

УДК 389.17:006  
ББК 69.68  
К 59

Рецензенты:

ведущий научный сотрудник Института аграрных проблем РАН  
доктор эконом. наук С.А. Андриященко,  
заведующий лабораторией надежности и взрывобезопасности  
ДОО «ВНИПИГаздобыча»,  
канд. техн. наук, ст. научн. сотр. В.А. Сорокованов

Одобрено

редакционно-издательским советом  
Саратовского государственного технического университета

Козлитин А.М., Попов А.И.

К 59 Методы технико-экономической оценки промышленной и экологической безопасности высокорисковых объектов техносферы. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. 216 с.

ISBN 5-7433-0733-4

Рассмотрены методы технико-экономической оценки промышленной и экологической безопасности высокорисковых объектов техносферы.

Книга адресована инженерам и экологам, экономистам и менеджерам, работникам государственных органов власти, специалистам в области промышленной безопасности, студентам и аспирантам технических и экономических вузов.

УДК 389.17: 006  
ББК 69.68

© Саратовский государственный  
технический университет, 2000  
© Козлитин А.М., Попов А.И., 2000

ISBN 5-7433-0733-4

<http://risk-2005.narod.ru/>

[kammov@gmail.com](mailto:kammov@gmail.com)

## Глава 2

# МЕТОДОЛОГИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ИНТЕГРИРОВАННОГО РИСКА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ ТЕХНОСФЕРЫ

Как известно, сооружение и функционирование энергонасыщенных и химически опасных промышленных объектов всегда сопряжено с риском разрушительного высвобождения собственного энергозапаса или неконтролируемого выброса химически опасных веществ, что может привести к потерям материальных ценностей, гибели людей и окружающей природной среды.

Достаточно назвать аварии на АЭС Три-Майл-Айленд (США), в Чернобыле (Украина), в Хамме (Германия), на химических предприятиях в Фликсборо (Великобритания), Севезо (Италия), Мехико (Мексика), Бхопале (Индия) и Базеле (Швейцария), крупные транспортно-промышленные катастрофы в Арзамасе, Свердловске, под Уфой (Россия).

При этом ущерб от возможных аварий может быть выше финансовых возможностей предприятия, и носит случайный характер.

Именно в этих условиях возникает необходимость в экологическом страховании и страховании гражданской ответственности потенциально опасных предприятий. Использование страхового механизма позволяет компенсировать негативные последствия аварийного, крупномасштабного воздействия на окружающую природную среду, население и прилегающие территории, повысить тем самым финансовую устойчивость предприятия [269,270].

Экономические методы управления риском и регулирование промышленной безопасности потенциально опасных объектов возможны при условии введения экономической ответственности государственных, акционерных, частных компаний, а также отдельных предпринимателей за ущерб, который они могут нанести в результате аварии или катастрофы на управляемых ими производствах.

В международной практике такая ответственность закреплена законодательно в принятой странами ЕЭС «Директиве по Севезо» [275]. В России экономическая ответственность закреплена законом РФ «О промышленной безопасности...» [5]. В соответствии с этим законом, организации, эксплуатирующие опасный производственный объект, обязаны, с одной стороны страховать ответственность за причинение вреда жизни, здоровью или имуществу других лиц и окружающей природной среде в случае аварии. С другой стороны процессы страхования требуют изыскивать возможности повышения надежности, безопасности и живучести самих производственных

объектов за счет новых технических, технологических и организационных решений.

В этих условиях необходимы новые научно-технические подходы к определению целесообразности, технико-экономической обоснованности и оптимальности принимаемых инженерных решений, направленных на обеспечение промышленной безопасности, соответствующей критериям риска и удовлетворяющей направлениям экологической политики и интересам фирм-производителей [2,5].

Целесообразность инженерных решений, влияющих на экологическую и промышленную безопасность, в конечном итоге должна быть выгодной товаропроизводителю, но при выполнении всех требований нормативных документов по безопасности.

Таким образом, с одной стороны безопасность человека, требующая значительных капитальных вложений в системы промышленной безопасности, которые на первый взгляд, не приносят дохода, с другой стороны - заинтересованность товаропроизводителя в максимальной прибыли. Поэтому возникает необходимость в согласовании этих противоречивых факторов. Цель технико-экономического анализа в этом случае – найти оптимальное решение задачи, т.е. отыскать наиболее рациональное техническое или организационно-управленческое решение при максимальных финансовых результатах.

### **2.1. Критерии сопоставления и оптимизации инженерных решений с учетом влияния факторов экологической и промышленной безопасности**

Для оценки обоснованности принимаемых инженерных решений, направленных на повышение безопасности объекта используется метод сравнения, суть которого сводится к сопоставлению в сравниваемых вариантах затрат, отличающихся капитальными вложениями и ежегодными издержками, в том числе вызванными страхованием на случай аварийных и чрезвычайных ситуаций.

Введем, в соответствии с [203], целевую функцию  $\Pi$ , характеризующую эффективность рассматриваемого варианта:

$$\Pi_i = \Pi_i^* - E_{ин} K_i, \quad (2.1.1)$$

где  $\Pi_i^*$  - прибыль (доход), остающейся в распоряжении предприятия после выплаты всех затрат, налогов, дивидендов и страховых платежей в  $i$ -ом варианте, руб;  $E_{ин}$  - коэффициент эффективности капитальных вложений (инвестиций), относящийся к рассматриваемому инженерному решению, направленному на повышение экологической и промышленной безопасности, 1/год.

Вполне очевидно, что конкурирующим и возможно более приемлемым является тот вариант, для которого выполняется соотношение:

$$П_6 < П_i, \quad (2.1.2)$$

где  $П_6$  - целевая функция базового варианта.

Следовательно из множества рассматриваемых технических вариантов оптимальное инженерное решение, направленное на повышение экологической и промышленной безопасности, будет соответствовать максимуму целевой функции  $П$ , то есть:

$$П \rightarrow \max. \quad (2.1.3)$$

В случае решения оптимизационных параметрических задач, при условии непрерывности и монотонности функции  $П$ , ее экстремум по искомому параметру  $X$  может определяться аналитически:

$$\frac{\partial П}{\partial X} = 0; \frac{\partial^2 П}{\partial X^2} < 0 \quad (2.1.4)$$

В качестве искомого параметра могут быть самые различные параметры рабочих тел (характеристики оборудования, схемные решения), в системах и комплексах, влияющих на уровень безопасности рассматриваемого варианта.

При получении целевой функции  $П$  не накладывалось никаких ограничений с точки зрения специфики решаемых задач, поэтому любая задача, связанная с технико-экономическим обоснованием инженерных решений, направленных на изменение безопасности объекта, может решаться на основе использования предложенного критерия. Естественно основную трудность представляют последующие этапы, вскрывающие взаимосвязи между техническими, технологическими, конструктивными и стоимостными показателями в реальных условиях функционирования экономики.

Чтобы завершить с методологической точки зрения постановку задачи об оптимизации управления безопасностью, требуется выявить управляющие переменные в целевой функции  $П$ , изменение которых позволило бы достичь условия максимальности этой функции.

С этой целью величину прибыли, остающуюся в распоряжении предприятия в современных рыночных условиях с учетом платежей, связанных с обязательным страхованием на случай аварийных и чрезвычайных ситуаций запишем в следующем виде [108,109,113]:

$$П^* = (R_{п} - З_s)(1 - \gamma_H)(1 - \xi_{yy}) - З_M - H_R - H_{\Sigma}, \quad (2.1.5)$$

где  $R_{п}$  - выручка от реализации продукции, руб/ год;  $З_s$  - ежегодные издержки производства, относимые на себестоимость продукции, руб/ год;  $\gamma_H$  - функция, учитывающая систему федеральных, республиканских, региональных и местных налогов;  $\xi_{yy}$  - функция, учи-

тывающая условия участия учредителей в распределении прибыли;  $Z_M$  - материальные и другие затраты, не включаемые в состав себестоимости, руб/год;  $H_\Sigma$  - суммарные дополнительные налоги и платежи, включающие плату за кредит, за землю, за сверхнормативное загрязнение окружающей среды и другие, руб/год;  $H_R$  - сумма выплат страховой компании в соответствии с договором на случай аварийных и чрезвычайных ситуаций, интерпретируется нами как интегрированный риск, руб/год.

С учетом (2.1.5) выражение (2.1.1) перепишем в следующем виде:

$$\Pi = R_{\Pi} (1 - \gamma_H)(1 - \xi_{\Sigma Y}) - [Z_S(1 - \gamma_H)(1 - \xi_{\Sigma Y}) + Z_M + H_R + H_\Sigma + E_{\text{ИНК}}], \quad (2.1.6)$$

В уравнении (2.1.6) выражение, заключенное в квадратные скобки обозначим  $Z_{\text{ПР}}$ . Данная величина рассматривается нами, как приведенные затраты в условиях функционирования рынка на данной территории, учитывает как систему федеральных, региональных и местных налогов, платежей, так и рыночные требования к конкурентоспособности производителя [108,109,113]. Кроме того, данная величина показывает в стоимостном виде влияние факторов экологической и промышленной безопасности в форме интегрированного риска.

Для наглядности предлагаемого методологического подхода представим  $Z_{\text{ПР}}$ , как сумму следующих составляющих:

$$Z_{\text{ПР}} = H_K + H_R, \quad (2.1.7)$$

где  $H_R$  - интегрированный риск в стоимостном выражении, руб/год;  $H_K$  - составляющая приведенных затрат, определяющих достижение выбранного уровня безопасности (за счет дополнительных капитальных вложений), руб./год.

Вполне очевидно, что для случая, когда оказываются постоянными стоимость реализуемой продукции ( $R_n = \text{const}$ ), доля налоговых отчислений ( $\gamma_H = \text{const}$ ), неизменными от искомого параметра условия участия в прибыли ( $\xi_{\Sigma Y} = \text{const}$ ), экстремум целевой функции  $\Pi$  будет определяться:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial X} = -\frac{\partial Z_{\text{ПР}}}{\partial X} = 0; \quad \frac{\partial^2 \Pi}{\partial X^2} = -\frac{\partial^2 Z_{\text{ПР}}}{\partial X^2} < 0 \quad (2.1.8)$$

Поскольку в уравнениях (1.1.8) вторые производные оказываются равными, но противоположными по знаку, то максимуму функции  $\Pi$  в данном случае соответствует минимум приведенных затрат.

Характер изменения затрат при обосновании уровня безопасности показан на рис.2.1.1. Как видно из рисунка уменьшение инвестиций в технические системы безопасности приводит к увеличению интегрированного риска, что вызывает дополнительные расходы на обязательное страхование ответственности. Для определения оп-

тимального решения поставленной задачи необходимо установить функциональную зависимость затрат на создание и эксплуатацию технических систем безопасности и обязательное страхование от искомого параметра.

Величина  $H_R$  интерпретируется как интегрированный риск полного ущерба в стоимостном выражении включающий социальную, экологическую и материальную составляющие. Методика определения интегрированного риска промышленных технологических установок подробно изложена в последующих разделах.

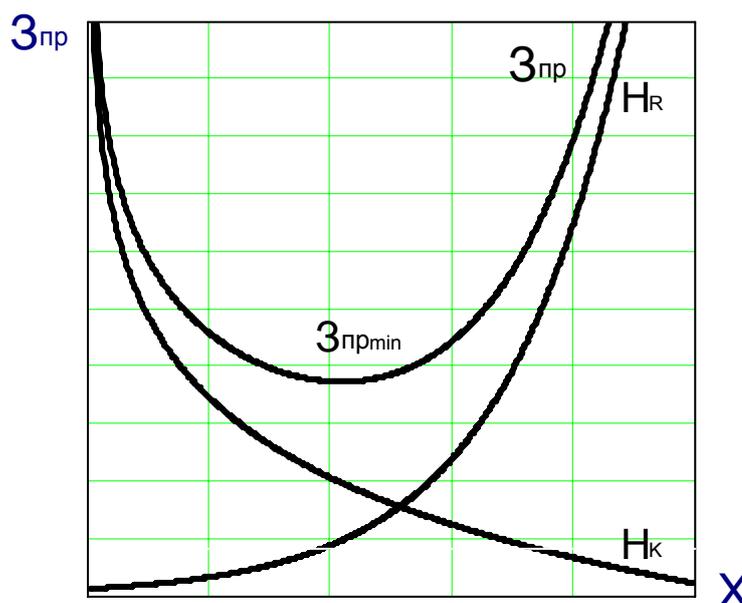


Рис. 2.1.1. Изменение суммарных и составляющих затрат в зависимости от искомого параметра безопасности

В реальных условиях, как правило, выпуск полезной продукции в сравниваемых вариантах оказывается различным. Могут быть различными надежность сравниваемых вариантов, социальные условия работающих и другие показатели.

В этом случае в целевую функцию при необходимости вводятся, так называемые, предельные затраты на соответствующие замещаемые производства, резервные установки и другие системы ( $\Delta Z_{прд}$ ). Предельные затраты - это будущие затраты, отличающиеся от нынешнего уровня рыночных цен и учитывающие тенденции в исчерпании прочностных и природных ресурсов, современной экономики.

В реальных условиях при технико-экономическом сравнении вариантов необходимо учитывать фактор времени. В этом случае величина целевой функции за период функционирования объекта описывается следующим выражением:

$$\Pi_T = \sum_{t=0}^T (\Pi_0 \pm \Delta Z)_t \cdot \beta^t e^{\ln(1+E_{инт}) \cdot t}, \quad (2.1.9)$$

где индекс  $t$  означает рассматриваемую величину в год  $t$  расчетного периода  $T$ , лет;  $\beta$  - коэффициент учитывающий инфляцию;  $\Delta Z$  - предельные затраты, учитывающие тенденции в изменении уровня безопасности;  $\Pi_0$  - целевая функция, рассчитанная по выражению (2.1.6) без учета исчерпания ресурсов.

Изложенные подходы были опробованы в реальных условиях функционирования крупного потенциально опасного промышленного объекта по производству продуктов органического синтеза и позволили выполнить технико-экономическое обоснование и оптимизацию инженерных решений при размещении складов пропилена и аммиака [109,118].

## 2.2. Методика определения интегрированного риска потенциально опасных объектов техносферы

При технико-экономической оценки промышленной и экологической безопасности высокорисковых объектов, как следует из вышеизложенного, в качестве целевой функции  $\Pi$  рассматривается чистая прибыль предприятия. В качестве управляющей переменной в данной функции, изменение которой позволило бы отыскать наиболее рациональное техническое или организационно-управленческое решение по промышленной безопасности при максимальных финансовых результатах, предлагается использовать **интегрированный риск** – комплексный показатель безопасности, выраженный в едином стоимостном эквиваленте.

Решение поставленной задачи потребовало реализации на практике методов количественной оценки интегрированного риска.

Разработанная нами [108,109,113] математическая модель интегрированного риска, включающую социальную, материальную и экологическую составляющие, в предлагаемой методике имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[ \sum_{k=1}^{\alpha} R_{ijk}(Y_c) + \sum_{r=1}^{\omega} R_{ijr}(Y_M) + \sum_{l=1}^g R_{ijl}(Y_3) \right], \\ R_{ijk}(Y_c) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij}(E_c) S_j \gamma_j \left( ЦСЖ + \sum_{k=1}^{\alpha-1} R_k \cdot Y_{tk} \right), \\ R_{ijr}(Y_M) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{r=1}^{\omega} R_{ij}(E_M) Y_{Mijr}, \\ R_{ijl}(Y_3) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^g R_{ij}(E_3) \cdot Y_{3ijl}, \end{array} \right. \quad (2.2.1)$$

где  $H_R$  – интегрированный риск;  $R_{ijk}(Y_c)$  - риск социального ущерба ( $Y_c$ )  $k$  - го вида в  $j$  - й зоне риска при реализации  $i$  - го поражающего воздействия;  $R_{ijr}(Y_M)$  - риск материального ущерба  $r$  - го вида в  $j$  - й

зоне риска при реализации  $i$  - го поражающего воздействия;  $R_{ijl}(Y_{\text{Э}})$  - риск экологического ущерба  $i$  - го вида в  $j$  - й зоне риска при реализации  $i$  - го поражающего воздействия;  $Y_M, Y_{\text{Э}}$  - соответственно материальный и экологический ущерб;  $R_k$  и  $Y_{mk}$  - риск ущерба и ущерб от возможных травм  $k$  - й степени тяжести;  $\gamma_j$  и  $S_j$  - плотность населения и площадь  $j$  - й зоны риска; ЦСЖ - цена спасения жизни;  $n$  - число возможных поражающих факторов, формирующихся в результате реализации на объекте существующих опасностей (взрыв, пожар, выбросы химически опасных веществ);  $m$  - число рассматриваемых зон риска, расположенных в пределах круга вероятного поражения;  $\alpha$  - число видов социального ущерба - летальные исходы, поражения тяжелой, средней и легкой степени;  $\omega$  - число составляющих материального ущерба;  $g$  - число составляющих экологического ущерба;  $R(E)$  - потенциальный риск возникновения чрезвычайной ситуации реципиентам вида  $E$ .

Интегрированный риск ( $H_R$ ) рассматривается нами как многофакторная функция, объединяющая в себе риски социального, материального и экологического ущербов.

Риск социального ущерба (социальный риск)  $R_{ijk}(Y_c)$  учитывает масштаб воздействия, выражающийся в летальных исходах и поражениях людей тяжелой, средней и легкой степени. При определении потерь общества от возможных смертельных исходов  $R(Y_c)$  человеческая жизнь должна оцениваться в стоимостном выражении. В качестве такой величины используется цена спасения жизни (ЦСЖ), для обоснования которой в настоящее время применяется, по крайней мере, пять подходов с последующим сопоставлением полученных значений. В обобщенном виде ЦСЖ понимается как средневзвешенная по наиболее значимым и рисковым областям и сферам жизнедеятельности величина затрат для дополнительного спасения жизни каждого следующего индивидуума. Цена спасения жизни относится к разряду тех величин, которые принципиально не могут быть вычислены с большой точностью. Поэтому, учитывая значительную неопределенность данной величины, предлагается при расчетах брать несколько уровней значения ЦСЖ.

Для определения риска ущерба от возможных травм различной тяжести вводится взвешивающий коэффициент  $K_k$ , сопоставляющий  $k$ -ю степень поражения (нетрудоспособность, серьезная травма, травмы средней и легкой тяжести) со смертельными исходами и учитываются затраты на восстановление трудоспособности индивидуума с  $k$ -й степенью поражения  $Y_{tk}$ .

Методы определения ЦСЖ и количественная оценка коэффициента  $K_k$  подробно рассмотрены нами в работах [54,83,109].

При определении риска материального ущерба (материального риска)  $R_{ijr}(Y_M)$  в качестве критерия, определяющего ожидаемый

уровень нанесенного ущерба материальному «объекту», рассматривается потеря им устойчивости к воздействию поражающих факторов. Под устойчивостью понимается предельная величина поражающего фактора, до которой рассматриваемое оборудование, аппараты, здания и сооружения сохраняют ремонтпригодность или возможность восстановления при капитальном ремонте.

При оценке риска экологического ущерба (экологического риска)  $R_{ij}(Y_{\text{э}})$  окружающая природная среда рассматривается в виде системы, состоящей из трех основных компонентов: литосферы, гидросферы и атмосферы. При этом ожидаемый экологический ущерб в стоимостном эквиваленте, в ряде случаев, определяется величиной сверхлимитного загрязнения указанных составляющих экосистем.

Потенциальный риск  $R(E)$ , входящий в качестве множителя в уравнения (2.2.1), является количественной мерой опасности и характеризуется пространственным и временным распределением частоты реализации поражающего воздействия на прилегающей к потенциально опасному объекту территории. Данная мера опасности выражает собой потенциал максимально возможного риска поражения реципиента (человека, материальных объектов, экосистем) в рассматриваемой точке пространства при условии, что вероятность нахождения реципиента риска в этой же точке равна единице. По величине потенциального риска поражения человека и вероятности нахождения среднестатистического индивидуума в данной точке рассматриваемой территории рассчитывается индивидуальный риск, величина которого может законодательно нормироваться [45,90,100,101,142]. В этой связи индивидуальный риск смерти является важнейшим индикатором уровня существующей опасности. Зная его численное значение, можно судить о степени безопасности населения на прилегающей к потенциально опасному объекту территории.

Потенциальный риск позволяет оценить рассматриваемые виды ущерба по уровню риска наступления события смерти, потери материальных ценностей или загрязнения экосистем в случае реализации исходного события, выражающегося в виде аварии или катастрофы на потенциально опасном объекте. В общем случае потенциальный риск предлагается нами [108,109,113] выразить следующей зависимостью:

$$R_{ij}(E) = \sum_{i=1}^n \int_{Q_{\min}}^{Q_{\max}} g(Q)_i P(E)_i \cdot \prod_{q=1}^M P(I_q)_i dQ, \quad (2.2.2)$$

где  $g(Q)$  - плотность распределения вероятностей (частот) реализации аварийного события;  $P(E)$  - вероятность поражения реципиента в рассматриваемой точке пространства (определяется параметри-

ческим законом поражения реципиента);  $P(I_q)$  - вероятность  $I_q$  - го случайного внешнего события;  $M$  - число учитываемых случайных внешних событий;  $[Q_{min}, Q_{max}]$  - масштаб реализации исходного события на потенциально опасном объекте.

Необходимо отметить, что потенциальный риск  $R(E)$  рассчитывается в данной методике только для негативных воздействий с явно выраженным порогом поражения. Так, например, для человека рассматриваются острые, соматико-нестохастические эффекты для его здоровья, проявляющиеся при высоких уровнях воздействия физических параметров (концентраций, потоков энергии и т.д.).

Применительно к материальным объектам, это уровни избыточного давления во фронте ударной волны и плотности теплового потока, превышение которых приводит к потере ремонтпригодности или возможности восстановления аппаратуры, оборудования, зданий и сооружений. Применительно к окружающей природной среде это сверхлимитное, необратимое загрязнение вредными веществами.

Медленно текущие процессы, так называемые «ползучие» события, например, отложенная смерть из-за ракового заболевания для человека по вине потенциально опасного объекта или постепенное разрушение несущих конструкций здания из-за утечек вредных веществ с того же объекта и т.д., здесь не рассматриваются.

Отечественный и зарубежный опыт декларирования безопасности промышленных объектов [83,90,114,122,197], показал, что одной из важных и наглядных форм представления ожидаемых последствий аварий, является картированный риск [54,90,109,116]. Картированный риск представляет выстроенные на карте изолинии потенциального риска, связанные с опасным объектом, характеризующие поле риска на прилегающей территории. По характеру распределения изолиний на топографической карте промышленного района можно видеть возможные последствия аварий, ожидаемый ущерб, разрабатывать инженерно-технические мероприятия по защите персонала, населения и окружающей природной среды, рис.2.2.1.

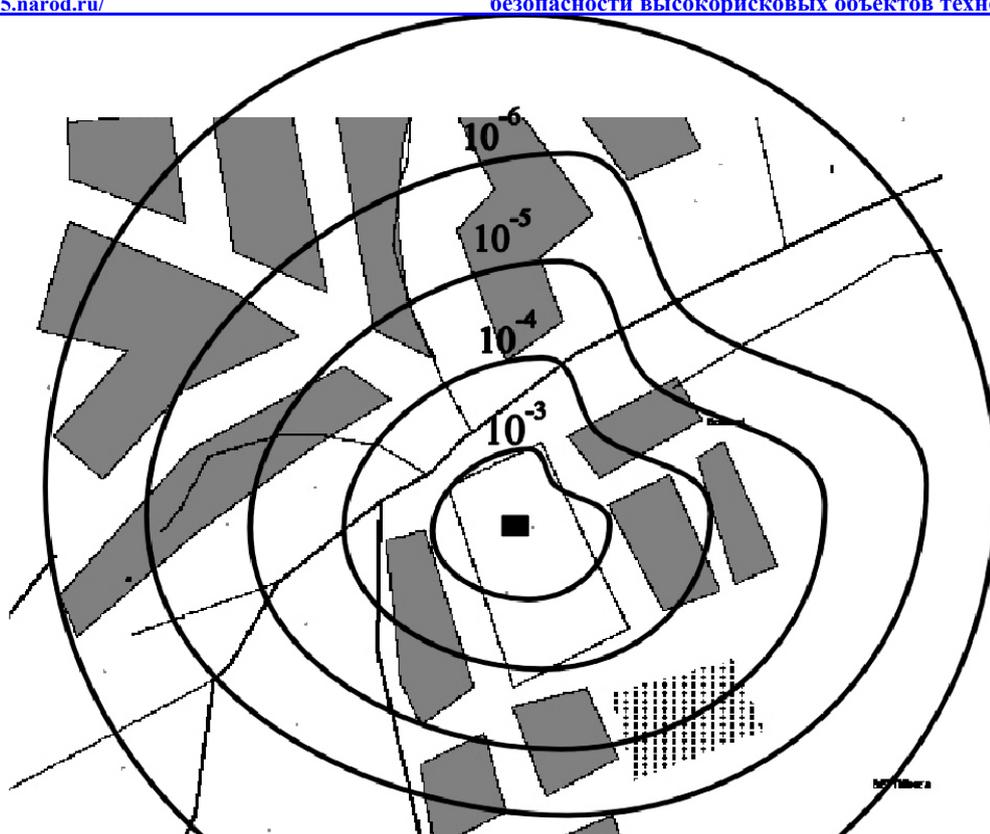


Рис. 2.2.1. Картированный потенциальный риск поражения человека на прилегающей к потенциально опасному объекту территории

Процесс исследования уровня безопасности населения и территорий может состоять из двух, в достаточной степени самостоятельных этапов.

На первом этапе количественной оценки  $R(E)$  выявляется последовательность исходных, инициирующих аварию, случайных событий и разрабатывается всё множество возможных на данном химически опасном объекте сценариев возникновения и развития аварии. Для всего спектра сценариев определяется массив данных по аварийным выбросам и частотам их появления.

Частоты каждого из сценариев рассчитываются с использованием методов построения деревьев отказов и деревьев событий, а также диаграмм причин-последствий [256]. Используя методы регрессионного анализа, для полученного массива данных определяется аналитическая модель плотности распределения частот аварийных выбросов опасного вещества на рассматриваемом объекте  $g(Q)$ , (рис.2.2.2). Как видно из рис.2.2.2 величина  $g(Q)$  распределена по мультипликативному (степенному) закону. Это подтверждает и анализ статистики, связанной с риском чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [56], показывающий, что часто на практике мы имеем дело именно с мультипликативным законом

распределения плотности частот негативных событий вида:  $f(X) = \beta \cdot X^{-\alpha}$ .

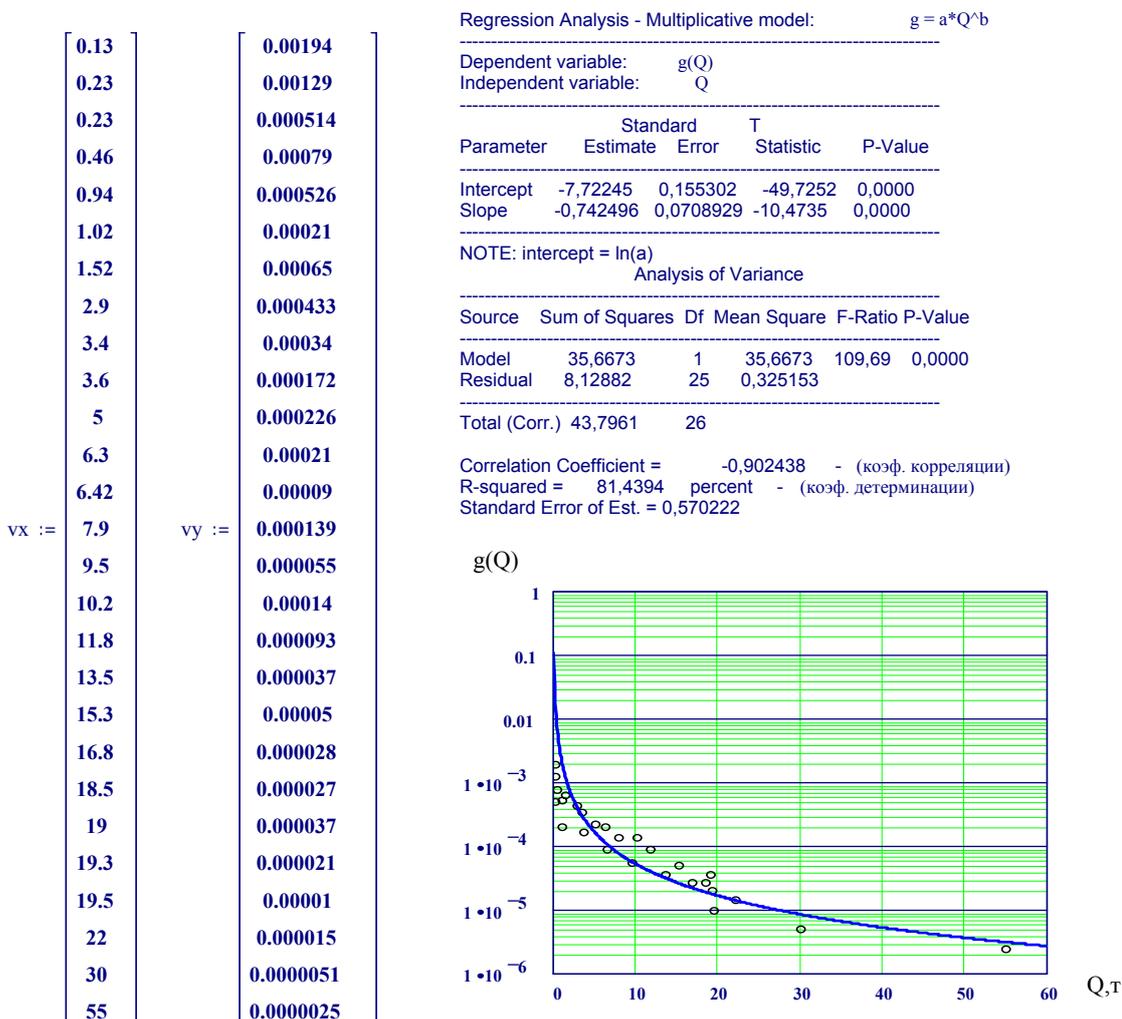


Рис. 2.2.2. Мультипликативный закон распределения плотности частот аварийных выбросов на технологической установке потенциально опасного объекта, полученный методами регрессионного анализа с использованием пакета прикладных программ Mathcad 7.0 Pro и Statgraphics Plus

На втором этапе рассматриваются события, связанные с воздействием поражающих факторов аварии на реципиента риска (человека, материальные объекты, экосистемы) в рассматриваемой  $j$ -й области прилегающей территории. При этом вероятность поражения реципиента в этой области определяется принятым в расчетах параметрическим законом поражения  $P(E)$ , зависящего от характера процесса и параметров поражающего фактора в рассматриваемой области пространства.

Знание величины поражающего фактора (избыточного давления во фронте ударной волны, концентрации опасного вещества,

плотности теплового излучения и т.д.), воздействующего на реципиента в данной точке пространства, требует в свою очередь в пределах значительного диапазона значений величины рассматриваемого поражающего фактора достоверного установления степени поражения реципиента. Это связано с тем, что последствия воздействия одной и той же величины рассматриваемого поражающего фактора будут зависеть от индивидуальных особенностей реципиента: состояния здоровья, возраста, пола, индивидуальных особенностей для человека; назначения, конструкции, используемого строительного материала, линейных размеров, степени износа для зданий и сооружений и т.д.

В связи с этим, при прогнозировании последствий аварий на потенциально опасном объекте, определив величину поражающего фактора в точке расположения реципиента можно лишь судить о вероятности его поражения.

Зависимость вероятности поражения реципиента от величины параметров поражающего фактора принято в литературе [83, 94, 116, 128, 245] называть параметрическим законом поражения.

Математическая модель и количественная интерпретация параметрического закона поражения определяются природой и конкретным механизмом действия поражающего фактора, а также видом и состоянием реципиента.

Рассмотрим более подробно конкретные параметрические законы поражения реципиентов.

### ***Определение ингаляционного токсического поражения человека парами сильно действующих ядовитых веществ при авариях на промышленных установках***

Как уже отмечалось, при решении проблем промышленной безопасности в чрезвычайных ситуациях обоснование показателей риска от какого-либо объекта проводится в пределах зоны острых воздействий. В качестве таковой для химически опасных объектов рассматривается территория, ограниченная изолинией с пороговыми значениями токсодозы  $Pct_{50}$  (количество ядовитого вещества, вызывающего при попадании в организм начальные признаки поражения).

При уровнях воздействия  $\geq Pct_{50}$  возможны с определенной вероятностью необратимые изменения в состоянии здоровья, требующие немедленного прекращения человеческой деятельности в пределах указанной территории.

Вероятность токсического поражения различной степени тяжести человека определяется при этом величиной токсодозы и принятым в расчетах параметрическим законом поражения.

Исследования специалистов Института токсикологии МЗ РФ, результаты которых приведены в [158], позволяют аппроксимировать параметрический закон острого поражения человека от воздействия сильно действующих ядовитых веществ (СДЯВ) распределением Вейбулла.

$$P(D) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{D - Pct}{\sigma}\right)^\gamma\right]; \quad \text{при } Pct < D < Lct, \quad (2.2.3)$$

где  $P(D)$  - вероятность поражения соответствующей степени тяжести;  $D$  - текущее значение поглощенной токсодозы в рассматриваемой точке пространства;  $\sigma, \gamma$  - параметры распределения Вейбулла;  $Pct, Lct$  - соответственно пороговая и летальная токсодоза для человека применительно к рассматриваемому ядовитому веществу.

Для различных токсических и вредных веществ параметры распределения Вейбулла  $\sigma$  и  $\gamma$  в формуле (2.2.3) имеют различные значения. В табл. 2.2.1 приведены значения указанных параметров распределения, рассчитанные нами в соответствии с данными специальных методико-биологических исследований Института токсикологии МЗ РФ и отнесенные к среднестатистическому составу населения.

Данные, указанные в таблице 2.2.1 приведены для химических веществ, рекомендованных ВНИИ ГОЧС [156] для рассмотрения при практических расчетах последствий аварий на химически опасных объектах для населения. Токсические свойства веществ приняты по [153].

В частности,  $LC_{50}$  - концентрация СДЯВ, вызывающая летальный исход в течение нескольких суток у человека при времени экспозиции 1 час, мг/л.

Аналогично,  $PC_{50}$  - минимальная (пороговая) концентрация СДЯВ, приводящая к получению незащищенным человеком дозы, вызывающей появление признаков поражения за рассматриваемый период при экспозиции 1 час, мг/л.

Таблица 2.2.1  
Параметры распределения Вейбулла для различных химических веществ

Параметр	Вещество	Степень тяжести поражения человека			
		легкая	средняя	тяжелая	летальный исход
1	2	3	4	5	6
$\gamma$	-	2,5	3,8	4,4	5,0

Окончание таблицы 2.2.1

1	2	3	4	5	6
σ, мг мин/л	Аммиак	16,873	56,018	78,651	114,380
	Нитрил акриловая кислота	0,837	3,538	5,100	7,582
	Окислы азота	1,674	4,475	6,094	8,628
	Сероводород	18,088	25,81	30,289	36,602
	Сероуглерод	51,294	427,3	644,700	993,464
	Синильная кислота	0,224	0,784	1,108	1,621
	Фосген	0,675	1,772	2,407	3,400
	Хлор	0,675	3,021	4,378	6,536
	Хлорпикрин	2,241	11,80	17,540	26,144
	Метил бромистый	40,495	420,6	640,342	993,460
	Кислота соляная	2,241	87,77	137,203	216,994
	Водород фтористый	4,590	6,023	6,943	8,105

На рис. 2.2.3. показана зависимость вероятности поражения человека  $P(D)$  хлором от величины полученной токсодозы  $D$ , аппроксимированная распределением Вейбулла.

$P(D)$

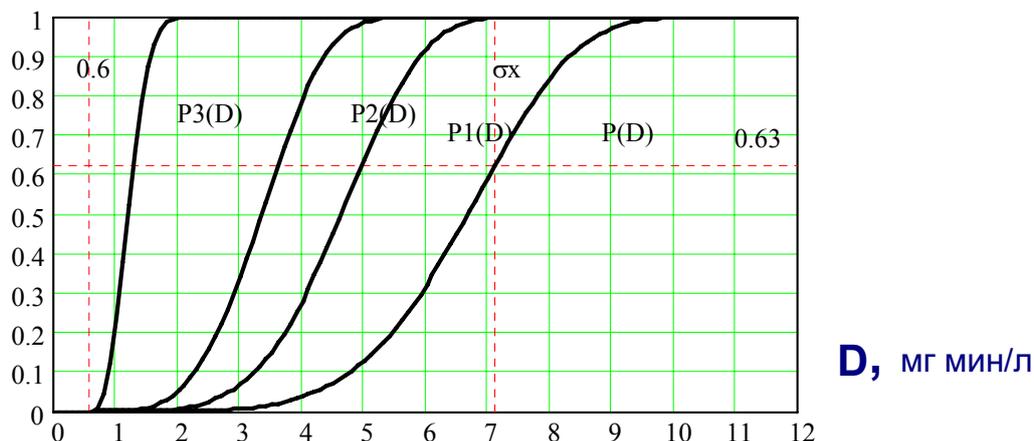


Рис. 2.2.3. Распределение Вейбулла для оценки вероятности поражения человека хлором  
 $P(D)$ -вероятность летального исхода,  
 $P1(D)$ -вероятность тяжелого поражения,  $P2(D)$ -вероятность поражения средней степени,  $P3(D)$ -вероятность поражения легкой степени.

При аварийной разгерметизации оборудования технологической установки объекта происходит истечение сжиженного ядовитого вещества, его испарение и формирование ядовитого облака, которое рассеивается в приземном слое атмосферы по направлению ветра, формируя зоны токсического поражения.

Для того чтобы определить величину токсодозы  $D$  на расстоянии  $\Gamma$  от места аварии необходимо иметь методику, дающую возможность рассчитать концентрацию паров ядовитого вещества в заданной точке при рассеивании ядовитого облака в приземном слое атмосферы по направлению ветра. Такая методика была разработана нами [120] на основе Руководящего документа Госкомитета по гидрометеорологии РД 52.04.253-90 [156]. В соответствии с этой методикой величина токсодозы на расстоянии  $\Gamma$  определяется массой аварийного выброса, начальными параметрами сильнодействующего ядовитого вещества, метеорологическими условиями, поглощающей способностью местности и рассчитывается по следующей формуле:

$$D = Q_{\text{экв}} \cdot \left( \frac{K_M \cdot \lambda}{\Gamma} \right)^{\frac{1}{\Psi}}, \quad (2.2.4)$$

где  $D$  – токсодоза;  $\Gamma$  - глубина распространения ядовитого облака;  $Q_{\text{экв}}$  - эквивалентная масса ядовитого вещества, участвующая в формировании соответствующего уровня токсодозы в рассматриваемой точке пространства с учетом физико-химических и токсических свойств данного вещества, масштабов аварии и времени действия источника опасности;  $K_M$  - коэффициент, учитывающий влияние местности на глубину распространения ядовитого облака в поражающих концентрациях;  $\lambda$  и  $\psi$  - комплексы, учитывающие влияние скорости ветра метеорологических факторов и других характеристик на глубину распространения ядовитого облака в поражающих концентрациях.

Для определения величины потенциального риска летальных исходов  $R(E)$  в рассматриваемой точки важно знать характер изменяется вероятности токсического поражения человека в зависимости от расстояния  $\Gamma$  до места возможной аварии. С этой целью, на основе зависимостей (2.2.3) и (2.2.4) была получена функция  $R(\Gamma)$ , описывающая характер изменяется вероятности токсического поражения человека в зависимости от расстояния  $\Gamma_j$  от места возможной аварии до рассматриваемой  $j$  - й точки, в которой определяется величина риска.

Характер изменения вероятности летальных исходов для индивидуума, по мере удаления от места возможной аварии показан на рис.2.2.4.

Вероятность формирования в рассматриваемой  $j$  - й точке  $\eta$ -го румба полей концентраций ядовитых веществ и соответствующих им уровней дозовых нагрузок зависит от целого ряда случайных факторов, связанных главным образом с внешними условиями. Определяющими среди них являются стратификация атмосферы, направление и скорость ветра.

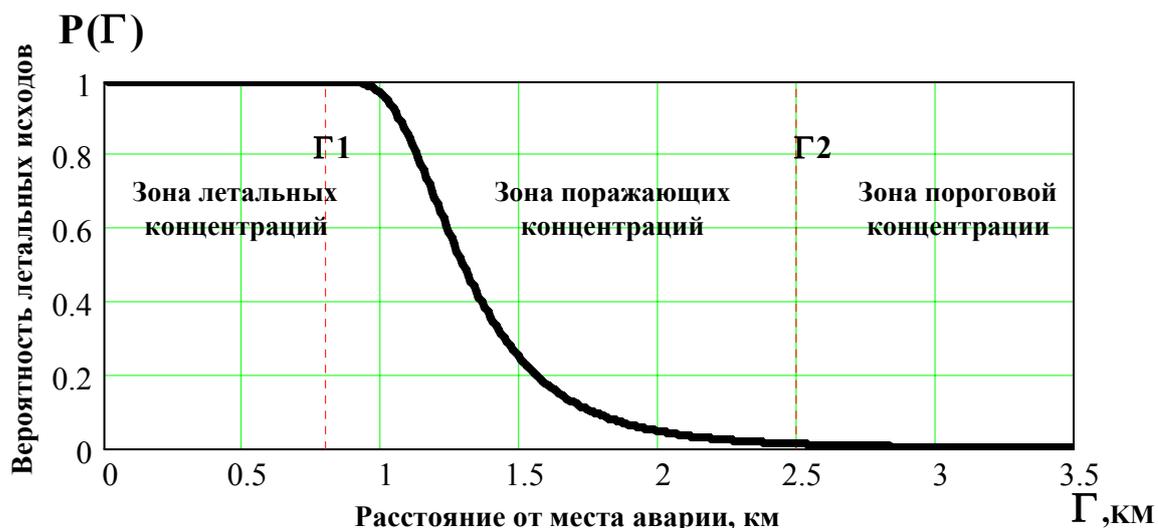


Рис. 2.2.4. Зависимость вероятности поражения человека от расстояния до места аварии

Для определения зависимости потенциального риска в  $j$ -й точке от угловой координаты  $\varphi_\eta$  необходимо знать закон и функцию распределения вероятностей азимута определенного  $\eta$ -го направления вектора поражающего фактора.

Однако, при построении изолиний риска, при практических расчетах с привязкой к конкретной местности, удобнее использовать дискретную функцию распределения угла  $\varphi$ , определяемую 8- или 16-румбовой розой ветров,  $P(\varphi_\eta; V_\eta)$ .

При проведении количественной оценки риска токсического поражения необходимо исходить из наиболее вероятных классов устойчивости атмосферы и других метеорологических параметров. В этом случае для исследуемого района или территории обобщается относительная повторяемость классов устойчивости атмосферы, направления и скорости ветра. На основании этих данных выбираются наиболее целесообразные расчетные варианты.

Таким образом, в уравнение (2.2.2), описывающее величину потенциального риска в  $j$ -й точке  $\eta$ -го румба, в качестве дополнительных влияющих факторов должны входить вероятности средне-

годовой повторяемости классов устойчивости атмосферы  $P(M_e)$  и направлений ветра соответствующей скорости  $P(\varphi_\eta; V_\eta)$ . Вертикальная устойчивость приземного слоя атмосферы, при проведении расчетов, определяется по дискретным состояниям: инверсия, изотермия и конвекция. Повторяемость указанных классов устойчивости берется на основании гидрометеорологических данных для данной территории.

С учетом вышесказанного уравнение (2.2.2) для оценки величины потенциального риска летальных исходов в  $j$ -ой точке  $\eta$ -го румба, при авариях на химически опасных объектах, примет вид:

$$R_{j\eta}(E) = P(M_e) \cdot P(\varphi_\eta; V_\eta) \cdot \beta \cdot \int_{Q_{\min}}^{Q_{\max}} Q^{-\alpha} \left\{ 1 - \exp \left[ - \frac{\left( \frac{K_M \cdot \lambda}{\Gamma} \right)^{\frac{1}{\Psi}} \cdot Q_{\text{ЭКВ}} - PCt}{\sigma} \right]^\gamma \right\} dQ, \quad (2.2.5)$$

Значения входящих в уравнение (2.2.5) параметров приведены ранее в тексте данной главы.

### ***Определение фугасного воздействия взрыва на человека, технологическое оборудование, здания и сооружения при аварийных ситуациях***

Аварийные взрывы на предприятиях носят случайный характер и последствия их негативных воздействий могут быть количественно оценены с привлечением вероятностных методов анализа риска.

С целью установления функциональной зависимости потенциального риска фугасного воздействия от основных параметров взрыва, рассмотрим, математическую модель формирования поражающих факторов при этих условиях.

### ***Модель оценки поражающих факторов при объемных взрывах газоздушных смесей. Очаг взрыва***

При взрыве газоздушной смеси (ГПВС) углеводородных продуктов с кислородом воздуха образуется ударная волна. Территория, подвергшаяся воздействию ударной волны, называется очагом взрыва.

Наиболее существенным фактором, определяющим опасность фугасного поражения человека, а также разрушения оборудования и элементов зданий и сооружений в очаге взрыва, является избыточное давление  $\Delta P_\phi$ , характер воздействия которого зависит от типа взрыва.

Различают два основных типа - детонационный и дефлаграционный взрывы.

Для идентификации типа взрыва рекомендуется использовать экспертные оценки института химической физики РАН [120]. В зависимости от типа горючего вещества и степени загроможденности пространства указанная экспертная оценка позволяет определить наиболее вероятный режим взрывоопасного превращения смеси.

Следует отметить, что при взрыве ГПВС в атмосфере (вне помещения) вероятность детонационного горения крайне мала. Наиболее реален менее опасный дефлаграционный вид взрывного превращения газозоодушнй смеси.

В литературе [39,41,49,51,62,90,95,96,101,103,142,150,228] имеется достаточно большое количество работ как теоретических, так и экспериментальных, посвященных определению параметров ударных волн, образующихся при взрывах ГПВС. Обобщение и аппроксимация этих данных позволило для практических расчетов последствий взрывов получить зависимости для различных случаев:

1 случай. Детонационный взрыв. Зависимость избыточного давления во фронте ударной волны  $\Delta P_{\Phi}$  от расстояния  $\Gamma$  до точки на местности определяется следующим выражением:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{\Phi} = \left( \frac{A \sqrt[3]{\aleph Q}}{\Gamma} \right)^{\beta} \\ \Delta P_{\min} \leq \Delta P_{\Phi} \leq \Delta P_{\max} \end{array} \right. , \quad (2.2.6)$$

где  $Q$  - масса вещества, участвующая в аварии, т;  $\aleph$  - коэффициент, зависящий от вида и способа хранения вещества;  $A, \beta$  - параметры степенной функции, зависящие от физико-химических и взрывоопасных свойств вещества;  $[\Delta P_{\min}; \Delta P_{\max}]$  - область определения функции  $\Delta P_{\Phi}$ .

2 случай. Дефлаграционный взрыв. Зависимость  $\Delta P_{\Phi}$  от расстояния  $\Gamma$  определяется следующим выражением:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{\Phi} = \frac{P_{\max}}{1 + B \left( \frac{\Gamma}{m \sqrt[3]{Q}} - 1 \right)^C} \\ m = 101,73 \left( \frac{\aleph \cdot \sigma}{\mu \cdot C_{\text{НПВ}}} \right)^{0,33} \\ P_{\max} = 212,73 \frac{\alpha^2}{1 - \alpha} \\ \alpha = \frac{\omega}{a_0} \end{array} \right. \quad (2.2.7)$$

где  $P_{\max}$  - максимальное давление в огневом облаке при дефлаграционном взрыве;  $\Delta P_{\Phi}$  - текущее значение избыточного давления на фронте взрывной волны;  $m$  - коэффициент, учитывающий физико-химические свойства вещества;  $Q$  - масса выброса взрывоопасного вещества;  $\aleph$  - коэффициент, зависящий от вида и способа хранения вещества;  $\sigma$  - степень расширения сгоревших газов;  $\mu$  - относительная молекулярная масса вещества;  $C_{\text{НПВ}}$  - нижний объемный концентрационный предел воспламенения смеси опасного вещества с воздухом;  $\alpha$  - относительная скорость распространения пламени;  $a_0$  - скорость звука в воздухе;  $\omega$  - скорость распространения пламени в газо-воздушной смеси вещества;  $B$  и  $C$  - эмпирические коэффициенты, зависящие от класса и режима горения топливно-воздушной смеси.

### **Описание параметрической зависимости фугасного поражения человека**

Основной причиной травмирования людей, попавших в зону действия ударной волны, является давление на фронте волны  $\Delta P_{\Phi}$ , скорость воздушного потока, движущегося за фронтом и время действия этого потока.

Организм человека весьма устойчив к действию давления ударной волны. Исследованиями и наблюдениями установлено, что при давлении во фронте волны 20 - 40 кПа у человека возникают контузии и травмы легкой степени, характеризующиеся головокружением и головной болью. При давлении 40 - 100 кПа, происходит сильная контузия, повреждаются внутренние органы и возможны смертельные исходы.

Вероятности получения баротравмы людьми, подвергшимися воздействию ударной волны различной интенсивности, приведены в табл.2.2.2. [36].

Таблица 2.2.2  
Вероятность получения баротравмы человеком

Избыточное давление $\Delta P_{\Phi}$ , кПа	400	120	65	35	13	10
Вероятность получения баротравмы	1	0,75	0,5	0,25	0,05	0

Вероятность наступления смертельного исхода в пределах очага взрыва для застроенной местности в зависимости от избыточного давления и степени разрушений приводится в табл. 2.2.3. [120].

Таблица 2.2.3

Вероятность летальных исходов в очаге взрыва

Зоны разрушений	Зона полных разрушений	Зона сильных разрушений	Зона средних разрушений	Зона слабых разрушений	Зона малых повреждений
Избыточное давление $\Delta P_{\Phi}$ , кПа	> 100	70	22	14	5
Вероятность смерти незащищенных людей	0,75	0,55	0,13	0,05	0
Вероятность смерти людей в зданиях	0,35	0,2	0,025	0,008	0

Выполненный анализ опубликованных данных [120] показал, что распределение случайной величины летального поражения человека в зависимости от избыточного давления и разрушений в зоне жилой и промышленной застройки носит характер смещенного нормального распределения. Полученная зависимость наиболее просто аппроксимируется трехпараметрическим законом Вейбулла с соответствующими параметрами распределения [158]:

$$F(\Delta P_{\Phi}) = 1 - \exp\left[-\left[(\Delta P_{\Phi} - P_{\min})/\sigma\right]^{\xi}\right], \quad (2.2.8)$$

где  $F(\Delta P_{\Phi})$  - функция летальных исходов в зависимости от величины избыточного давления  $\Delta P_{\Phi}$ ;  $P_{\min}$  - граничное избыточное давление, при котором вероятность фугасного поражения человека исчезающе мала;  $\sigma, \xi$  - параметры закона Вейбулла.

Сравнительный анализ эмпирического распределения вероятностей летальных исходов в очаге взрыва, заданного в табл. 2.2.3 с полученным нами аналитическим распределением вероятностей и реализованной методами нелинейной регрессии с использованием математического пакета компьютерных программ MathCAD 7.0 PRO [88, 145, 191, 194] показан на рис. 2.2.5.

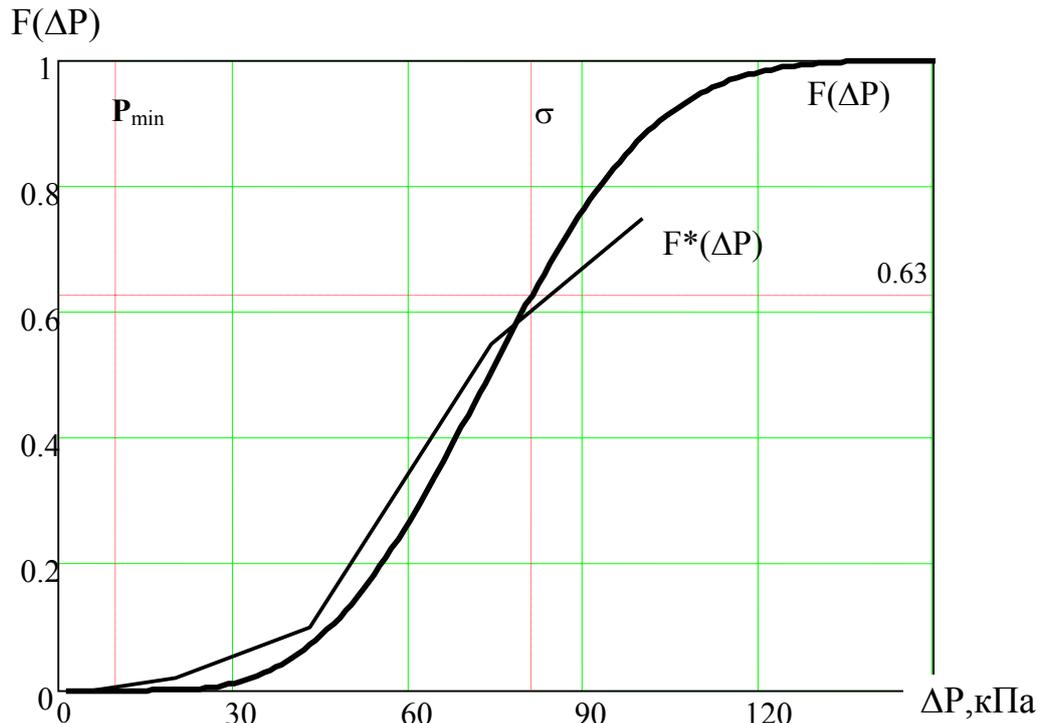


Рис. 2.2.5. Сравнительный анализ эмпирического  $[F^*(\Delta P)]$  и аналитического  $[F(\Delta P)]$  распределений вероятностей летальных исходов при фугасном воздействии ударной волны

Учитывая, что функция  $\Delta P_{\Phi} = f(\Gamma)$  для детонационного и дефлаграционного взрывов непрерывная монотонная убывающая, перейдем по аналогии с вышеизложенным примером к функции распределения вероятностей летальных исходов в зависимости от расстояния до места аварии. После соответствующих преобразований, получаем:

для детонационного взрыва:

$$F(\Gamma) = 1 - \exp \left\{ - \eta \left[ \left( \frac{A \sqrt[3]{NQ}}{\Gamma} \right)^{\beta} - P_{\min} \right]^{\xi} \right\}, \quad (2.2.9)$$

для дефлаграционного взрыва:

$$F(\Gamma) = 1 - \exp \left\{ - \eta \left[ \frac{P_{\max}}{1 + B \left( \frac{\Gamma}{m \sqrt[3]{Q}} - 1 \right)^C} - P_{\min} \right]^{\xi} \right\}, \quad (2.2.10)$$

где  $\eta = \sigma^{-\xi}$ .

Подстановка полученных выражений (2.2.9) или (2.2.10) в уравнение (2.2.2) дает зависимость потенциального риска фугасного поражения на прилегающей к объекту территории от расстояния в виде:

$$R(E) = \sum_{i=1}^n \int_{Q_{\min}}^{Q_{\max}} g(Q) \cdot F(\Gamma) dQ, \quad (2.2.11)$$

где  $F(\Gamma)$  - функция вероятности летальных исходов на прилегающей к объекту территории в зависимости от расстояния  $\Gamma$  до центра взрыва.

### ***Оценка последствий воздействия взрывов на промышленное оборудование здания и сооружения при аварийных и чрезвычайных ситуациях***

Действие ударной волны на элементы сооружений характеризуется комплексом нагрузок: прямое давления, давления отражения, давление обтекания, давление затекания, нагрузка от сейсмозрывных волн в грунте и т.п.

При моделировании уязвимости сооружений сопротивляемость их элементов действию ударной волны принято характеризовать величиной избыточного давления во фронте ударной волны, обозначаемого  $\Delta P_{\Phi}$ . Избыточное давление  $\Delta P_{\Phi}$  используется как универсальная характеристика воздействия на элементы сооружений действия ударной волны и сравнивается с предельной величиной ( $\Delta P_{\text{lim}}$ ), определяющей степень их разрушения и повреждения.

При зонировании очага взрыва характер и степень ожидаемых разрушений на объекте определяется для различных дискретных значений  $\Delta P_{\Phi}$  в интервале от значений  $\Delta P_{\text{слб}}$  - вызывающих слабые разрушения подавляющего большинства зданий и сооружений, до  $\Delta P_{\text{пол}}$  - вызывающих полные их разрушения.

На основе анализа литературных данных [39,49,51,90,95,142] в качестве медианных приняты для предприятий химической, нефтеперерабатывающей промышленности, а также жилых и общественных зданий следующие значения  $\Delta P_{\Phi}$ , кПа, на внешних границах зон разрушений, табл. 2.2.4.

Таблица 2.2.4

Характеристика зон разрушения очага взрыва

Избыточное давление	Характер разрушений
1	2
$\Delta P_{\phi} \geq 70 \text{кПа}$	Сильное и полное разрушение всех типов зданий. Разрушение несущих конструкций, обрушение перекрытий, уничтожение технологического оборудования. Восстановление невозможно.
$70 \text{кПа} > \Delta P_{\phi} \geq 50 \text{кПа}$	Значительные деформации несущих конструкций, разрушение большей части перекрытий, стен и оборудования производственных корпусов и жилых зданий. Срыв с опор, опрокидывание, разрушение и деформация емкостных аппаратов, обрыв трубопроводов и запорной арматуры. Средние повреждения автотранспорта, переворачивание вагонов. Восстановление нецелесообразно и возможно лишь путем нового строительства с использованием сохранившихся конструкций и оборудования зданий и сооружений.
$50 \text{кПа} > \Delta P_{\phi} \geq 28 \text{кПа}$	Разрушение кровли, перегородок, а также части оборудования производственных корпусов и жилых зданий. Смещение на опорах, деформация оболочек емкостных аппаратов и обвязочных трубопроводов, повреждение запорной арматуры. Восстановление возможно при капитальном ремонте.
$28 \text{кПа} > \Delta P_{\phi} \geq 14 \text{кПа}$	Разрушение наименее прочных конструкций зданий, сооружений и агрегатов; заполнений дверных и оконных проемов, срыв кровли. Небольшие вмятины на оболочке емкостных аппаратов, деформация трубопроводов. Основное оборудование повреждено незначительно. Использование возможно после среднего (текущего) ремонта и замены поврежденных деталей.
$14 \text{кПа} > \Delta P_{\phi} \geq 5 \text{кПа}$	Полное разрушение застекления. Частичные повреждения рам, дверей, нарушение штукатурки и внутренних мелких перегородок.

***Взрывоустойчивость зданий, сооружений и технологического оборудования к воздействию ударной волны***

Под взрывоустойчивостью понимается предельная величина избыточного давления  $\Delta P_{\text{lim}}$ , до которой рассматриваемое оборудование, аппараты и конструкционные элементы зданий и сооружений сохраняют ремонтпригодность или возможность восстановления при капитальном ремонте. Обычно это может быть в случае, если «объект» получит среднюю степень разрушений.

При избыточных давлениях во фронте ударной волны  $\Delta P_{\Phi} \geq \Delta P_{lim}$  «объект» теряет устойчивость. При этом «объект» получает сильную степень разрушений - его восстановление нецелесообразно и возможно лишь путем нового строительства с использованием отдельных сохранившихся конструкций и оборудования.

Для расчета предела устойчивости данного типа здания может быть использована следующая аналитическая зависимость [120]:

$$\Delta P_{lim} = K_{\Pi} \frac{(H_{зд} - 2)(1 + 4,65 \cdot 10^{-3} Q)}{3[1 + 0,43(H_{зд} - 5)]} \cdot \prod_{j=1}^n K_j, \quad (2.2.12)$$

где  $H_{зд}$  - высота здания, м;  $K_{\Pi}$  - коэффициент, учитывающий степень разрушения здания;  $K_j$  - коэффициенты, учитывающие назначение здания, тип конструкции, строительный материал, сейсмостойкость, степень износа и другие факторы;  $Q$  - грузоподъемность внутрицеховых мостовых кранов (кранового оборудования), т.

Как видно из приведенной зависимости даже однотипные здания, сооружения или технологическое оборудование при одинаковом внешнем негативном воздействии на них, тем не менее могут получать различные степени разрушений. Это объясняется тем, что они различаются по величине физического износа, качеству выполнения строительных и монтажных работ при их возведении, прочностным свойствам строительных материалов и множеству других факторов случайного характера. В связи с этим при прогнозировании степени разрушения рассматриваемого объекта, можно лишь судить о вероятности потери им взрывоустойчивости.

Основываясь на указанном выше представлении о взрывоустойчивости и принимая в качестве предельного состояния среднюю степень разрушения рассматриваемого объекта [95], получим функцию вероятности наступления средней степени разрушения зданий от величины действующего давления в параметрическом представлении:

$$F(\Delta P_{\Phi}) = 1 - \exp\{-r(P_{пр} - \delta)^{\varphi}\}, \quad (2.2.13)$$

где  $F(\Delta P_{\Phi})$  - функция распределения вероятностей потери устойчивости рассматриваемым объектом в зависимости от  $\Delta P_{\Phi}$ ;  $P_{пр} = \frac{\Delta P_{\Phi}}{P_{lim}}$  - приведенное давление, воздействующее на рассматриваемый объект;  $\Delta P_{\Phi}$  - текущее значение избыточного давления;  $P_{lim}$  - предельная величина избыточного давления, вызывающая потерю взрыво-

устойчивости для рассматриваемого типа объекта;  $r, \delta, \varphi$  - параметры вероятностного закона распределения Вейбулла.

Сравнительный анализ эмпирической [41,49,51,95,96] и аналитической функций распределения вероятностей потери устойчивости на примере жилых зданий показан на рис.2.2.6. Из рисунка следует достаточно близкое совпадение эмпирического и аналитического подхода.

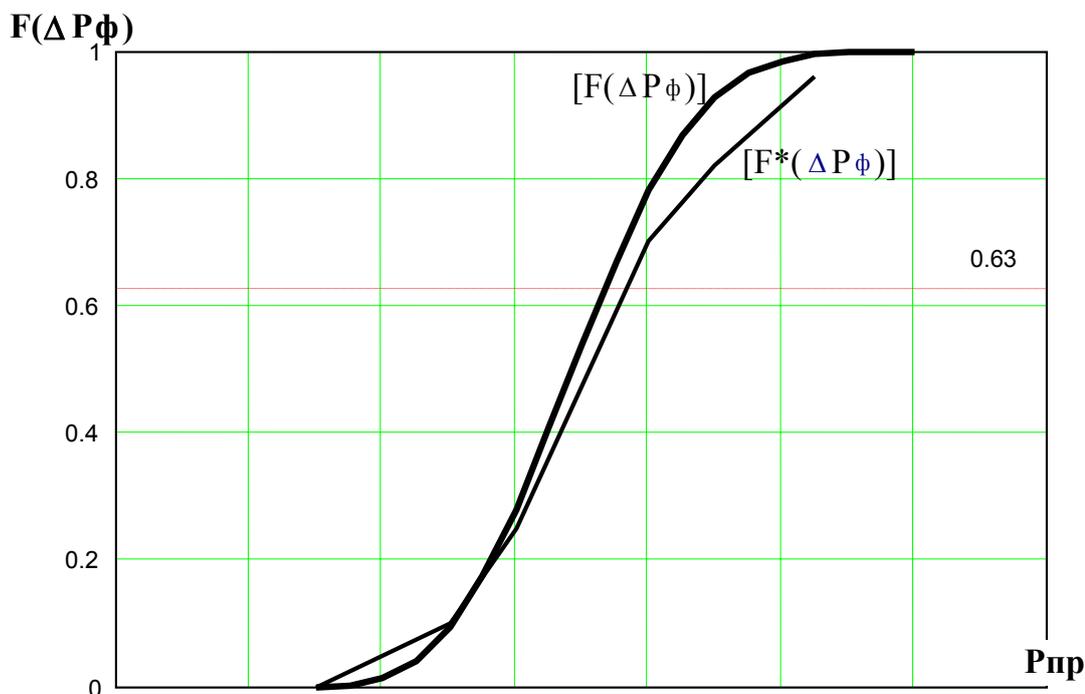


Рис. 2.2.6. Сравнительный анализ эмпирической  $[F^*(\Delta P)]$  и аналитической  $[F(\Delta P)]$  функций распределения вероятностей потери устойчивости жилых зданий к воздействию ударной волны

Перейдем к функции распределения вероятностей потери устойчивости объектом в зависимости от расстояния  $\Gamma$  до места аварии, используя математический метод замены случайных переменных, изложенный выше.

После проведения преобразований, получаем:  
 для детонационного взрыва:

$$F(\Gamma) = 1 - \exp \left\{ -r \left[ \frac{1}{P_{lim}} \left( \frac{A \sqrt[3]{NQ}}{\Gamma} \right)^\beta - \delta \right]^\varphi \right\}, \quad (2.2.14)$$

для дефлаграционного взрыва:

$$F(\Gamma) = 1 - \exp \left\{ -r \left[ \frac{P_{\max}/P_{\lim}}{1 + B \left( \frac{\Gamma}{m^3 \sqrt{Q}} - 1 \right)^C} - \delta \right]^\varphi \right\}, \quad (2.2.15)$$

### **Определение теплового поражения человека при аварийных ситуациях на промышленных установках**

Тепловое поражение человека в аварийных ситуациях определяется степенью ожога, полученного в результате воздействия теплового импульса на кожный покров.

Важным показателем является уровень теплового воздействия на человека, при котором становится вероятным смертельный исход.

В источниках [78,228] были проанализированы данные по последствиям от ожогов со смертельными случаями при различных уровнях теплового воздействия на человека.

В основу исследований были взяты, так называемые, индексы дозы, т.е. произведение интенсивности излучения на длительность прямоугольного импульса:

$$I = q^{4/3} \cdot \tau, \quad (2.2.16)$$

где  $I$  - индекс дозы;  $q$  - тепловой поток, кВт/м<sup>2</sup>;  $\tau$  - длительность воздействия, с.

Вероятность смертельных исходов в зависимости от индекса дозы на основании исследований [228] приведена в табл. 2.2.5.

Таблица 2.2.5

Вероятность летального исхода при тепловом воздействии

Вероятность летального исхода	Индекс дозы, кДж/м <sup>2</sup>
0,007	0,73x10 <sup>3</sup>
0,01	0,98 x10 <sup>3</sup>
0,5	2,3 x10 <sup>3</sup>
0,63	2,7 x10 <sup>3</sup>
1	6,6 x10 <sup>3</sup>

Аналитическое представление табличных данных дает следующую функциональную зависимость:

$$P(q) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{q^{4/3} \cdot \tau - \gamma}{\omega}\right)^k\right\}, \quad (2.2.17)$$

где  $P(q)$  - функция распределения вероятности теплового поражения человека от величины теплового потока  $q$ ;  $q$  - величина теплового потока;  $\tau$  - длительность воздействия;  $\gamma$  - порог последствий от ожогов по [78,95];  $\omega$ ,  $k$  - параметры закона распределения вероятностей Вейбулла;

На рис. 2.2.7 показан сравнительный анализ эмпирического [228] и аналитического распределения вероятностей летальных исходов при тепловом воздействии.

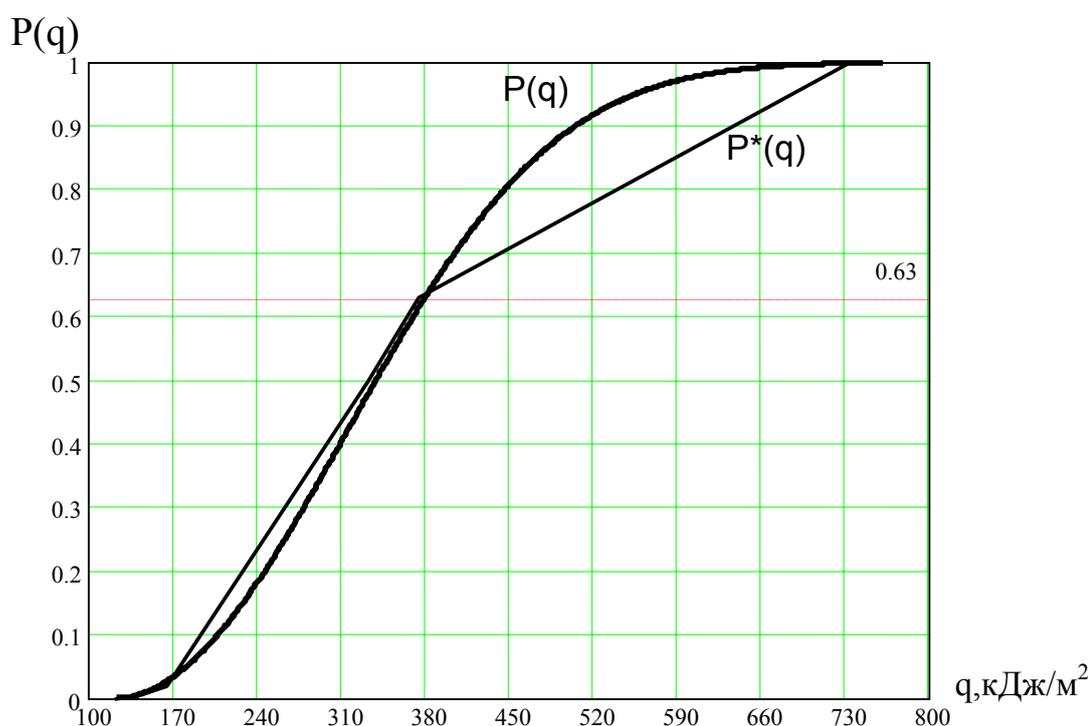


Рис. 2.2.7. Распределения вероятностей летальных исходов при тепловом воздействии.

### 2.3 Основы определения социального, экологического и материального ущерба при аварийных ситуациях

Рассмотрим более подробно основы определения социального ущерба ( $Y_c$ ). Нами предлагается в качестве главного параметра при расчете социального ущерба, связанного с гибелью людей, использовать величину, оценивающую стоимость человеческой жизни. Долгое время в нашем обществе считалось аморальным оценивать стоимость человеческой жизни, и практически по данной проблеме серьезных исследований не проводилось. Однако при более глубоком исследовании этого вопроса оказывается, что в этой ситуации

при создании сложных и опасных промышленных объектов влиянием их на социальные последствия вообще пренебрегали. Фактически стоимость человеческой жизни приравнивалась к нулю. Отсюда сооружение высокорисковых производств в непосредственной близости от жилых массивов и природных объектов. Применительно к Саратовской области - это Балаковская АЭС, АООТ «Нитрон», ОАО «Крекинг», ОАО «Трансаммиак» и т.д. При оценке стоимости человеческой жизни могут быть выделены различные методологические и методические подходы [54,83,90,109,198,228,246,247,256].

Стоимость заболевания (болезни) работника может быть оценена (рассчитана) как сумма выплаченной за период болезни заработной платы или потерь продукции (если данного работника на время отсутствия нельзя было эквивалентно заменить), а также стоимости его лечения. Но в этом случае получается нижний предел стоимости болезни, поскольку здесь не учитываются потери «национального дохода», а также «личные» потери работника, вызванные, в частности, дискомфортом его болезненного состояния, недопроизводством продукции и услуг в домашнем хозяйстве и прочими факторами.

Возможен вариант опроса населения на предмет, сколько конкретный человек захочет заплатить, чтобы снизить величину опасности заболевания, или компенсировать потерю здоровья, если он заболел.

В итоге за стоимость заболевания принимается средняя арифметическая величина между определенными компенсациями и готовностью платить.

Оценка стоимости заболевания или смерти может быть выявлена при сопоставлении уровня зарплаты с разными условиями труда или различной степенью риска смерти для более опасных профессий.

Концепция стоимости «среднестатистической жизни» может быть определена, как один из возможных способов, методом опроса. Предположим, 100 человек готовы заплатить по 50 тыс. долл., чтобы сократить риск своей смерти на 0,01% в течение некоторого периода. Тогда их общая готовность платить составляет 5 млн. долл. В то же время ожидаемое число спасенных жизней составляет единицу (0,01x100). Таким образом, в этом условном примере, стоимость «среднестатистической» жизни может оцениваться в 5 млн. долл.[83].

Известны методы, основанные на понятии «человеческого капитала» [83]. Определенность такого подхода несомненна, так как выводимые на его основе оценки базируются на достаточно точных экономических данных, а именно среднем уровне заработной платы, среднедушевом чистом продукте и других показателях.

Вместе с тем, здесь есть определенные погрешности, связанные с недостаточным учетом полезности будущего периода жизни человека, в частности в пенсионном возрасте.

В работе [247] предлагается в качестве меры безопасности населения ввести показатель “Средняя ожидаемая продолжительность предстоящей жизни” (СОПЖ), а уровень риска для населения от рассматриваемого вида деятельности определять по величине сокращения СОПЖ. Тогда, для принятия решений по управлению риском с целью повышения безопасности населения, необходимо знать стоимость продления жизни вследствие принятия мер технического или организационного характера. Такие данные о стоимости продления жизни в международных долларах за год дополнительной жизни, заимствованные из работы [247], приведены в табл. 2.3.1 и табл. 2.3.2.

Таблица 2.3.1

Оценка стоимости продления жизни в странах, отличающихся по уровню экономического развития

Страны, 1985 г.	Стоимость продления жизни, долл. за год дополнительной жизни
Китай	$(1-6)10^3$
Россия (бывший СССР)	$(5-30)10^3$
Великобритания	$(30-80)10^3$
США	$(80-200)10^3$

Таблица 2.3.2

Оценка стоимости продления жизни вследствие принятия мер технического или организационного характера с целью повышения уровня безопасности в различных видах деятельности США (данные Гарвардского Центра по анализу риска)

Технические системы и меры организационного характера снижения техногенного риска	Стоимость продления жизни, долл. за год дополнительной жизни
1	2
Контроль за качеством пищевых продуктов	$0,001 10^6$
Вакцинация против гриппа	$0,001 10^6$
Хлорирование питьевой воды	$0,003 10^6$
Автомобильные привязные ремни безопасности	$0,08 10^6$
Надувные автомобильные мешки безопасности	$0,32 10^6$
Противопожарные дымовые извещатели	$(0,08-0,5) 10^6$

1	2
85% улавливания серы на угольных ТЭС: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ высокосернистый уголь</li> <li>▪ низкосернистый уголь</li> </ul>	(0,1-1,4) 10 <sup>6</sup> (0,7-10,0) 10 <sup>6</sup>
Готовность к природным катастрофам	1,1 10 <sup>6</sup>
Сейсмостойкое строительство	17,7 10 <sup>6</sup>
Технические системы безопасности на АЭС: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ системы аварийного охлаждения активной зоны реактора</li> <li>▪ противоаварийная защитная оболочка</li> <li>▪ рекомбинаторы водорода</li> </ul>	0,1 10 <sup>6</sup> 4,0 10 <sup>6</sup> >3000 10 <sup>6</sup>
В среднем для населения США	0,042 10 <sup>6</sup>

Величина стоимости жизни может определяться исходя из принципов страхования.

В настоящее время в нашей стране получил признание и утвердился несколько иной подход к стоимости жизни. Считается, что это понятие по соображениям большей адекватности смыслу решаемых эколого-экономических (технических) оптимизационных задач, следует заменить термином “Цена спасения жизни” - ЦСЖ [54]. ЦСЖ - определяет средневзвешенные по основным сферам жизнедеятельности затраты в спасение жизни каждого дополнительного индивидуума, т.е. ниже установившейся техногенной смертности. При существующем уровне безопасности и надежности в этих сферах (областях, отраслях) выражение для расчета ЦСЖ представим следующим образом:

$$\text{ЦСЖ} = \sum_{i=1}^m \frac{\Delta Z_i \delta_i}{\Delta n_i}, \text{ при } \sum_{i=1}^m \delta_i = 1, \quad (2.3.1)$$

где  $\frac{\Delta Z_i}{\Delta n_i}$  - дополнительные затраты для спасения жизни одного индивидуума по сферам жизнедеятельности (областям, отраслям хозяйства);  $\Delta Z_i$  - полные затраты в какое-либо плановое мероприятие в отрасли;  $\Delta n_i$  - число спасаемых при этом мероприятии жизней;  $\delta_i$  - «весовая» доля i-й отрасли в общей техногенной смертности.

Ниже названы некоторые официальные документы, подтверждающие и раскрывающие количественную оценку стоимости человеческой жизни или цены спасения жизни. В соответствии с мерами по обеспечению социальной защиты [54] все граждане Российской Федерации, подвергшиеся радиоактивному воздействию вследствие чернобыльской катастрофы, независимо от места проживания подлежат обязательному бесплатному государственному страхованию личности от риска радиационного ущерба в пределах 200 кратной

суммы установленного законом размера минимальной месячной оплаты труда. Страховым событием является развитие у застрахованного заболевания, установление группы инвалидности, а также его смерть (гибель), вследствие чернобыльской катастрофы.

Представляет интерес в этом плане международный опыт государственного личного страхования.

В США в каждом штате свои законы и правила [54]. В городе Нью-Йорке, например, если человек, проработавший 10 лет в полиции, погиб при исполнении служебных обязанностей его семья сразу получает годовой оклад покойного от мэра Нью-Йорка, 25 тысяч долларов от городской администрации, 127 тысяч долларов по страховке и 10 тысяч долларов на похороны. Семье за потерю кормильца правительство США выплачивает компенсацию в размере 2,23 млн. долларов. Кроме того, супруге погибшего на протяжении всей ее жизни будут ежегодно выплачивать по 50 тыс. долларов.

Что касается военных, то жизнь погибшего на войне американского солдата оценивается пенсией семье 230 долларов в месяц за рядового солдата. За смерть генерала, прослужившего в армии США более 30 лет, выплачивается до 150 тыс. долларов в месяц.

Согласно Федеральному Закону Российской Федерации о защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [2] граждане Российской Федерации имеют право на возмещение ущерба, причиненного их здоровью и имуществу вследствие чрезвычайных ситуаций (см. статья 18). Порядок и условия государственного социального страхования, виды и размеры компенсаций и льгот, предоставляемых гражданам Российской Федерации в соответствии с пунктом 1 настоящей статьи устанавливаются законодательством Российской Федерации и законодательством субъектов Российской Федерации.

Здесь в качестве примера реализации этого закона приведем данные единичного страхования жизни людей и техники АООТ «Саратовавтотранс» при оказании гуманитарной помощи Чеченской республике. Распоряжением администрации Саратовской области №225-р от 25.04.95 г. было направлено 18 автомобилей для транспортировки груза из г. Саратова в г. Грозный и предусматривалась компенсация потерь из областного бюджета в случае гибели людей 100 тыс. рублей за 1 человека и не более 65 тыс. рублей за единицу транспортного средства с учетом износа.

Величина социального ущерба также должна включать ущерб здоровью людей, вызванный воздействием вредных веществ на человека. Здесь следует различать тяжелую, среднюю и легкую степень поражения населения при аварийных и чрезвычайных ситуациях. Величина ущерба может быть рассчитана как затраты, необ-

ходимые для лечения и восстановления здоровья пострадавших людей.

К социальному ущербу, по нашему мнению, следует также отнести затраты, связанные с изменением условий жизнедеятельности людей (вынужденная эвакуация, перемещение и т.п.) [176].

Во многих случаях аварийных и чрезвычайных ситуаций, главной частью общего ущерба является экологическая составляющая.

Рассмотрим основные положения в определении экологического ущерба окружающей природной Среды ( $Y_э$ ). Здесь следует различать ущербы, вызванные загрязнением водоемов, атмосферы и почвы. Расчет ущербов окружающей природной среде за загрязнение водоемов вредным веществом при аварийных разливах согласно [149] проводится по формуле:

$$Y_{э(вод)} = 5K_u \sum_{i=1}^k C_{водi} \cdot M_{водi}, \quad (2.3.2)$$

где  $K_u$  - коэффициент инфляции (индексации);  $C_{водi}$  - ставка платы за загрязнение водоема  $i$ -м вредным веществом в пределах установленного лимита, руб/т [10];  $M_{водi}$  - масса  $i$ -го вредного вещества, принимаемая для расчета платы за загрязнение водного бассейна при аварийных ситуациях, т. Величина  $C_{водi}$  в свою очередь рассчитывается как [10]

$$C_{водi} = 5N_{бви} \cdot K_{эв}, \quad (2.3.3)$$

где  $N_{бви}$  - базовый норматив платы за сброс одной тонны вредного вещества в водоем в пределах установленных нормативов, руб/т [10];  $K_{эв}$  - коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния водного бассейна [10].

Величина ущерба окружающей природной среде от выбросов вредных веществ в атмосферу рассчитывается по формуле [165]

$$Y_{эат} = 5K_u \sum_{i=1}^k C_{ати} \cdot M_{ати}, \quad (2.3.4)$$

где  $C_{ати}$  - ставка платы за выброс одной тонны  $i$ -го вредного вещества в пределах установленных лимитов, руб/т;  $M_{ати}$  - масса  $i$ -го вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу, т.

Величина  $C_{ати}$  в свою очередь рассчитывается как

$$C_{ати} = 5N_{бати} \cdot K_{эат}, \quad (2.3.5)$$

где  $H_{\text{бати}}$  - базовый норматив платы за выброс одной тонны  $i$ -го вредного вещества в водоем в атмосферу в пределах установленного норматива, руб/т;  $K_{\text{эат}}$  - коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния атмосферы в данном регионе.

Формула (2.3.4) учитывает также случай, когда вредное вещество, поступившее в атмосферу, сжигается. В этих условиях необходимо определять количество вредных веществ, образующихся при сгорании исходного вещества. Например, по данным Гидромета, при сжигании одной тонны разлившейся нефти образуется и попадает в атмосферу 600 кг окиси углерода, 40 кг диоксида азота, 580 кг сажи, 180 кг сернистого ангидрида и 100 кг углеводородов.

Расчет ущерба окружающей природной среде от загрязнения земель химическими веществами определяется по формуле [149]

$$Y_{\text{зем}} = H_{\text{с}} \cdot F_{\text{гр}} \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{з}} \cdot K_{\text{э}(i)} \cdot K_{\text{г}}, \quad (2.3.6)$$

где  $H_{\text{с}}$  - норматив стоимости сельскохозяйственных земель, руб/га, [204];  $K_{\text{г}}$  - коэффициент пересчета в зависимости от глубины загрязнения земли вредным веществом, [204];  $K_{\text{п}}$  - коэффициент пересчета в зависимости от периода времени по восстановлению загрязненных сельскохозяйственных земель, [204];  $K_{\text{з}}$  - коэффициент пересчета в зависимости от степени загрязнения земель вредным веществом, [204];  $K_{\text{э}(i)}$  - коэффициент экологической ситуации и экономической значимости территории  $i$ -го экономического района [204];  $F_{\text{гр}}$  - площадь грунта насыщенного вредным веществом, га. В свою очередь площадь насыщенного грунта рассчитывается по формуле

$$F_{\text{гр}} = gV / K_{\text{н}} \cdot h_{\text{пер}}, \quad (2.3.7)$$

где  $g$  - доля разлившегося несобранного вредного вещества из общего объема  $V$  вылившегося в результате аварии;  $K_{\text{н}}$  - емкость земли по конкретному веществу, например, нефтеемкость земли [149];  $h_{\text{ср}}$  - средняя глубина пропитки на всей площади насыщения земли [204].

Величина материального ущерба ( $Y_{\text{м}}$ ) определяется масштабом разрушенных оборудования, зданий и сооружений и стоимостью их основных фондов. В каждом конкретном случае величина материального ущерба будет определяться специфическими особенностями аварийной ситуации и ландшафтными особенностями местности.

Выше рассмотрены основы определения прямого интегрированного ущерба при авариях и чрезвычайных ситуациях. Вместе с прямым ущербом имеет место косвенный ущерб, связанный с за-

тратами на расследование аварий и дальними последствиями [11]. Однако данный вопрос выходит за рамки настоящего исследования.

## **Выводы к главе 2**

Разработаны критерии сопоставления и оптимизации инженерных решений с учетом влияния факторов экологической и промышленной безопасности.

Обоснованы количественные показатели цены спасения жизни человека ЦСЖ, позволяющие определить риск социального ущерба в денежном эквиваленте.

Получена математическая модель интегрированного риска - комплексного показателя прогнозируемого полного ущерба, нанесенного человеку, объектам экономики и экосистемам от всего спектра возможных аварий на потенциально опасном объекте: взрывы, пожары, выбросы в окружающую среду ядовитых веществ.

Предложенный методический подход позволяет проводить технико-экономическое обоснование и оптимизацию инженерных решений обеспечения экологической и промышленной безопасности систем и комплексов.

В последующих главах дана конкретизация рассмотренных подходов на примерах анализа опасностей и риска потенциально опасных производств.