привести к тому, что будут не замечены опасности, возникающие при переходе к более крупному оборудованию

Ограничения теории деревьев отказов требуют упрощения системы

Неполнота анализа с использованием деревьев отказов и событий

Неопределенности в данных

Данные могут быть неточными, неполными или не соответствующими действительности

Данные от относительных действий могут быть непосредственно неприменимыми

Данные, генерируемые по заключениям экспертов, могут быть неточными

Оценка риска

Предположение симметрии

Роза ветров редко бывает равномерной

Предположение о равномерности распределения источников воспламенения может быть некорректным

Возможно, нельзя рассматривать один точечный источник для всех инцидентов.

Упрощения для уменьшения глубины обработки

Ограниченное число случаев воспламенения уменьшит точность

Для аналитика, а также для тех, кто будет использовать полученные результаты важна идентификация "вкладов" в общую неопределенность, изоляция неопределенностей, возникающих из-за качества используемой в исследовании базы данных, от тех неопределенностей, которые связаны с применяемыми методами и моделями, способствует возможности уменьшения неопределенности и улучшению качества оценки. Это может помочь в определении того, на что следует обратить особое внимание – на наборы данных или на

модели – для существенного уменьшения неопределенности. Конечно, существует внутренняя статистическая изменчивость в данных об отказах и такая неопределенность не может быть устранена.

Как подчеркивается Бэйбаттом (Baybutt,1986) [4] анализ и обработка неопределенности в Количественном Анализе Риска Химических Процессов (КАРПХ) включает в себя пять следующих задач:

1. Оценка и представление неопределенностей в исходных данных,
2. Распространение неопределенностей в исходных данных на протяжении всего Количественного Анализа Риска Химических Процессов.
3. Комбинация неопределенностей в выходных данных каждого из шагов методологии КАРПХ.
4. Показ и интерпретация неопределенностей в окончательной оценке риска.
5. Обработка неопределенностей при принятии решений. Все эти задачи рассматриваются в следующих разделах.

4.5.2. ОЦЕНКА И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Перед тем, как приступить к оценке неопределенности, аналитик должен определить, как наилучшим образом представить неопределенность от каждого из рассмотренных выше источников. Существуют количественные меры для неопределенностей, связанных с моделями или с качеством оценок риска, но их не так просто использовать. Однако, количественные меры неопределенностей в исходных параметрах моделей действительно существуют и просты в использовании. Такие меры основываются на теории вероятностей и статистике и включают в себя следующее:

- ожидаемое значение с некоторыми верхней и нижней границами;
- ожидаемое значение со стандартным отклонением;
- функция распределения вероятностей;
- ожидаемое значение с доверительным интервалом.

Эти меры могут быть определены с использованием статистических методов при наличии данных, в достаточной степени относящихся к делу. Однако, часто имеющихся данных недостаточно, они могут требовать адаптации или расширения в соответствии с мнением эксперта. Следовательно, база данных количественного анализа риска химических процессов может включать в себя как

объективные, так и субъективные данные. Существуют два статистических подхода к оценке такой базы данных: классический или объективный подход и Байесов или субъективный подход. Главное различие между этими подходами заключается в том, как они интерпретируют вероятность. В Байесовом подходе "догадка" эксперта признается априорной вероятностью, Затем эта вероятность изменяется по мере сбора данных. Классический подход не допускает никакого смещения в мнении эксперта. Это различие влияет на интерпретацию мер неопределенности, вычисленных с использованием аналитических средств каждого из этих подходов.

4.5.3. ЗНАЧЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Существует два важных способа использования оценок риска: абсолютный и относительный. Абсолютное использование оценок риска основано на сравнении конкретных значений оцененного риска с некоторыми целевыми значениями; оно в большей степени чувствительно к неопределенности.

Использование оценок риска в относительном смысле часто обладает намного меньшей чувствительностью к ошибке. Фактическое расположение контура риска или значение оценки риска не используется. Вместо этого, исследуется изменение риска в соответствии с некоторым другим изменением (например, альтернативный проект или мероприятие по смягчению опасности). Поскольку для расширения возможностей оценивания различных рассматриваемых альтернатив используются те же самые методологии и предположения, результирующие оценки риска подвержены аналогичным неопределенностям. Таким образом, относительное ранжирование различных альтернатив может испытывать меньшее влияние неопределенности, чем абсолютное значение меры риска.

4.5.4. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Когда пользователи количественного анализа риска химических процессов хотят получить некоторую оценку неопределенности конечного результата, исследование чувствительности может оказаться самым простым и наиболее экономичным подходом. Анализ чувствительности может идентифицировать основные потенциальные вклады в общую неопределенность от большого числа инцидентов. Он также может определить, какие модели, предположения и данные важны для окончательной оценки риска.

Чувствительность (S_j) к параметру j определяется как изменение меры риска на единицу изменения этого параметра, т.е.:

$$S_j = \Delta R_j / \Delta P_j \quad (4.5.1)$$

где ΔR_j – изменение меры риска в результате изменения j-го параметра модели;
 ΔP_j – изменение j-го параметра модели.

Например, 10%-ное изменение интенсивности отказов внутренней блокировки (ΔP_j) может изменить риск в 2 раза (ΔR_j). Чувствительность меры риска к интенсивности отказов внутренней блокировки составит

$$S_{\text{блокировка}} = 2/0,1 = 20 \quad (4.5.2)$$

Теоретически, аналитик может проверить чувствительность меры риска к каждому параметру. На практике для большинства подходов количественного анализа риска химических процессов это оказывается неприемлемым из-за большого числа учитываемых параметров. Однако, может быть определена чувствительность к параметрам, важность которых предполагается или про которые известно, что они обладают высокой степенью неопределенности. Параметр модели, который оказывает наибольшее влияние на риск, имеет и наибольшую чувствительность.

4.5.5. ВАЖНОСТЬ

Идентификации основных вкладов в риск - это одно из самых важных направлений в использовании количественного анализа риска химических процессов.

Вообще говоря, общий риск (R) является суммой рисков от всех случаев проявления инцидентов (R_i):

$$R = \sum_{i=1}^n R_i \quad (4.5.3)$$

"Вкладчики" риска (например, случаи проявления инцидентов) могут быть отсортированы по своей важности:

$$[R_1, R_2, \dots, R_n] \text{ так, что } R_1 \geq R_{i+1} \quad (4.5.4)$$

В результате получается список всех инцидентов в порядке убывания их важности. Представление инцидентов в табличном виде с ранжированием их в порядке убывания тех вкладов, которые они вносят в риск, может оказаться очень эффективным представлением результатов исследования. Оно также очень четко показывает наиболее важные инциденты, "высвечивая" их как места, где усилия по уменьшению риска могут стать наиболее эффективными.

Важность вкладов, вносимых инцидентами, относительно просто определяется для индивидуального риска. Как указывалось выше, форма контуров часто позволяет наглядным образом найти ключ к ответу на этот вопрос, давая представление о том, как распределяются опасности на местности.

ЛИТЕРАТУРА К РАЗДЕЛУ 4

1. Lees F.P. Lees F.P. Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification, Assessment and Control. – 2 Rev. ed. London: REPP Ltd, 1996, v.2 – 988 p.
2. Lees F.P. Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification, Assessment and Control. – London: ButterWorths, 1980. – 671 p.
3. Маршалл В. Основные опасности химических производств. Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 672 с.
4. Guidelines for Hazard Evaluation Procedures with Worked Examples. 2nd Edition. – N.Y.: AICE, 1992. – 461 p.
5. Reidel D. Report of Rijmond Public Authority Risk Analysis of Six Potentially Hazardous Industrial Objects in the Rijmond Area. A Pilot Study. – Holland, Dorderecht: Publishing Company, 1982.
6. Marshall V.C. How Lethal Are Explosions and Toxic Escapes? The Chemical Engineer. August 1977.
7. Елохин А.Н. Анализ и управление риском: теория и практика. – М.: СГ Лукойл, 2000. – 186 с.
8. Меньшиков В.В., Швыряев А.А., Захарова Т.В. Анализ риска при систематическом загрязнении атмосферного воздуха опасными химическими веществами. Учебн. пособ. – М.: Изд-во Химич. фак. Моск. ун-та, 2003, 120с.

ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ К РАЗДЕЛУ 4

1. Понятие «оценка риска».
2. Меры риска (индексы риска, индивидуальный риск, коллективный риск).
3. Способы представления значений риска. Факторы, влияющие на выбор способа представления значений риска, факторы, влияющие на выбор способа представления.
4. Подходы к вычислению оценки индивидуального риска.
5. Общая процедура для вычисления кривых F-N-диаграмм общественного риска.
6. Каков риск для человека, который в течение 5 лет пьет питьевую воду со средней концентрацией хлороформа, равной 5 мг/л?
7. Источники неопределенности в количественном анализе риска химических процессов.
8. Значение неопределенностей при использовании оценок риска в двух важных способах (абсолютный и относительный).
9. Ранжирование основных вкладов в общий риск.