

УДК 389.17:006.
ББК 69.68
К 59

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Ведущий научный сотрудник Института аграрных проблем РАН
доктор экономических наук С.А. Андрющенко
Заведующий лабораторией надежности и взрывобезопасности
ДОО «ВНИПИГаздобыча», кандидат технических наук,
старший научный сотрудник В.А. Сорокованов

Одобрено
редакционно-издательским советом
Саратовского государственного технического университета

Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А.

К 59 **Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков.** Вероятностные методы количественной оценки опасностей техносферы. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2002. 178 с.

ISBN 5-7433-1018-1

Рассмотрены теоретические основы и практика анализа техногенных рисков, обоснованы вероятностные методы количественной оценки опасностей объектов техносферы.

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

Ил. 88. Табл. 63. Библ. 261 наим.

УДК 389.17:006
ББК 69.68

© Саратовский государственный
технический университет, 2002
© Козлитин А.М., Попов А.И.,
Козлитин П.А., 2002

ISBN 5-7433-1018-1

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

kammov@gmail.com

ГЛАВА 1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ РИСКА ТЕХНОГЕННЫХ АВАРИЙ НА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ 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), на взрывопожароопасных объектах в Тулузе (Франция), в Энсхеде (Нидерланды), 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 количественной оценки, анализа и управления техногенными рисками аварий на потенциально опасных объектах техносферы.

Риск можно измерить с помощью статистических данных или рассчитать с помощью имитационных моделей. Но для этого необходимо иметь математическую модель риска и соответствующее методическое обеспечение.

1.1. Математические модели техногенных рисков

Учитывая тот факт, что в результате реализации опасности нанесенный ущерб складывается из социальных, материальных и экологических потерь, нами предложена [82; 251] и используется при расчетах математическая модель *интегрированного риска* потенциально опасного объекта (ПОО), как комплексного показателя его безопасности, выраженного в едином стоимостном эквиваленте и объединяющего в себе ожидаемые ущербы социальных, экологических и материальных потерь.

$$\left\{ \begin{array}{l} R(Y_{\Sigma}) = R(Y_C) + R(Y_M) + R(Y_{\Theta}) \\ R(Y_C) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{\alpha} R_{ij}(E_C) \cdot Y_{cijk} \\ R(Y_M) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{r=1}^{\omega} R_{ij}(E_M) \cdot Y_{mijr} \\ R(Y_{\Theta}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{q=1}^{\eta} R_{ij}(E_{\Theta}) \cdot Y_{\Theta ij q} \end{array} \right. \quad (1.1)$$

где $R(Y_{\Sigma})$ – интегрированный риск; $R(Y_C)$ – риск социального ущерба (коллективный риск); $R(Y_M)$ – риск материального ущерба; $R(Y_{\Xi})$ – риск экологического ущерба; Y_C, Y_M, Y_{Ξ} – соответственно социальный, материальный и экологический ущербы; 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; α – число степеней поражения человека; ω – число составляющих материального ущерба; η – число составляющих экологического ущерба; $R(E)$ – потенциальный риск возникновения чрезвычайной ситуации для реципиента вида E .

В основу модели интегрированного риска положены формулы математического ожидания соответствующих потерь (ожидаемый ущерб), функционально связывающие частоту (вероятность) реализации неблагоприятного события и ущерб, нанесенный данным неблагоприятным событием. Ущерб определяется типом реализуемой опасности и видом реципиента воздействия. Частота неблагоприятного события характеризуется потенциальным риском – стохастической (вероятностной) составляющей ожидаемого ущерба.

Риск социального ущерба (социальный риск) характеризует масштаб катастрофичности аварии на потенциально опасном объекте. **Социальный риск** принято представлять *математическим ожиданием* людских потерь – *коллективным риском* $R(Y_C)$, либо *плотностью распределения* потерь, в интерпретации В. Маршалла [113] *F/N – диаграммой*, описывающей зависимость частоты реализации неблагоприятных событий F , в результате которых погибло не менее N человек, от этого количества человек.

Социальный риск учитывает масштаб воздействия, выражающийся в летальных исходах и поражениях людей различной тяжести, приведенных к суммарно эквивалентному числу летальных исходов. 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 – нижнее, среднее и верхнее значения, соответственно 100 тыс., 600 тыс. и 1 млн. руб. на человека [82]. Введенные нами количественные показатели ЦСЖ подтверждаются и установившейся в последние годы практикой выплаты семьям погибших в авариях, катастрофах и экстремальных ситуациях:

1. Гибель атомохода «Курск» в августе 2001 г. – выплаты семьям погибшим примерно по 700 тыс. руб. за человека.
2. Авария российского ТУ-154 в Германии (июль 2002 г.) – выплаты семьям погибших по 100 тыс. руб. за человека.
3. Семьям погибших солдат при защите границы России от проникновения банд с территории Грузии (август 2002 г.) выплаты по 100 тыс. руб. за человека.

Для сравнения, в США выплачены компенсации семьям погибших в результате террористического акта 11 сентября 2001 года в Нью-Йорке от 300 тыс. долларов до 3 миллионов долларов США.

Для определения риска ущерба от возможных травм различной тяжести вводится взвешивающий коэффициент P_k , сопоставляющий k -ю степень поражения (нетрудоспособность, серьезная травма, травмы средней и легкой тяжести) с летальным исходом. Методы определения ЦСЖ и количественная оценка коэффициента P_k рассмотрены нами в работах [33, 49, 82].

При определении *риска материального ущерба (материального риска)* $R(Y_M)$ 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)* $R(Y_E)$ окружающая природная среда рассматривается в виде системы, состоящей из трех основных компонентов: литосферы, гидросферы и атмосферы. При этом ожидаемый экологический ущерб в стоимостном эквиваленте определяется как величина платежей за сверхлимитное загрязнение указанных составляющих экосистем.

Потенциальный риск $R(E)$, входящий в качестве множителя в уравнения (1.1), 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 [56,113]. 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 объ-

екту территории.

Суть количественной оценки потенциального риска заключается в построении всего множества возможных сценариев возникновения и развития аварий на объекте, с последующей оценкой частот (вероятностей) реализации каждого из сценариев и определением последствий развития аварии для реципиента и селитебной территории.

Анализ производственных аварий и катастроф на потенциально опасных объектах показывает, что уровень потенциального риска в данной точке прилегающей к объекту территории зависит от целого ряда случайных событий, совокупность которых может привести к поражению реципиента. Эти случайные события можно разделить на две группы [84; 161].

Первая группа событий (техногенные события) относится к технической системе, то есть потенциально опасному объекту, и характеризует стохастический процесс реализации опасности (бесконтрольное высвобождение энергии или утечка вредных веществ).

Вторая группа (ожидаемые потери) - характеризует стохастический процесс поражения реципиента и зависит от совокупности случайных событий, предопределяющих поражающее действие опасности в рассматриваемой точке прилегающей к объекту территории.

Техногенные события объединяют все мыслимые пути развития аварии на объекте в рассматриваемом сценарии. Им свойственна причинно-следственная взаимосвязь, то есть это цепь событий от исходного, устойчивого состояния технической системы или объекта до конечного, аварийного состояния.

Исходной причиной аварийной ситуации является появление отказа, причем большинство единичных отказов являются марковскими, то есть не зависят от предыстории системы и легко локализуются. На практике это означает, что единичный отказ может привести к остановке производства, но не к аварии. К аварии ведет накопление единичных отказов, включающих и «человеческий фактор» [220]. В этой связи справедливо утверждение, что в любой сложной системе всегда возможен немарковский отказ, вызывающий множество последующих отказов. Лавинообразное нарастание отказов есть развитие аварийной ситуации в аварию с потерей контроля и управления технологическим процессом и переходом системы в пораженное состояние [171]. Вполне очевидно, что все техногенные события - зависимые события. Конечное событие - это подмножество «А» в рассматриваемом множестве сценариев, объединяющее все возможные цепи событий аварийной ситуации с реализацией опасности, следствием которой является формирование поля поражающих факторов на прилегающей к объекту территории.

Механизмы возникновения и развития аварий на объекте весьма не равнозначны, поэтому число возможных сценариев может достигать нескольких тысяч. В этой связи крайне важными являются обоснование и оценка частот воз-

никновения аварийных ситуаций. По существу итогом анализа первичных факторов риска должно явиться построение матрицы, отражающей связь между частотами исходных событий и массой вещества, участвующего в формировании поля поражающих факторов.

Рассматриваемое конечное событие развития аварийной ситуации на объекте характеризуется статистической вероятностью (частотой) реализации опасности. В настоящее время существуют различные методы и подходы к оценке частоты исходного события.

Инженерные методы оценки частоты аварии. Наиболее часто в декларациях промышленной безопасности частота исходного события определяется методами инженерного подхода к оценке риска аварии. Данные методы изложены в [220]. Они базируются на построении и расчете деревьев отказов, деревьев событий и деревьев последствий, в основу которых положена теория надежности систем. Причем, использование данных методов предполагает наличие полной информации о частотах первичных отказов, взаимных влияниях отказов элементов и других исходных данных о системе. Зачастую такая информация для большинства элементов технологических установок нефтяной, нефтеперерабатывающей и химической промышленности отсутствует. Метод дерева отказов требует использования сложной логики. Большие деревья отказов трудны в понимании, не совпадают с обычными схемами протекания процессов и математически неоднозначны. Деревья последствий быстро вырастают до слишком больших размеров и также становятся трудны в понимании. Деревья отказов и деревья последствий несут в себе элементы субъективистской логики, а степень их адекватности реальным технологическим процессам в рассматриваемой системе пропорциональна квалификации, интуиции и опыту исследователя.

Метод анализа статистических данных. Наиболее строгим математическим методом определения частоты аварий является метод анализа статистических данных, построенный на классическом принципе определения относительной частоты события при длительных испытаниях (статистической вероятности события). Необходимо отметить, что в отдельных работах по промышленной безопасности **статистическая частота** событий подменяется **временной частотой** и, на ее основе, необоснованно выполняются вероятностные оценки уровня опасности объекта. Применение метода анализа статистических данных дает адекватные результаты только в том случае, если объем исходной информации по авариям достаточно полон и эта информация получена на базе представительной выборки. Когда речь идет не об относительных частотах при длительных испытаниях, а о «редких событиях», когда объем исходной информации об авариях на рассматриваемом объекте (или в отрасли) объективно ограничен, то становится невозможным формальное применение традиционных методов математической статистики. Это обстоятельство требует привлечения нового подхода к проблеме статисти-

стического точечного оценивания, базирующегося на непараметрических методах математической микростатистики, использования эмпирических функций распределения и применения принципа максимума неопределенности [67].

Метод экспертных оценок. Альтернативный подход к проблеме «редких явлений» основывается на субъективистской логике. Такой подход отвергает понятие об истинной вероятности и основывается на идее представления вероятности как меры субъективных мнений и убеждений. Методы обращения убеждений и мнений в критерий риска включают нетривиальную и подчас противоречивую операцию определения вероятности с использованием опроса экспертов в сочетании с теоремой Байеса. Бесспорно, привлечение знаний, интуиции и опыта многих высококвалифицированных специалистов-экспертов, с последующей обработкой полученных экспертных оценок на основе современных методов прикладной математической статистики, прежде всего статистики объектов нечисловой природы, в частности, теории нечетких множеств, и современной компьютерной техники, позволяет получить приемлемый для последующих расчетов результат в условиях неопределенности и отсутствия статистики аварий на исследуемом объекте [149].

Основой для вычисления показателей интегрированного риска является распределение потенциального риска по территории (поле потенциального риска), или, в принятой в промышленной безопасности терминологии, картированный риск [60; 84]. Картированный риск – это выстроенные на карте, в пределах круга вероятного поражения, изолинии потенциального риска, связанного с опасным производственным объектом или фактором. Круг вероятного поражения (КВП) интерпретируется нами как площадь внутри окружности с центром в точке реализации опасности, за пределами которой вероятность поражения реципиента риска исчезающе мала. Радиус окружности, ограничивающей данную территорию, определяется установленным для рассматриваемого реципиента риска порогом воздействия основного поражающего фактора при реализации на потенциально опасном объекте постулируемой максимальной гипотетической аварии.

Характер поля потенциального риска вокруг ПОО существенно зависит, как от типа опасности, так и от вида реципиента. То есть поле потенциального риска поражения человека не совпадает с полем потенциального риска поражения материального объекта и не совпадает с полем потенциального риска поражения экосистем. Естественно, не совпадают и поля потенциальных рисков токсического, фугасного и теплового поражения. Следовательно, и математические модели потенциального риска для каждого типа опасности и вида реципиента будут различны.

Рассматриваемый подход к анализу риска предполагает построение для конкретного вида реципиента интегрального (суммарного) поля потенциального риска от источника конкретной опасности для всего множества рассматриваемых

сценариев реализации данной опасности. Если анализу подвергается не один объект, а система объектов, распределенных по территории, или единичный объект является источником различных типов опасностей, то проводится суммирование полей потенциальной опасности для рассматриваемого вида реципиента от каждого источника или типа опасности.

Основным показателем тяжести последствий аварийного выброса на исследуемом потенциально опасном объекте является величина массы вещества (M), участвующего в создании поражающего фактора. Величина массы аварийного выброса является случайной величиной и характеризуется соответствующим вероятностным распределением. В зависимости от решаемой задачи и глубины проработки вопросов анализа и квантификации рисков, M может быть представлена дискретной или непрерывной случайной величиной.

Если исследователей интересует оценка последствий конкретного набора сценариев наиболее крупных аварий, либо наиболее характерных аварий из каждого класса возможных аварий на объекте, то в этом случае для оценки потенциального риска вполне возможно использовать дискретную формулу полной вероятности

$$R(E) = \sum_{j=1}^g P(M_j) \cdot P(\Gamma/M_j), \quad (1.2)$$

где j - номер сценария (гипотезы), g - число рассматриваемых сценариев (гипотез); $P(M_j)$ - вероятность (частота) гипотезы j , $P(\Gamma/M_j)$ - условная вероятность координатного поражения реципиента при гипотезе j [29].

Для оценки соответствующей j -му сценарию вероятности (частоты) $P(M_j)$ данная гипотеза рассматривается как сложное событие, состоящее в совместном выполнении элементарных событий. Эти элементарные события описываются вероятностями P_k , поэтому

$$P(M_j) = \lambda_A \cdot \prod_{k=1}^s P_k, \quad (1.3)$$

где λ_A - частота аварий на объекте; s - число рассматриваемых элементарных событий, совместное выполнение которых предопределяет развитие j -го сценария.

Значения P_k в уравнении (1.3) определяются с использованием дерева событий. Дерево событий для группы сценариев g показано на рис. 1.1.

Наиболее полно и, с нашей точки зрения, адекватно существу проблемы анализа потенциальной опасности промышленного объекта отвечает подход, основанный на предположении о непрерывности случайной величины M - массы аварийного выброса. В этом случае потенциальный риск может быть представлен интегральной формулой полной вероятности:

$$R(E) = \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} f(M) \cdot P(\Gamma / M) dM, \quad (1.4)$$

где $f(M)$ - плотность распределения вероятностей (частот) реализации аварийных выбросов на объекте; $P(\Gamma/M)$ - вероятность поражения реципиента в рассматриваемой точке пространства при условии аварийного выброса опасного вещества (определяется координатным законом поражения реципиента); Γ – расстояние от места аварии до рассматриваемой точки пространства; M - масса аварийного выброса опасного вещества; $[M_{\min}, M_{\max}]$ - диапазон изменения массы аварийных выбросов на потенциально опасном объекте.

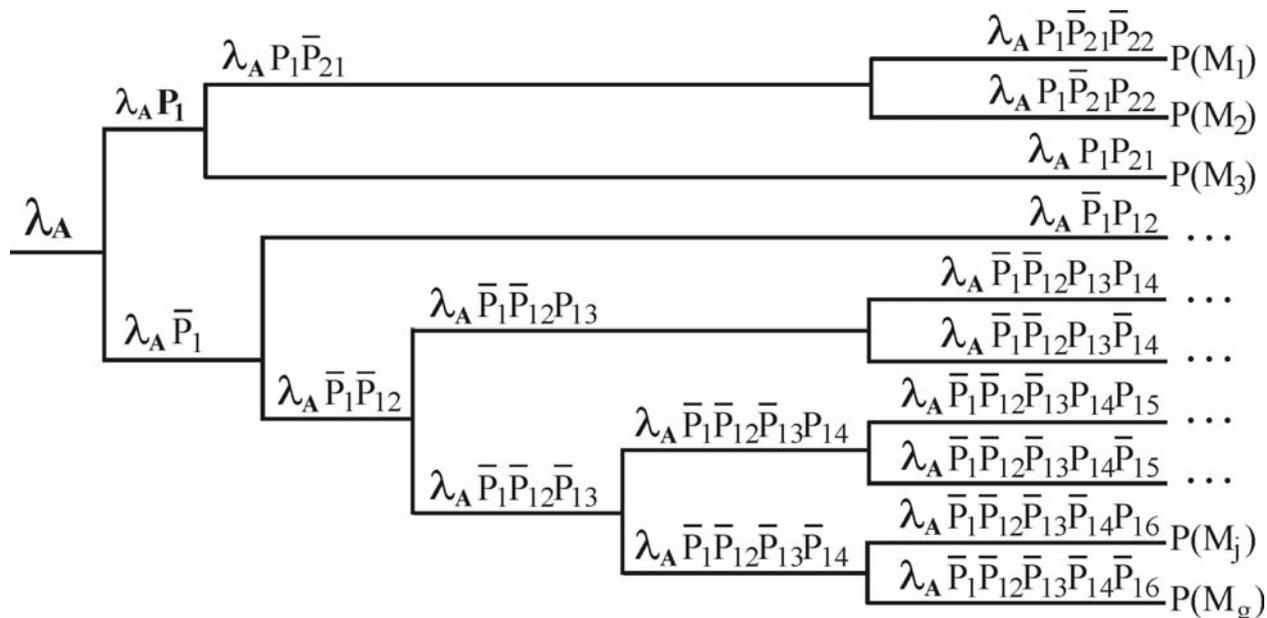


Рис.1.1. Дерево событий для группы сценариев

Функция плотности распределения частот аварийных выбросов $f(M)$ является ключевой величиной модели потенциального риска. Вид и параметры функции $f(M)$ определяются методами регрессионного анализа. Применение методики построения регрессионной модели возникновения и развития техногенных аварий показана нами в [82]. При построении регрессионной модели, на основе репрезентативной выборки из определенного класса аварий, учитывается массив данных о возможных аварийных выбросах в рассматриваемой группе сценариев и частоте их появления, взвешенных по условным вероятностям возникновения и развития аварий на потенциально опасном объекте. Такой подход позволяет получить **интегральную оценку** потенциального риска в местах нахождения реципиентов, расположенных в пределах КВП, от всего спектра аварийных выбросов в диапазоне от M_{\min} до M_{\max} . График функции $f(M)$ в теории вероятностей [29] называется кривой распределения частот. По существу кривая распределения частот аварийных выбросов $f(M)$ является аналогом кривой Фармера [220] и может служить общей оценкой уровня опасности технической системы.

Остановимся более подробно на последовательности оценки риска социального ущерба на химически опасных объектах и экологического риска для магистральных нефтепроводов.

1.2. Математические модели и методы анализа риска социального ущерба от аварий на химически опасных объектах

В основу модели риска социального ущерба (коллективного риска), как было показано выше (1.1), положена формула, связывающая частоту $R(E)$ реализации неблагоприятного события и ущерб Y_C , нанесенный данным неблагоприятным событием

$$\left\{ \begin{array}{l} R(Y_C) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij}(E) \cdot Y_{cij}, \\ Y_{cj} = P_j(N) \cdot N_j \cdot ЦСЖ, \\ R_i(E) = \prod_{k=1}^w P_k \cdot \left[\int_{M_{i\min}}^{M_{i\max}} f_i(M) \cdot P(\Gamma/M) dM \right] \end{array} \right. \quad (1.5)$$

где $R(Y_C)$ – коллективный риск; $P_j(N)$ – вероятность нахождения группы людей с одинаковыми условиями поражения в рассматриваемой j -й зоне риска; N_j – количество людей в группе; ЦСЖ – цена спасения жизни; $f_i(M)$ – плотность распределения частоты аварийных выбросов на i -м блоке объекта; $P(\Gamma/M)$ – координатный закон токсического поражения человека; Γ – расстояние от места аварии до j -й зоны риска; P_k – вероятности случайных независимых событий, предопределяющих поражение людей в рассматриваемой зоне риска; n – число блоков (технологических установок) объекта, являющихся потенциальным источником токсической опасности; m – число рассматриваемых зон риска; w – число независимых случайных событий, совместное выполнение которых предопределяет поражение человека в рассматриваемой зоне риска.

Методика расчета потенциального риска токсического поражения.

В выражении (1.5) потенциальный риск $R(E)$ обоснован и представлен нами интегральной формулой полной вероятности, которая включает следующие основные элементы: плотность распределения частоты аварийных выбросов $f(M)$, координатный закон поражения человека $P(\Gamma/M)$ и вероятности случайных независимых событий P_k , совместное выполнение которых предопределяет поражение человека в рассматриваемой зоне риска. В качестве вероятностей P_k нами рассматриваются наиболее значимые независимые случайные события: $P(\varphi;v)$ – вероятность реализации ветра данного направления и скорости, $P(w)$ – вероятность реализации рассматриваемых метеоусловий, $P(s)$ – вероятность реализации в течение года рассматриваемого класса устойчивости атмосферы (ин-

версия, изотермия, конвекция).

Основным показателем токсической опасности химического объекта в пораженном состоянии, при прочих равных условиях, является масса аварийного выброса ядовитого вещества. Следовательно, необходимо знать характер распределения массы неконтролируемого выброса по частотам реализации аварии, то есть плотность распределения частот аварийных выбросов $f(M)$.

Последовательность построения регрессионной модели. Функция $f(M)$ определяется методами регрессионного анализа. Процедура построения регрессионной модели состоит из следующих, в достаточной степени самостоятельных этапов.

На первом этапе выявляется последовательность исходных, инициирующих аварию, случайных событий и разрабатывается всё множество возможных на данном химически опасном объекте сценариев возникновения и развития аварии и для каждого из них рассчитывается масса неконтролируемого выброса. Её величина определяется параметрами выбранной модели истечения двухфазной жидкости из i -го аварийного блока. В качестве одной из таких моделей рассмотрим формулу [126], описывающую зависимость массового расхода жидкой фазы $q_{вбp}$ от физических условий содержания опасного вещества в аварийном блоке и параметров аварийного истечения

$$\begin{cases} q_{вбp} = 0,6 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{4} \cdot d^2 \cdot \rho_{ж} \cdot \sqrt{\frac{P_{ж} - P_0}{\rho_{ж}} + g \cdot H}; \\ M = \int_0^{t_{ист}} q_{вбp} dt. \end{cases} \quad (1.6)$$

Из выражения (1.6) можно видеть, что масса аварийного выброса $M = f(d, H, P_{ж}, t_{ист})$ является функцией следующих случайных параметров: диаметра аварийного отверстия d , высоты столба жидкости над уровнем отверстия H , давления в аварийном блоке $P_{ж}$, времени истечения опасной жидкости $t_{ист}$. Указанные величины рассматриваются нами в качестве **основных параметров сценариев** развития аварии.

По результатам расчета определяется множество неконтролируемых выбросов опасного вещества и формируется **матрица масс** $\|M_{ij}\|$. При этом, в зависимости от количества учитываемых параметров сценария развития аварии, могут использоваться в расчетах одномерные (вектор), двумерные (рис.1.2), трехмерные (рис.1.3) и многомерные матрицы масс.

Остановимся более подробно на двухмерной модели сценария развития аварии на химически опасном объекте, выбрав, для примера, в качестве варьируемых параметров в выражении (1.6) диаметр аварийного отверстия d и высоту расположения отверстия h при фиксируемом значении остальных величин. Высоты отверстия h , высота столба жидкости над уровнем отверстия

H и высота жидкости в резервуаре H_p связаны соотношением $H = H_p - h$. В этом случае масса аварийного выброса будет определяться функциональной зависимостью $M = f(d, h)$ при $t_{ист} = const$ и $P_{ж} = const$. Вид указанной матрицы масс показан на рис.1.2.

	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_j	h_m
d_1	M_{11}	M_{12}	M_{13}	M_{14}	M_{15}	M_{1j}	M_{1m}
d_2	M_{21}	M_{22}	M_{23}	M_{24}	M_{25}	M_{2j}	M_{2m}
d_3	M_{31}	M_{32}	M_{33}	M_{34}	M_{35}	M_{3j}	M_{3m}
d_i	M_{i1}	M_{i2}	M_{i3}	M_{i4}	M_{i5}	M_{ij}	M_{im}
d_n	M_{n1}	M_{n2}	M_{n3}	M_{n4}	M_{n5}	M_{nj}	M_{nm}

Рис. 1.2. Двухмерная матрица масс аварийных выбросов

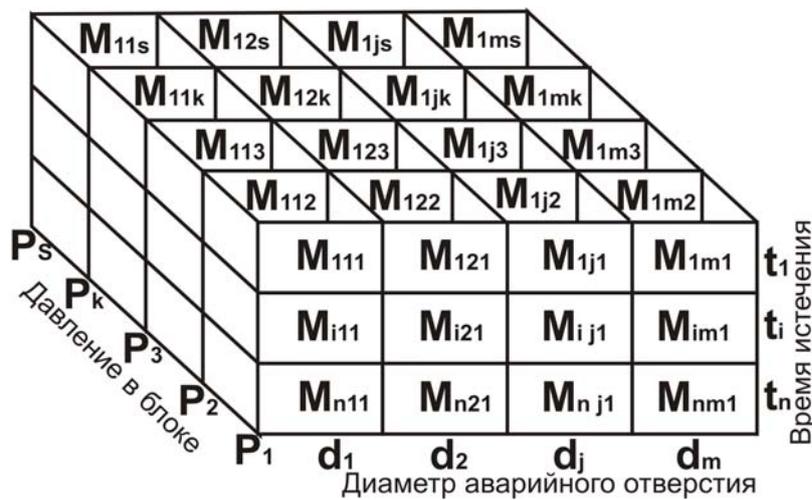


Рис. 1.3. Трехмерная матрица масс аварийных выбросов

На втором этапе построения регрессионной модели рассчитываются относительные частоты реализации сценариев аварий.

Для оценки соответствующей ij -му сценарию относительной частоты (вероятности) аварийного выброса $\Lambda(M_{ij})$ данная гипотеза рассматривается как сложное событие, состоящее в совместном выполнении элементарных событий. Эти элементарные события, как было показано выше, описываются относительной частотой аварий на объекте λ_A и вероятностями $P(d_i)$ и $P(h_j)$ соответствующих параметров сценария d и h .

При наличии на объекте нескольких технологических блоков, различающихся спецификой сценариев возникновения и развития аварии, величина λ_A распределяется между блоками на основе дерева событий, рис. 1.4.

Так как параметры сценариев являются случайными величинами, то они характеризуются соответствующими вероятностными распределениями. Исходя из данных о ретроспективной информации по отказам оборудования на конкретном химически опасном объекте, в качестве стандартных распределений вероятностей условного диаметра аварийного отверстия d и высоты

аварийного отверстия h , нами использовались соответственно распределение Вейбулла и показательное распределение, рис.1.5.

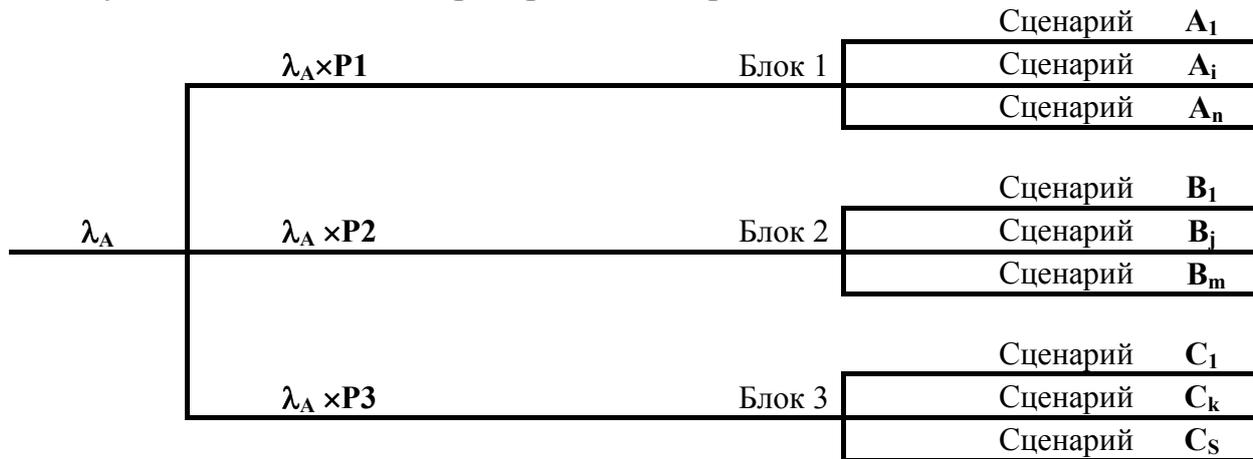


Рис.1.4. Дерево событий для группы сценариев

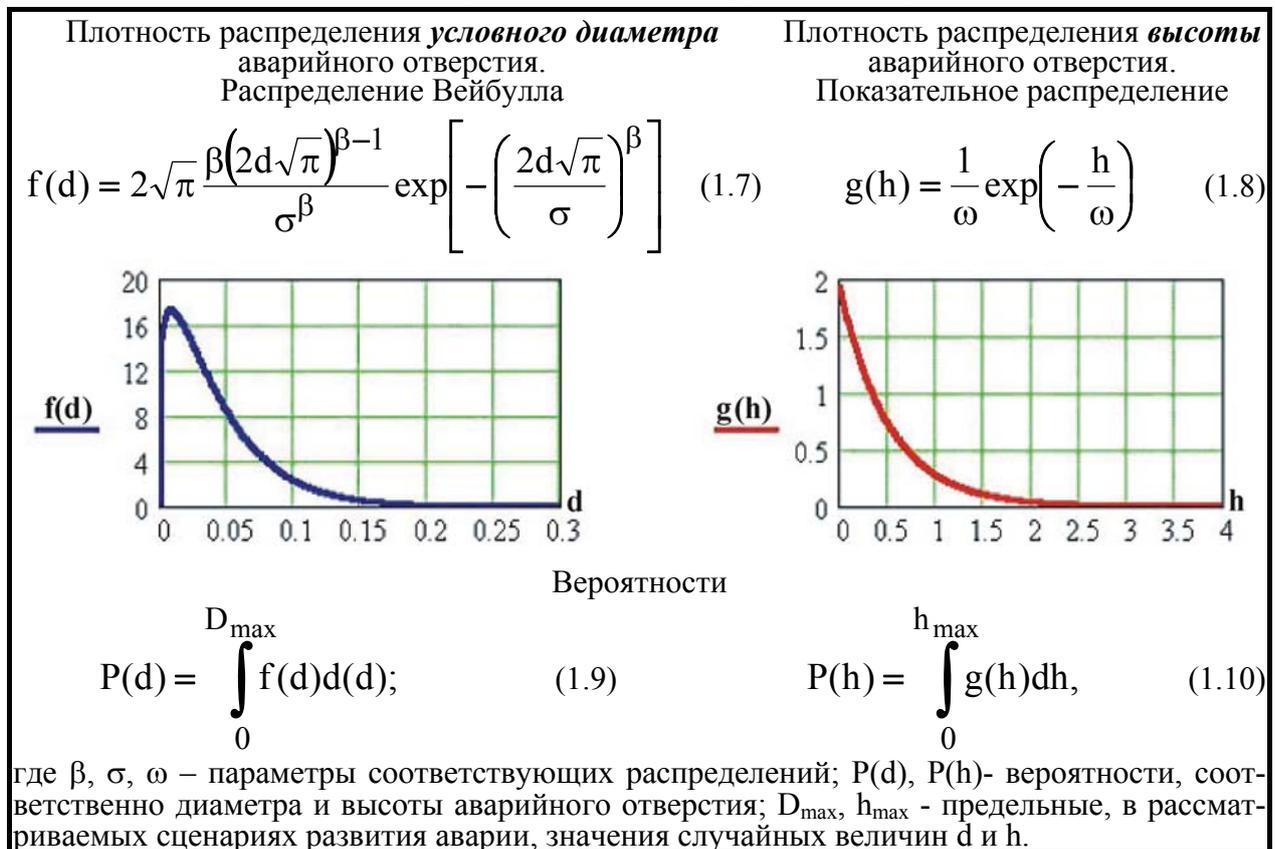


Рис.1.5. Стандартные распределения вероятностей параметров сценария

Используя данные о характере протекания аварий, с учетом экспертных оценок, определяются параметры указанных распределений. При этом, так как мы приняли, что все возможные значения случайных величин d и h сосредоточены в конечных интервалах $(0, D_{\max})$ и $(0, h_{\max})$, функции $f(d)$ и $g(h)$ нормируются из условия равенства выражений (1.9) и (1.10) единице.

Значения вероятностей для каждой ячейки сформированной матрицы масс (рис.6) получают дискретизацией функций (1.9) и (1.10)

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i(d) = \int_{D_i}^{D_{i+1}} f(d)d(d), \quad i = \overline{1, n}; \\ P_j(h) = \int_{h_j}^{h_{j+1}} g(h)dh, \quad j = \overline{1, m}; \\ n = \frac{D_{\max}}{\delta d}, \quad m = \frac{h_{\max}}{\delta h}, \end{array} \right. \quad (1.11)$$

где δd и δt – шаги дискретизации функций.

Фиксированные значения вероятностей для каждой ij -й ячейки определяем следующим образом:

$$P_{ij}(M) = P_i(d) \cdot P_j(h) = \left[\int_{D_i}^{D_{i+1}} f(d)d(d) \right] \cdot \left[\int_{h_j}^{h_{j+1}} g(h)dh \right]. \quad (1.12)$$

На их основе формируется матрица вероятностей соответствующих сценариев развития аварии $\|P_{ij}\|$, рис.1.6.

	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_j	h_m
d_1	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{1j}	P_{1m}
d_2	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	P_{25}	P_{2j}	P_{2m}
d_3	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{34}	P_{35}	P_{3j}	P_{3m}
d_i	P_{i1}	P_{i2}	P_{i3}	P_{i4}	P_{i5}	P_{ij}	P_{im}
d_n	P_{n1}	P_{n2}	P_{n3}	P_{n4}	P_{n5}	P_{nj}	P_{nm}

Рис.1.6. Матрица вероятностей появления массы аварийных выбросов

На следующем этапе построения регрессионной модели определяют **относительную, статистическую частоту (вероятность) аварии** λ_A на потенциально опасном объекте и переходят в соответствии с выражением (1.3) от матрицы распределения вероятностей сценариев $\|P_{ij}\|$ к матрице распределения частот $\|\Lambda_{ij}\|$ аварийных выбросов.

В этой связи, обратим внимание на тот факт, что в излагаемом материале под **частотой аварии** понимается **вероятность** рассматриваемого события за интервал времени Δt , как правило, за год, определяемая на основе методов математической статистически или логико-вероятностных методов и некоторых моделей теории надежности для высоконадежных и стареющих систем [246].

С учетом полученной информации о частоте аварий формируется матрица частот, взвешенных по вероятности реализации сценариев

$$\|\Lambda_{ij}\| = \lambda_A \times \|P_{ij}\|. \quad (1.13)$$

Матрица частот аварийных выбросов приведена на рис.1.7.

	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h _j	h _m
d ₁	Λ ₁₁	Λ ₁₂	Λ ₁₃	Λ ₁₄	Λ ₁₅	Λ _{1j}	Λ _{1m}
d ₂	Λ ₂₁	Λ ₂₂	Λ ₂₃	Λ ₂₄	Λ ₂₅	Λ _{2j}	Λ _{2m}
d ₃	Λ ₃₁	Λ ₃₂	Λ ₃₃	Λ ₃₄	Λ ₃₅	Λ _{3j}	Λ _{3m}
d _i	Λ _{i1}	Λ _{i2}	Λ _{i3}	Λ _{i4}	Λ _{i5}	Λ _{ij}	Λ _{im}
d _n	Λ _{n1}	Λ _{n2}	Λ _{n3}	Λ _{n4}	Λ _{n5}	Λ _{nj}	Λ _{nm}

Рис. 1.7. Матрица частот аварийных выбросов

Полученный массив данных по аварийным выбросам $\|M_{ij}\|$ (рис.1.2) и частотам их появления $\|\Lambda_{ij}\|$ (рис.1.7) обрабатывается методами регрессионного анализа в системе *STATGRAPHICS Plus v-5.0*, рис.1.8.

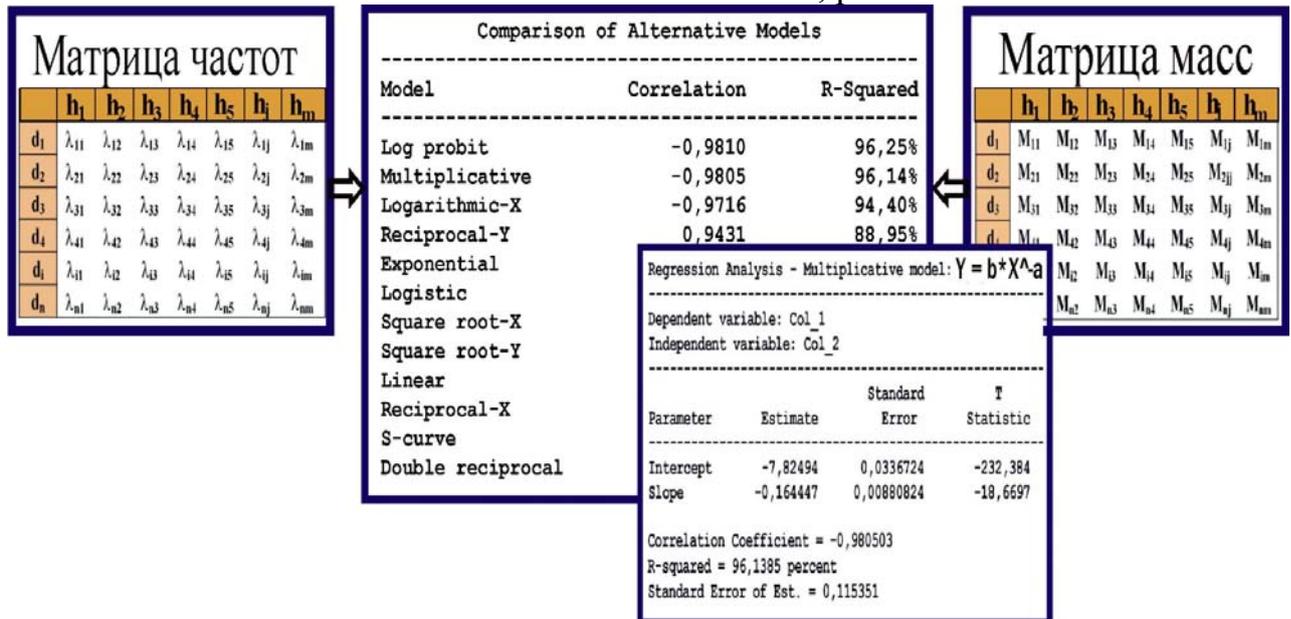


Рис.1.8. Результаты регрессионного анализа

На его основе определяются регрессионная модель и параметры плотности распределения частот аварийных выбросов на рассматриваемом опасном промышленном объекте. Вид регрессионной модели показан на рис.1.9.

Для построения регрессионной модели аварийных выбросов на химически опасных объектах нами также разработана методика использования метода статистических испытаний Монте-Карло, позволяющего генерировать значительную по объему (более миллиона) выборку случайных величин, например d, h и t, определяющих распределение масс аварийных выбросов на объекте.

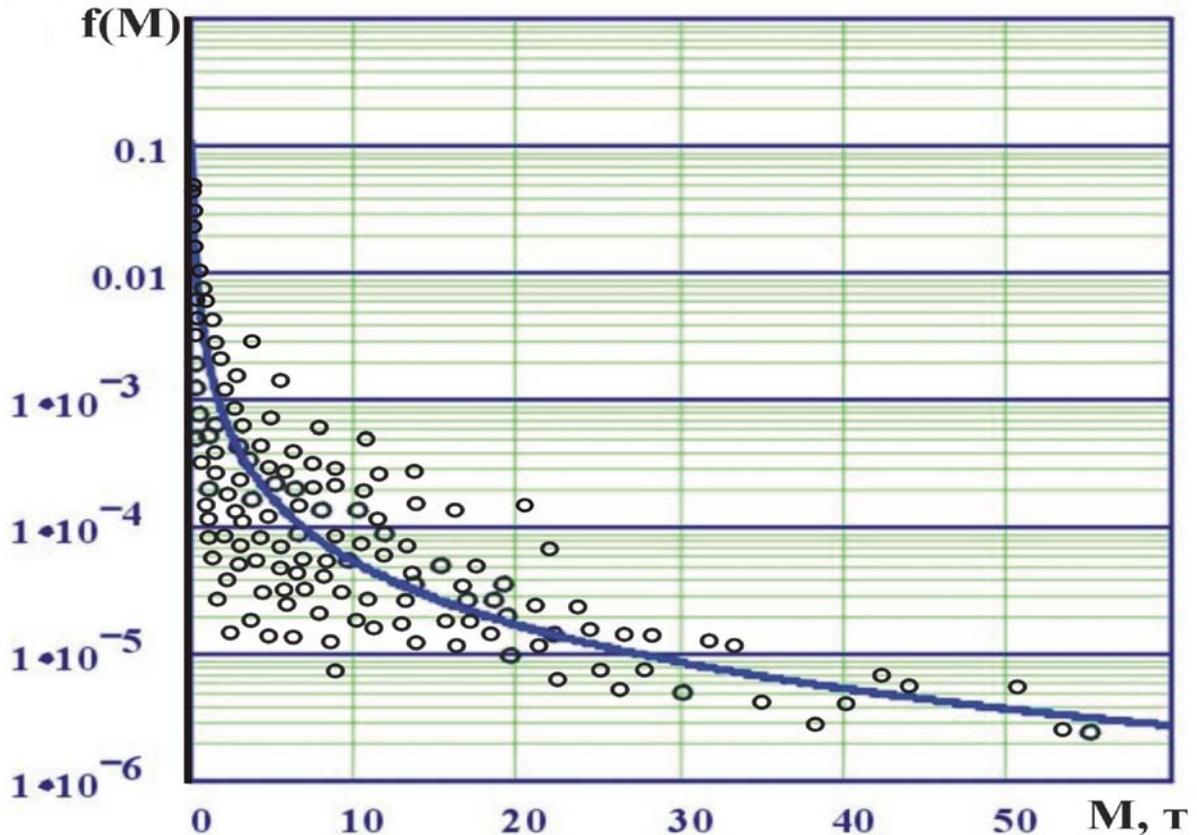


Рис.1.9. Плотность распределения частот аварийных выбросов

Такой подход, основанный на классических методах теории вероятности, позволяет в условиях объективно ограниченной исходной информации получить регрессионную модель, адекватную пораженному состоянию объекта. Методология применения метода Монте-Карло представлена на рис.1.10.

Вид регрессионной модели и значения ее параметров в значительной степени определяются исходной базой данных и зависят от конструктивно - технологических характеристик и технического состояния рассматриваемого технологического оборудования объекта, структуры причин аварий, уровня наблюдаемости системы, подготовленности персонала, внешних условий эксплуатации и других факторов. Функция $f_i(M)$ – важная характеристика технической системы, определяющая опасность объекта, как источника аварийных выбросов, не числом для отдельного события, а кривой плотности распределения частот, построенной для различных сценариев аварии с учетом их вероятности.

По результатам регрессионного анализа (рис.1.9 и рис.1.10) видно, что плотность частот аварийных выбросов опасного вещества для рассматриваемого блока технологической установки имеет степенное (мультипликативное) распределение $f(M) = \beta \cdot M^{-\alpha}$. Представляет интерес провести сравнительный анализ вероятностных распределений чрезвычайных ситуаций техногенного характера. На рис.1.11 показаны плотности нормального и степенного распределения аварий и катастроф в техносфере.

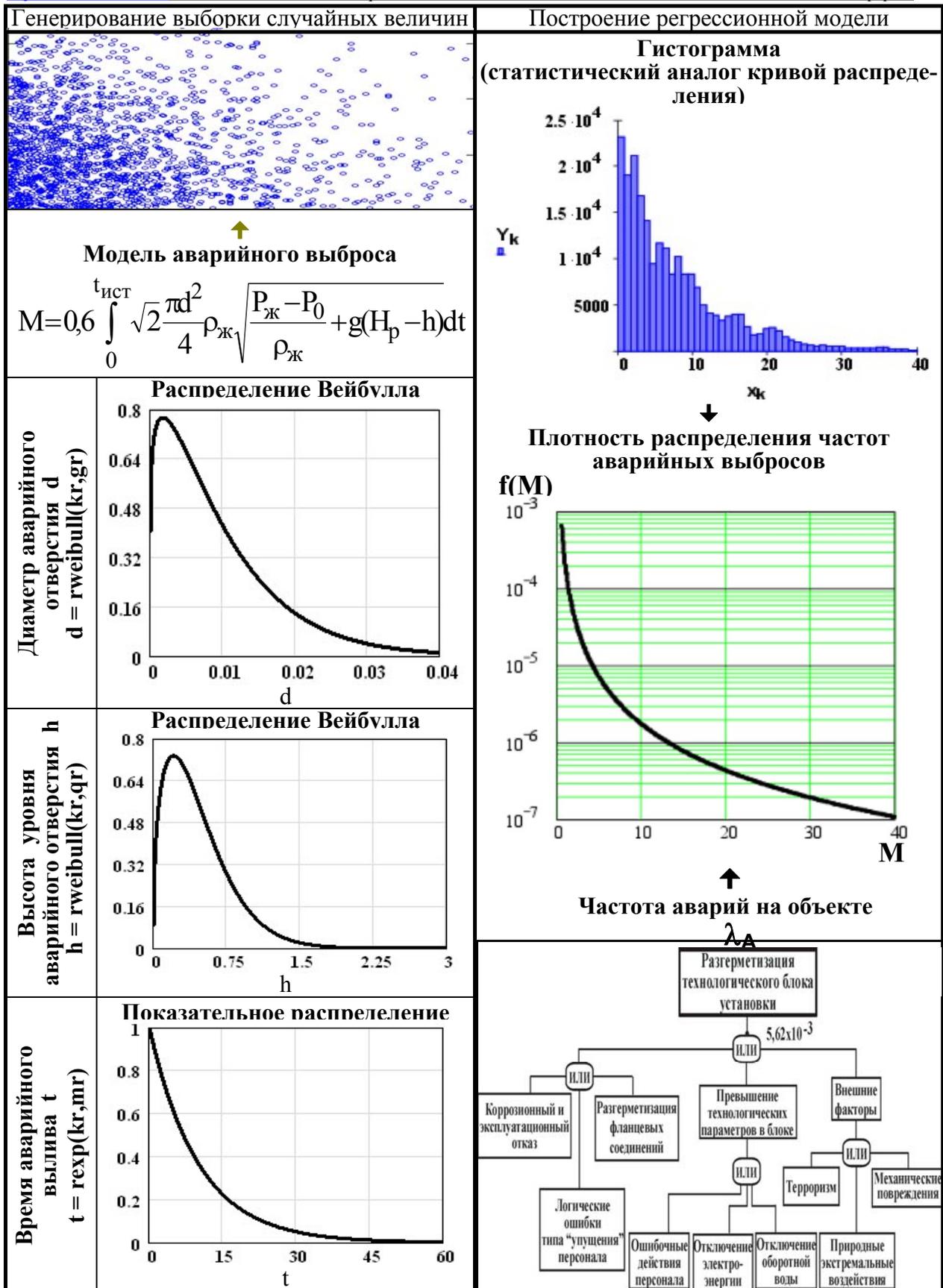


Рис.1.10. Построение регрессионной модели аварийных выбросов на основе метода статистических испытаний Монте-Карло

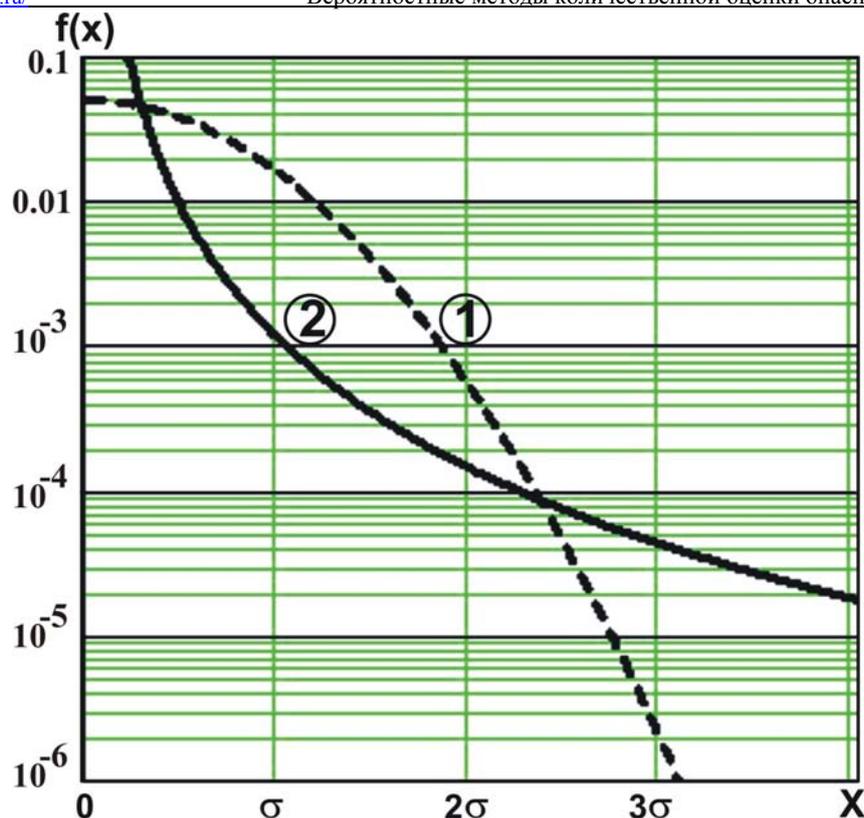


Рис.1.11. Плотности распределения аварий и катастроф в техносфере
① – нормальное (гауссово) распределение; ② – степенное распределение

Традиционное представление о том, что поскольку частота возникновения и развития аварий на потенциально опасных объектах техносферы зависит от многих причин, то она имеет нормальное распределение – неверно. Соответствующая нормальному распределению кривая (1) на рис.1.11 показывает, что эта функция очень быстро убывает при больших значениях x . Следовательно, в распределении Гаусса большие отклонения от средних величин ($> 3\sigma$) редки, ими можно пренебречь. Опираясь на этот закон, считали, что крупные аварии на АЭС могут происходить не чаще, чем раз в 100 000 или миллион лет.

Однако анализ статистики, связанной с риском чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера, показывает, что часто на практике мы имеем дело именно с мультипликативным законом распределения плотности частот негативных событий вида $f(X) = \beta \cdot X^{-\alpha}$, при $X \gg 1$, $\alpha \gg 1$ (кривая (2) на рис.1.11). «Хвосты» этих распределений убывают гораздо медленнее ($>> 3\sigma$), за что они получили названия «распределений с тяжелыми хвостами». Теория риска позволяет утверждать, что степенное распределение вероятностей «с тяжелыми хвостами» имеет фундаментальный характер для процессов, подпадающих под категорию катастрофических [153;35;150]. Недавно появившаяся теория самоорганизованной критичности показывает, что за общей степенной статистикой скрываются общие системные механизмы. И это дает ключ к прогнозированию чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера и

к методам управления рисками в этих ситуациях [110].

Обоснование и применение координатного закона токсического поражения человека $P(G/M)$. На следующем этапе количественной оценки потенциального риска $R(E)$ рассматриваются события, связанные с воздействием поражающих факторов аварии на человека в рассматриваемой j -й области прилегающей территории. Как известно, поражение человека при получении им определенной токсодозы, величина которой зависит от массы аварийного выброса, расстояния до места аварии, метеорологических и топографических особенностей местности, времени экспозиции, носит случайный характер и описывается параметрической зависимостью «доза-эффект». В качестве функции «доза-эффект» нами используется аппроксимация параметрического закона токсического поражения человека распределением Вейбулла, полученная на основе исследований Института токсикологии МЗ РФ и ВНИИ ГО и ЧС в области токсического поражения человека различными сильнодействующими ядовитыми веществами, результаты которых приведены в [125]. Распределение Вейбулла, аппроксимирующее параметрический закон токсического поражения человека, представлено выражением

$$P(D) = \frac{\gamma}{\sigma} \int_0^D \left(\frac{Z}{\sigma}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{Z}{\sigma}\right)^\gamma\right] dZ, \quad (1.14)$$

где $P(D)$ - вероятность токсического поражения соответствующей степени тяжести; D - текущее значение поглощенной токсодозы в рассматриваемой точке пространства; σ, γ - параметры распределения Вейбулла для рассматриваемого ядовитого вещества [82]; Z - переменная интегрирования.

В качестве примера на рис.1.12 показана зависимость вероятности поражения человека $P(D)$ хлором от концентрации паров ядовитого вещества в единице объема воздуха (C) при фиксированном времени экспозиции (τ), определяющим величину полученной человеком токсодозы $D = C \cdot \tau$.

Необходимо отметить, в этой связи, что в литературе и ряде нормативных документов в качестве функции «доза-эффект» широко используется аппроксимация параметрического закона поражения человека распределением Гаусса–Лапласа (функция ошибок) [113,95,45,135].

Верхним пределом интеграла функции ошибок $P_{\text{пор}}$ является так называемая пробит–функция Pr , отражающая связь дозы токсического поражения и пробита относительной частоты поражения

$$P_{\text{пор}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr-5} \exp\left(-\frac{Z^2}{2}\right) dZ. \quad (1.15)$$

Значения параметров пробит–функции зависят от рассматриваемой степени поражения человека [113,95,135]. Наша нормативная база и норма-

тивы западных стран зачастую значительно различаются, что требует критического подхода к использованию пробит-функций.

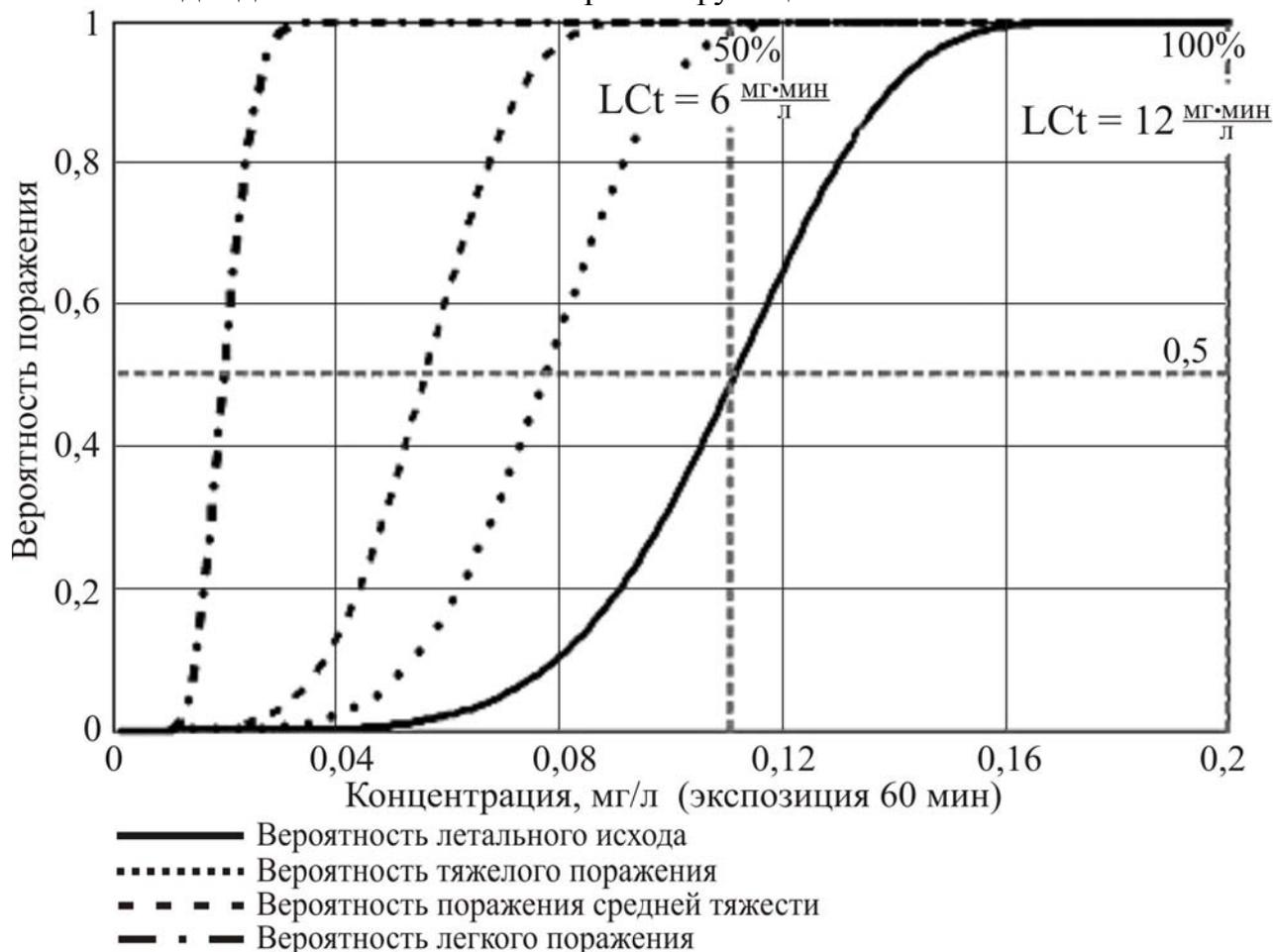


Рис.1.12. Распределение Вейбулла для оценки вероятности поражения человека хлором

Сравнительный анализ параметрических законов токсического поражения человека, аппроксимированных распределением Гаусса–Лапласа и распределением Вейбулла, показан, в качестве примера, на рис.1.13. Как видно из рисунка параметры пробит-функций, используемых различными зарубежными исследователями для описания вероятности смертельного поражения человека хлором, имеют значительный разброс.

Однако, зная параметрический закон поражения человека $P(D)$, мы не можем судить о характере распределения потенциального риска на прилегающей территории. Для решения данной задачи необходимо знать, как изменяется вероятность поражения человека по мере удаления от источника опасности, то есть от параметрического закона мы должны перейти к координатному закону токсического поражения человека $P(\Gamma)$.

Для перехода от параметрического закона поражения $P(D)$ к координатному $P(\Gamma)$ используем функциональную связь изменения токсодозы от расстояния $D = D(\Gamma)$, представленную нами в методике [90].

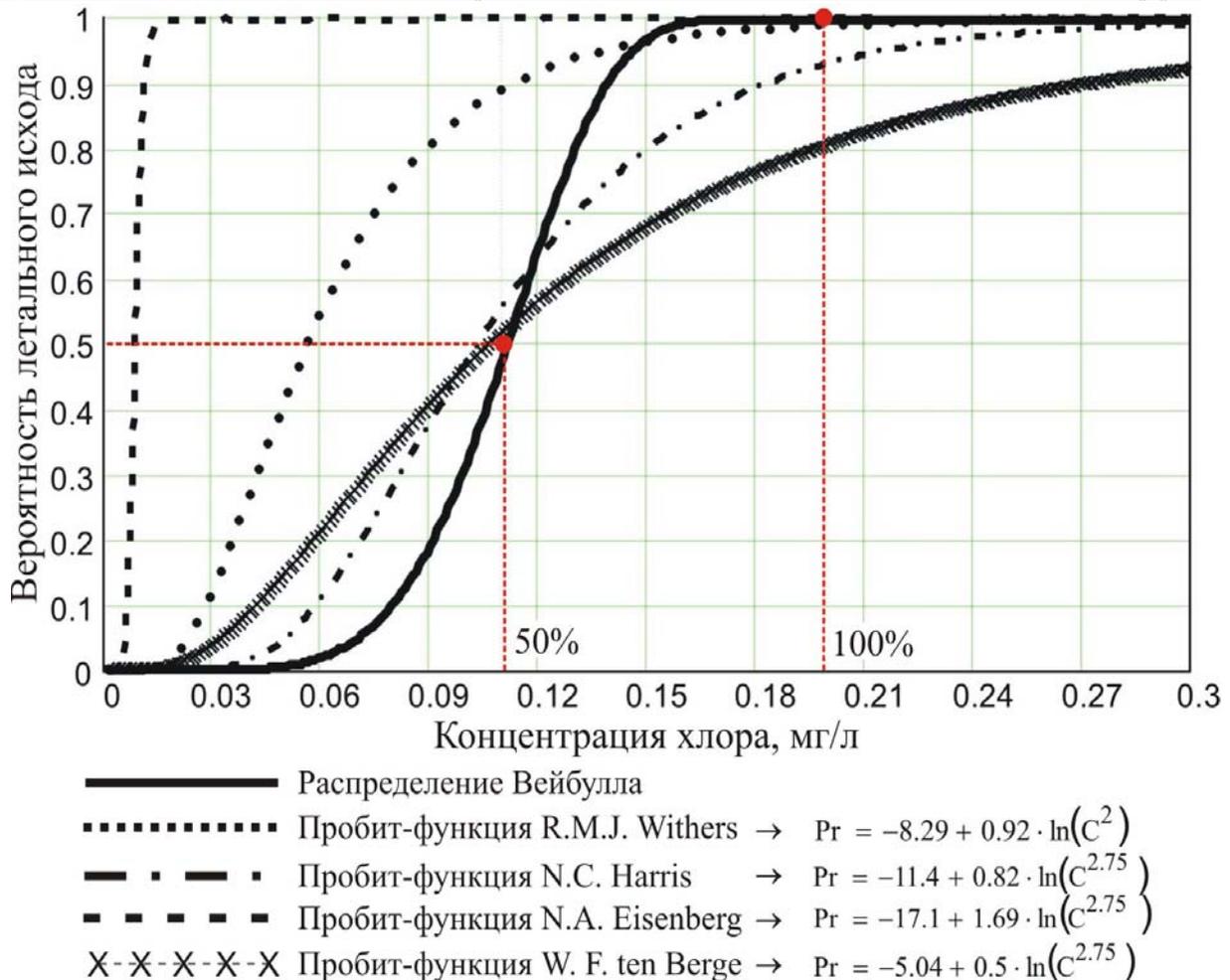


Рис. 1.13. Сравнительный анализ параметрических законов токсического поражения человека

В соответствии с нашими исследованиями [82;251] и учетом сделанных выше предположений, определяется характер распределения условной вероятности токсического поражения человека $P(\Gamma)$ в зоне химического заражения сильнодействующими ядовитыми веществами, представленной следующим выражением:

$$P(\Gamma) = \frac{\gamma}{\sigma} \int_0^{D(\Gamma)-PCt} \left(\frac{Z}{\sigma}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{Z}{\sigma}\right)^\gamma\right] dZ; \quad \text{при } LCt \geq D(\Gamma) \geq PCt, \quad (1.16)$$

где PCt , LCt – соответственно пороговая и летальная токсодозы для человека применительно к рассматриваемому ядовитому веществу.

Понимание того, что при заданном времени экспозиции существует граничный (пороговый) уровень концентрации ядовитого вещества в объеме воздуха, ниже которого вероятность летального исхода при токсическом поражении индивидуума исчезающе мала, в уравнение (1.16) нами введен параметр граничного, порогового воздействия PCt – пороговая токсодоза для человека применительно к рассматриваемому ядовитому веществу [82,57].

В качестве примера на рис.1.14 показаны результаты расчетов распределения вероятностей летальных исходов вследствие токсического поражения человека на прилегающей к объекту территории (координатные законы поражения), при реализации максимальной гипотетической аварии с выбросом сжиженного хлора на реальном химически опасном объекте.

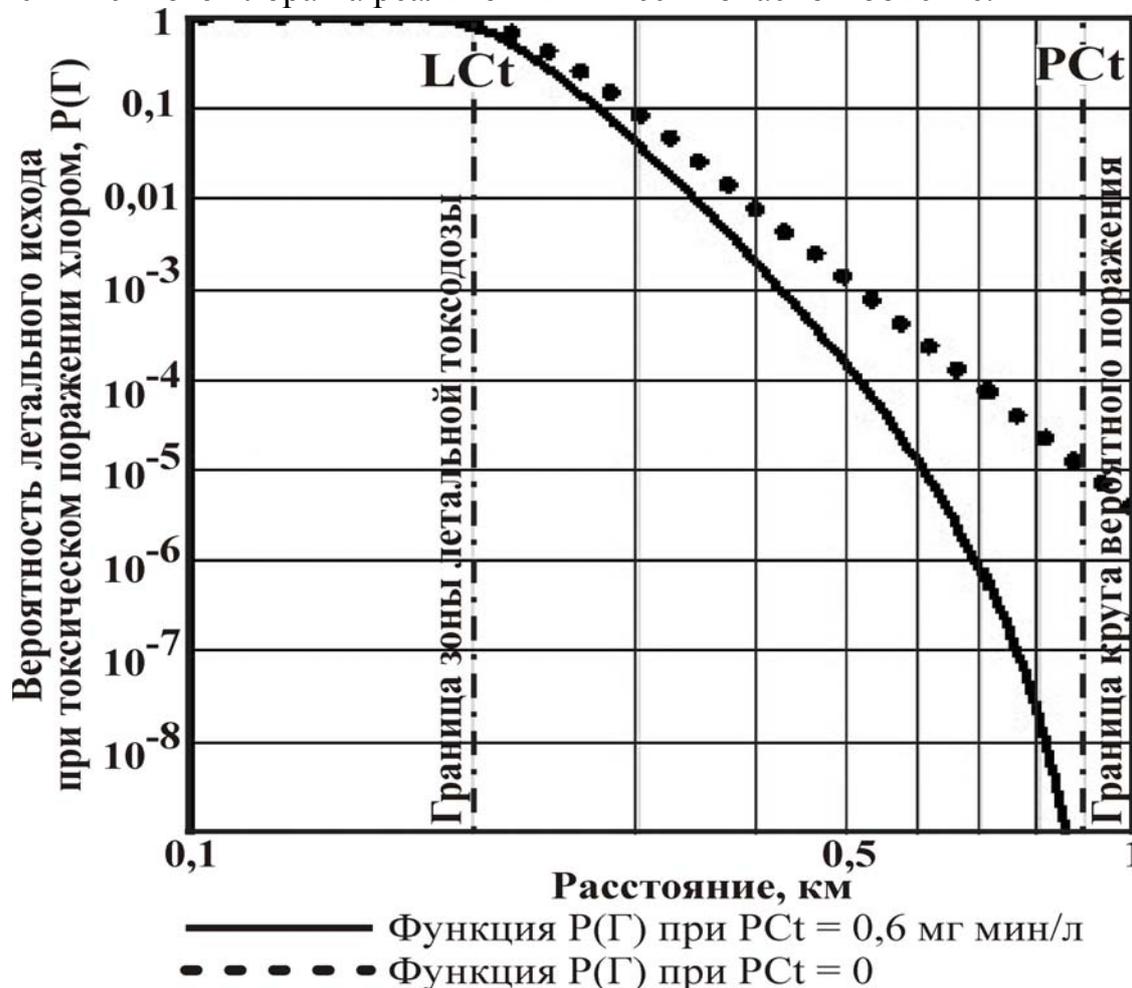


Рис.1.14. Координатные законы распределения вероятностей летальных исходов при поражении человека хлором на прилегающей к объекту территории

Из сравнительного анализа координатных законов, представленных на рис.1.14, можно видеть, что функция вероятностей летальных исходов $P(\Gamma)$, учитывающая параметр порогового воздействия PCt , стремится к нулю при асимптотическом приближении к внешней границе КВП. В другом случае, при $PCt = 0$, вероятность летальных исходов, в результате токсического воздействия паров хлора остается значимой и за пределами КВП, что приводит, по нашему мнению, к необоснованному завышению уровня опасности объекта.

Основываясь на вышесказанном и учитывая выражения (1.5), (1.16) и полученную регрессионную модель аварийных выбросов на химически опасных объектах, представленную плотностью степенного распределения с параметрами α и β , запишем уравнение потенциального риска

$$R(E) = P(\varphi; v) \cdot P(W) \cdot \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \int_0^{D(\Gamma) - P C t} \beta \cdot M^{-\alpha} \cdot \left[\frac{\gamma}{\sigma} \cdot \left(\frac{Z}{\sigma} \right)^{\gamma-1} \exp \left[- \left(\frac{Z}{\sigma} \right)^{\gamma} \right] \right] dZ dM. \quad (1.17)$$

Из выражения (1.17) можно видеть, что потенциальный риск определен в пространственных координатах – дирекционным углом φ среднегодового ветра рассматриваемого направления и расстоянием Γ от места реализации опасности. Угловая координата φ представлена дискретной функцией и определяется вероятностным распределением 8- или 16-румбовой розой ветров $P(\varphi; v)$. В пределах румба розы ветров потенциальный риск характеризуется непрерывной функцией распределения вероятностей гибели человека и зависит, при прочих равных условиях, от вида вещества, участвующего в аварии, массы аварийного выброса, времени действия источника ядовитых паров, метеоусловий, вида рельефа и вида растительности (параметра шероховатости местности).

Критерии приемлемого риска. Расчет потенциального риска и определение на его основе индивидуального риска поражения индивидуума в рассматриваемой точке пространства является необходимым для принятия соответствующих управленческих решений. В этой связи, как было показано выше, одной из важных и наглядных форм представления ожидаемых последствий аварий является картированный риск. Картированный риск представляет выстроенные на карте изолинии потенциального риска, связанные с опасным объектом и характеризующие поле риска на прилегающей территории, рис.1.15.

Однако картированный риск имеет практическое значение для принятия управленческих решений только при наличии законодательно установленных критериев приемлемого риска. Под приемлемым риском понимается такой уровень индивидуального риска, который был бы оправдан с точки зрения экономических и социальных факторов. В этой связи необходимо отметить, что общепринятых, законодательно закреплённых критериев риска для оценки опасности тех или иных потенциально опасных производств в Российской Федерации пока нет. Предлагаемые различными зарубежными организациями и специалистами пороговые значения индивидуального риска колеблются от 10^{-3} до 10^{-8} . В Нидерландах, Франции и Дании, например, эта величина составляет 10^{-6} в год [174]. В. Маршалл [113] придерживается точки зрения, что значение индивидуального риска 5×10^{-5} в год следует рассматривать как максимально допустимое для мужчин и женщин любого возраста.

Анализ частот возникновения крупных производственных аварий в Российской Федерации показывает, что уровень реального риска на порядок выше, чем в других промышленно развитых странах, а экономические возможности России сегодня крайне ограничены [57,25].

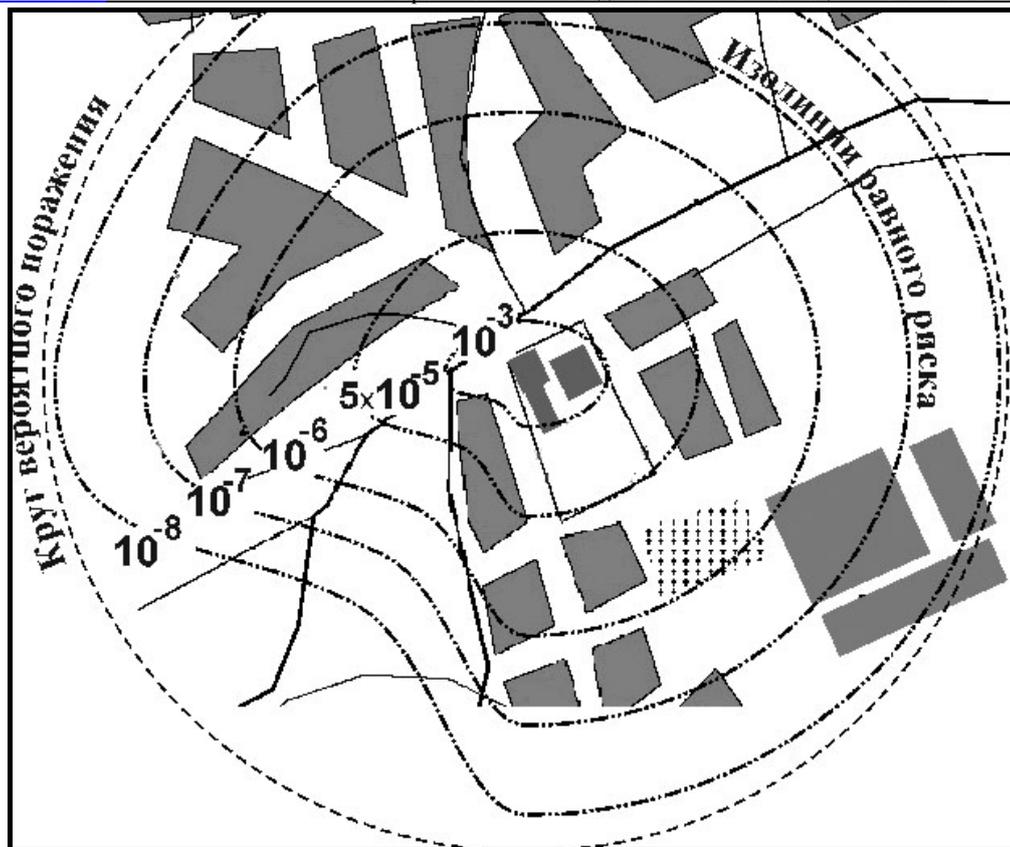


Рис.1.15. Картированный риск токсического поражения человека

Попытка обоснования критериев приемлемого риска для нашей страны сделана в работе [56]. В данной работе предложен следующий состав зон и соответствующие уровни приемлемого риска для населения:

- неприемлемый индивидуальный риск (зона недопустимого риска) $R \geq 10^{-4}$ в год;
- контролируемый индивидуальный риск (зона жесткого контроля риска) $10^{-4} > R > 10^{-5}$ в год;
- приемлемый индивидуальный риск (зона допустимого риска) $R \leq 10^{-5}$ в год.

Критерии отнесения объекта к потенциально опасным, в порядке эксперимента, установлены законодательно на местном уровне, например, постановлением губернатора Саратовской области «О сводном Реестре потенциально опасных объектов, расположенных на территории Саратовской области», №96 от 24.03.2000 г. [144]. В качестве таковых рассматриваются индивидуальный риск $\geq 10^{-5}$ в год и интегрированный риск ≥ 100 руб./год.

Однако знание индивидуального риска не позволяет судить о масштабе последствий аварий, что в первую очередь необходимо страховым компаниям и ЛПР (лицу, принимающему решения) по вопросам предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Анализ результатов расчета социального риска с точки зрения принятия решений. Основной характеристикой случайной величины потерь

при аварии на потенциально опасном объекте является социальный риск, показывающий масштаб катастрофичности реализации опасности. Социальный риск, как количественная мера опасности, может быть представлен либо *математическим ожиданием* людских потерь – *коллективным риском* $R(Y_c)$, либо *плотностью распределения* потерь, в интерпретации В. Маршалла [113] F/N – *диаграммой*, описывающей зависимость частоты реализации неблагоприятных событий F , в результате которых погибло не менее N человек, от этого количества человек. Подобные диаграммы в случае, если количество данных и диапазон их изменения велик, обычно строятся в логарифмическом масштабе. В ряде работ [178,151] социальный риск представлен *функцией распределения потерь* $\bar{F}(n)$. В терминах промышленной безопасности (РД 03-418-01) данная функция $\bar{F}(n)$ названа также *социальным риском*.

Рассмотрим методы количественной оценки социального риска.

На основе полученной зависимости (1.17) для потенциального риска $R(E)$ и характера распределения населения на прилегающей к объекту территории определяется *закон распределения случайной величины*, устанавливающий связь между возможными потерями N и соответствующими им вероятностями (частотами) реализации опасности.

С этой целью прилегающая к потенциально опасному объекту территория разбивается на элементарные площадки – зоны риска, рис.1.16.

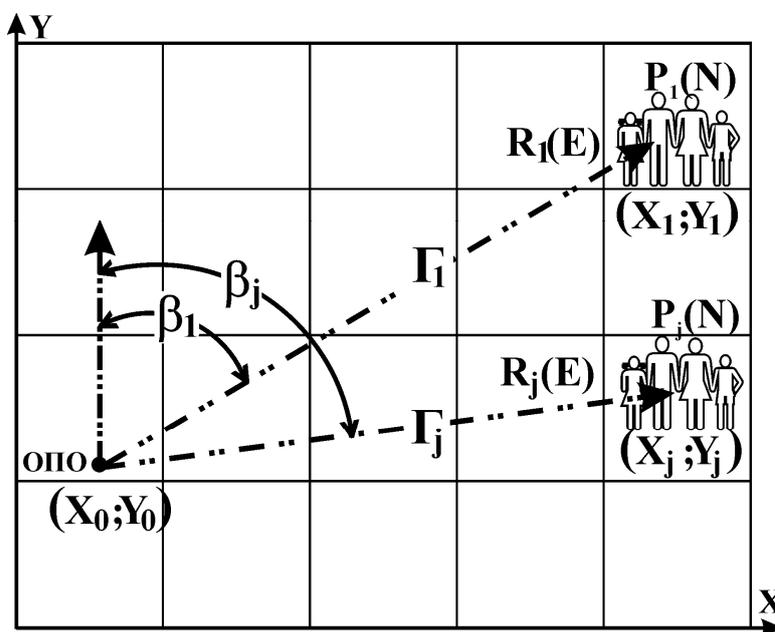


Рис.1.16. Зоны риска и последовательность оценки социального риска

В каждой элементарной площадке для группы людей с одинаковыми условиями поражения определяется численность проживающего населения или работающего производственного персонала (N) и строится матрица распределения людей по зонам риска $\|N_{ij}\|$.

Затем, для каждой группы людей в выделенных элементарных площадках определяется, в функции расстояния Γ от места аварии и направления β с учетом розы ветров, соответствующая им величина потенциального риска $R(E) = f(\Gamma, \beta)$ и строится матрица $\|R(E)_{ij}\|$.

На основе матриц $\|N_{ij}\|$ и $\|R(E)_{ij}\|$ устанавливается закон распределения случайной величины, который задается рядом распределения потерь. На рис.1.17 показан в качестве примера ряд распределения потерь для реального предприятия органического синтеза при аварии с разрушением емкости хранения окиси этилена.

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	1	2	4	6	6	6	7
1	0.998895448	$4.14 \cdot 10^{-7}$	$9.93 \cdot 10^{-7}$	$3.3 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$8.298 \cdot 10^{-6}$	$4.033 \cdot 10^{-6}$	$5.132 \cdot 10^{-6}$

Рис.1.17. Ряд распределения потерь для реального предприятия органического синтеза при аварии с разрушением емкости хранения окиси этилена

Зная ряд распределения потерь, легко построить функцию распределения потерь $\bar{F}(n)$.

При авариях число погибших N среди людей, находящихся на прилегающей к потенциально опасному объекту территории, является случайной величиной и характеризуется интегральной функцией распределения $F(n) = P(N < n)$, которая в теории вероятностей определена как функция, выражающая вероятность появления случайной величины *менее* заданного значения n . Следовательно, функция $F(n)$, для рассматриваемой случайной величины N , есть функция распределения «нулевого поражения» или **функция распределения выживаемости**.

Наряду с этим, для оценки последствий аварии в промышленной безопасности важно знать вероятность ожидаемых потерь *не менее* определенно-го числа людей, подвергшихся поражающему воздействию, то есть **функцию распределения потерь** $\bar{F}(n) = 1 - F(n)$. Эта функция дополняет функцию распределения $F(n)$ до единицы и интерпретируется как вероятность того, что число погибших N в случае реализации опасности будет не менее n , $\bar{F}(n) = P(N \geq n)$.

Случайные события, вошедшие в ряд распределения потерь, рис.1.17, образуют полную группу, объединяющую события «нулевого поражения» и события потерь. Сумма соответствующих им вероятностей равна единице $F(n) + \bar{F}(n) = 1$.

Программа построения функции $\bar{F}(n)$, реализована в среде Mathcad 2001. Фрагмент программы показан на рис.1.18.

```

 $\bar{F}(n) =$  |  $F(n) \leftarrow$  |  $z \leftarrow 0$ 
    |         |         |
    |         |         | for  $i \in 1..u$ 
    |         |         |   |  $s \leftarrow z + i$ 
    |         |         |   | 0 if  $-\infty < q \leq A_{0,0}$ 
    |         |         |   |  $\sum_{j=0}^s A_{1,j}$  if  $A_{0,i+0} \leq q < A_{0,i+1}$ 
    |         |         |   | 1 if  $A_{0,u+1} \leq q < \infty$ 
    |         |         |   | continue
    |         |         |  $1 - F(n)$ 
    
```

Рис.1.18. Фрагмент программы построения функции распределения потерь

Графики функции распределения потерь $\bar{F}(n) = 1 - F(n)$ и функции распределения выживаемости $F(n)$ для реального предприятия органического синтеза при аварии с разрушением емкости хранения окиси этилена в качестве примера показаны на рис.1.19.

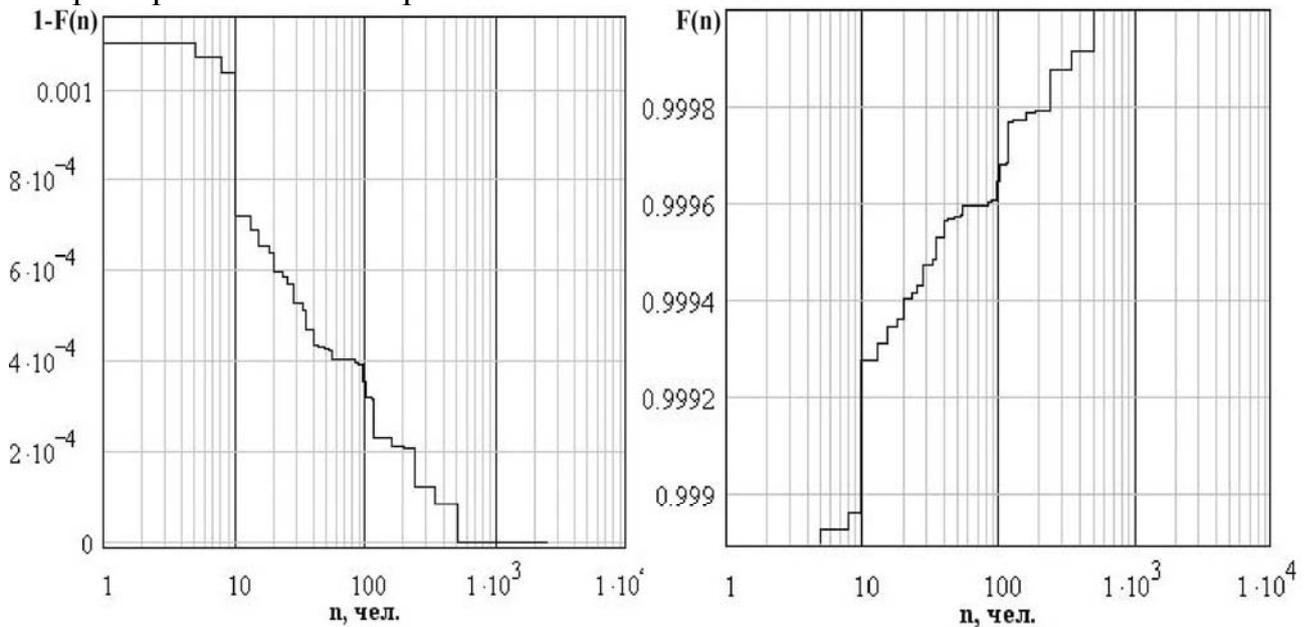


Рис.1.19. Графики функции распределения потерь и функции выживаемости для реального предприятия органического синтеза при аварии с разрушением емкости хранения окиси этилена

Однако график *функции распределения потерь* для лица, принимающего решения в области промышленной безопасности, не дает наглядной картины масштаба и тяжести социальных последствий аварии.

Большую информативность, на наш взгляд, имеет социальный риск $R(N)$, представленный графиком *закона распределения потерь*, устанавли-

вающего связь между возможными потерями N и соответствующими им вероятностями (частотами) реализации опасности $R(E)$ и построенные на этой же плоскости кривые приемлемого и неприемлемого риска летальных исходов, рис. 1.20.

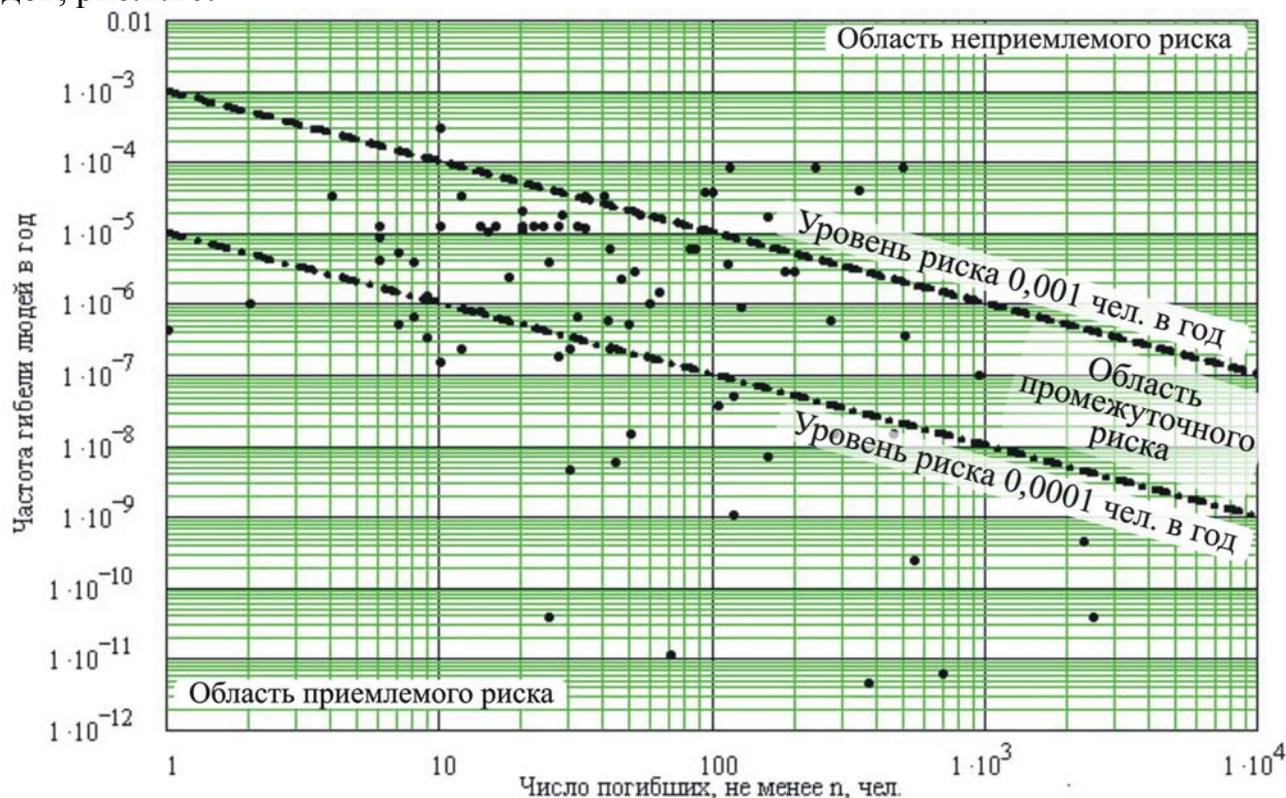


Рис.1.20. Социальный и предельные риски в логарифмических координатах для реального предприятия органического синтеза

Кривые предельного риска, построенные в логарифмическом масштабе, делят координатную плоскость на три области – приемлемого, промежуточного и неприемлемого риска.

Для построения кривых предельного риска необходимо иметь законодательно установленные критерии минимального R_{\min} и максимального R_{\max} социального риска. Однако до настоящего времени в мире отсутствуют общепризнанные критерии социального риска. Очевидно, уровень социального риска от основных опасностей определяется как объективными, так и субъективными факторами. Это обстоятельство затрудняет разработку и использование универсального критерия, применимого для всех видов опасностей. Тем не менее, попытки определения приемлемости социального риска имеют место.

Базовые характеристики критериев максимального и минимального приемлемого риска были обоснованы при реализации на российских пилотных предприятиях проекта Tacis FINRUS 9806 [72] «Поддержка усилий МЧС России по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и повышению готовности» (исполнитель проекта компания IMC Economic and En-

ergy Consulting Ltd, Великобритания). На основе выполненных исследований и передового опыта в странах Европейского сообщества в области промышленной безопасности рекомендованы к использованию следующие уровни критериев приемлемого социального риска:

- критерий максимального (неприемлемого) риска – 10 и более человек с частотой 10^{-4} в год;
- критерий минимального (приемлемого) риска – 10 и более человек с частотой 10^{-6} в год.

Комитет по здравоохранению и промышленной безопасности (HSE) Великобритании выдвигает более жесткие требования к критериям социального риска. Не имея численных критериев общенационального социального риска, тем не менее, комитет HSE рекомендует считать неприемлемым риск, когда 25 и более людей подвергаются опасности с частотой 10^{-5} в год.

В работе [56] предложен для Российской Федерации критерий неприемлемого (максимального) социального риска для различных социальных групп населения:

- неприемлемый риск – 25 и более взрослых людей подвергаются опасности с частотой более 10^{-4} в год;
- неприемлемый риск – 25 и более детей, престарелых, больных подвергаются опасности с частотой более 10^{-5} в год.

Министерство по делам ГО и ЧС Саратовской области и Саратовское региональное отделение Российской экологической академии в своей практической деятельности используют временный критерий отнесения объектов к потенциально опасным, установленный законодательно постановлением губернатора Саратовской области:

- максимальный риск – 10 и более человек с частотой 10^{-4} в год (интегрированный риск 100 руб./год при ЦСЖ 100 000 руб. на чел.).

Для построения кривых минимального и максимального риска на основе принятых к рассмотрению критериев необходимо иметь соответствующие математические зависимости, устанавливающие функциональную связь предельного риска R_{lim} , вероятности (частоты) реализации опасности R и нанесенного данной опасностью ущерба Y . Один из возможных подходов, используемый в управлении риском в развитых странах Европейского сообщества, заключается в представлении предельного риска через математическое ожидание ущерба

$$R_{lim} = R^n \cdot Y^m, \quad (1.18)$$

где n и m – показатели, отражающие восприятие обществом различных величин вероятностей и возможных ущербов.

В проекте Тасис «FINRUS 9806», например, используется подход, отражающий осторожное отношение общества к возможному ущербу. При таком подходе параметры уравнения (1.18) имеют значения $n = 1$, $m = 2$.

При нейтральном отношении общества к величинам вероятностей и

ущерба значения параметров n и m равны единице. Такой подход, на наш взгляд, более приемлем для оценивания последствий аварий на российских предприятиях.

Сравним указанные критерии и подходы к нормированию социального риска, проанализировав, в качестве примера, ожидаемые последствия аварии на реальном предприятии органического синтеза. С этой целью построим закон распределения потерь и графики кривых максимального риска для различных критериев и различного отношения общества к возможному ущербу, рис.1.21.

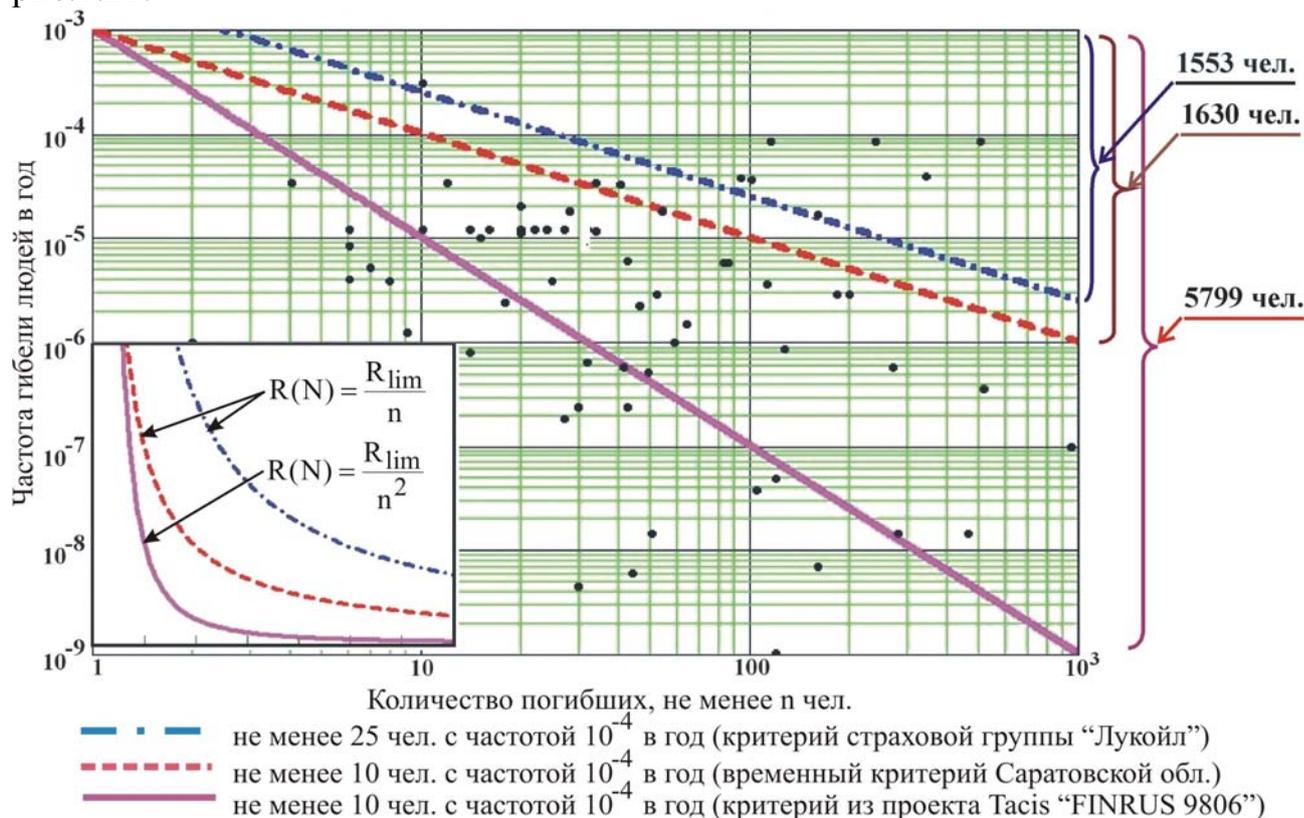


Рис.1.21. Сравнение кривых максимального риска

При использовании предельной кривой максимального риска, предложенной в проекте Tacis «FINRUS 9806» (ЕС), в области неприемлемого риска оказываются около 6000 человек. Такой подход при нынешнем уровне экономического развития ставит потенциально опасный объект в жесткие и нереальные условия обеспечения безопасности селитебной территории.

При технико-экономическом обосновании промышленной и экологической безопасности высокорисковых объектов и страховании ответственности потенциально опасных предприятий за нанесенный ущерб третьим лицам необходимо знать величину коллективного риска и характер его распределения на прилегающей территории. Коллективный риск, в отличие от социального риска, может быть выражен в стоимостном эквиваленте, что позволяет более эффективно использовать экономические методы управления риском.

Анализ коллективного риска для рассматриваемой территории $R(Y_C)$. Коллективный риск есть ожидаемое число летальных исходов в результате возможной аварии за определенный период времени. Рассмотрим последовательность построения поля коллективного риска на прилегающей к ОПО территории. На основе полученной выше информации о характере распределения $R(E)$ и N на прилегающей к объекту территории, в соответствии с выражением (1.3) определяется матрица распределения коллективного риска $\|R(Y_C)_{ij}\|$ и строится гистограмма (рис.1.22) с привязкой к местности.

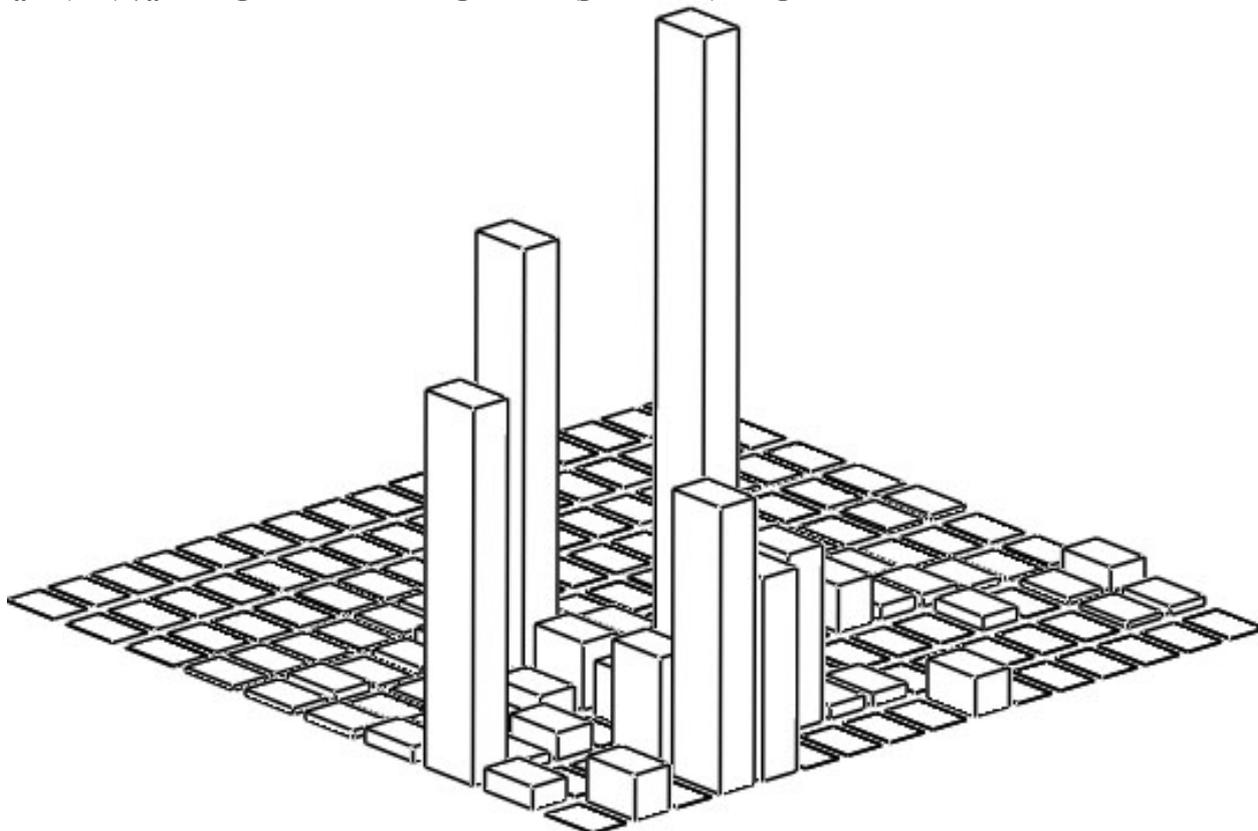


Рис.1.22. Гистограмма распределения коллективного риска

Как уже отмечалось, при анализе риска целесообразно не только знать уровни и характер его распределения на прилегающей территории, но и устанавливать зоны повышенного риска, где требуется ужесточение контроля или принятия определенных мер по обеспечению безопасности производственного персонала и населения. В этом случае переходят от матрицы коллективного риска $\|R(Y_C)_{ij}\|$ к матрице остаточного риска $\|R_0(Y_C)_{ij}\|$. Под остаточным риском мы понимаем разность коллективного риска и критерия предельного социального риска R_{lim}^B для рассматриваемой территории

$$\|R_0(Y_C)_{ij}\| \leftarrow \left(\|R(Y_C)_{ij}\| - R_{lim}^B \right) \cdot \Phi(\delta). \quad (1.19)$$

Сказанное иллюстрирует рис.1.23, на котором показаны матрицы коллективного и остаточного риска. Нули в матрице коллективного риска говорят об отсутствии населения в рассматриваемых зонах риска. Нули в матрице

остаточного риска свидетельствуют о том, что в данной зоне уровень риска равен критерию приемлемого риска или ниже его. С целью реализации сказанного в уравнение (1.19) введена функция Хевисайда (функция единичного скачка) $\Phi(\delta)$, возвращающая единицу при $\delta \geq 0$ и ноль при $\delta < 0$.

Матрица коллективного риска

	0	1	2	3	4	5	6
0	0	$1.636 \cdot 10^{-3}$	0.027	$1.093 \cdot 10^{-3}$	$5.492 \cdot 10^{-4}$	$4.49 \cdot 10^{-4}$	$3.317 \cdot 10^{-4}$
1	$3.312 \cdot 10^{-3}$	0	$7.658 \cdot 10^{-4}$	$8.401 \cdot 10^{-4}$	$2.319 \cdot 10^{-4}$	$6.825 \cdot 10^{-4}$	$2.975 \cdot 10^{-4}$
2	0	0	$1.972 \cdot 10^{-3}$	$9.015 \cdot 10^{-4}$	$3.732 \cdot 10^{-4}$	$2.058 \cdot 10^{-4}$	$2.28 \cdot 10^{-4}$
3	0.021	$8.211 \cdot 10^{-3}$	0	$1.958 \cdot 10^{-3}$	$1.408 \cdot 10^{-3}$	$5.599 \cdot 10^{-4}$	$2.19 \cdot 10^{-4}$
4	0.015	0.053	$3.953 \cdot 10^{-3}$	$4.905 \cdot 10^{-3}$	0.032	$1.155 \cdot 10^{-3}$	$4.266 \cdot 10^{-4}$
5	0	$4.907 \cdot 10^{-3}$	$3.584 \cdot 10^{-3}$	$4.564 \cdot 10^{-3}$	$2.519 \cdot 10^{-3}$	$1.159 \cdot 10^{-3}$	$5.042 \cdot 10^{-4}$
6	0	0.013	0	$1.665 \cdot 10^{-3}$	$1.206 \cdot 10^{-3}$	$5.588 \cdot 10^{-4}$	$3.588 \cdot 10^{-4}$
7	0	$9.574 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0	0
8	0	$9.148 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0	0
9	$2.847 \cdot 10^{-3}$	0	0	0	0	$1.683 \cdot 10^{-4}$	$6.216 \cdot 10^{-5}$
10	0	0	0	$3.415 \cdot 10^{-3}$	$9.189 \cdot 10^{-4}$	$3.275 \cdot 10^{-4}$	0
11	0	0	0	$1.003 \cdot 10^{-3}$	$9.341 \cdot 10^{-4}$	$2.538 \cdot 10^{-4}$	$1.578 \cdot 10^{-4}$
12	0	0	$9.612 \cdot 10^{-4}$	$8.787 \cdot 10^{-4}$	$3.637 \cdot 10^{-4}$	$1.404 \cdot 10^{-4}$	$9.632 \cdot 10^{-5}$



Матрица остаточного риска

	0	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0.025	0	0	0	0
1	$3.121 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0.018	$5.711 \cdot 10^{-3}$	0	0	0	0	0
4	0.012	0.05	$1.453 \cdot 10^{-3}$	$2.405 \cdot 10^{-3}$	0.029	0	0
5	0	$2.407 \cdot 10^{-3}$	$1.084 \cdot 10^{-3}$	$2.064 \cdot 10^{-3}$	$1.91 \cdot 10^{-5}$	0	0
6	0	0.01	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0
9	$3.471 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	$3.153 \cdot 10^{-4}$	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0

Рис.1.23. Матрицы коллективного и остаточного риска для рассматриваемой территории

Зная величину суммарного коллективного риска – ожидаемое число летальных исходов на прилегающей к потенциально опасному объекту территории и количество людей, находящихся в круге вероятного поражения, рассчитывается средний индивидуальный риск, который является важной характеристик потенциально опасного объекта. Данная величина позволяет сопоставить уровни опасности различных объектов, технологических установок, блоков для принятия соответствующих управленческих решений.

1.3. Математические модели и методы анализа экологических рисков аварий на магистральных трубопроводах

С точки зрения потенциальной опасности поражающего воздействия на человека и окружающую среду, нам представляется целесообразным подразделять магистральный трубопроводный транспорт по виду преобладающего ущерба на: взрывопожароопасные (магистральные газопроводы), токсиколоопасные (трансконтинентальный аммиакопровод), экологоопасные (магистральные нефтепроводы).

Рассмотрим более подробно методологию анализа и практику снижения экологических рисков аварий на магистральных нефтепроводах. В качестве основной опасности, фактора риска эксплуатации рассматривается возможность разгерметизации магистральных нефтепроводов с выбросом нефти и нанесением прямого ущерба трем основным компонентам окружающей среды: литосфере, гидросфере и атмосфере. Математическая модель экологического риска для рассматриваемых компонентов экосистемы представлена мультипликативно-аддитивной связностью и выражена системой уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} R(Y_{\mathcal{E}}) = \sum_i^n \sum_j^m \sum_k^z R_{ijk}(E_{\mathcal{E}}) \cdot Y_{\mathcal{E}j}^{уд} \cdot M_{ik}; \\ R_{ijk}(E_{\mathcal{E}}) = \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} f_i(M) \cdot P_{jk}(E_{\mathcal{E}}) dM; \\ Y_{\mathcal{E}j}^{уд} = b_j^{\lim} \cdot K_{ij} \cdot C_j, \end{array} \right. \quad (1.20)$$

где $R(Y_{\mathcal{E}})$ – экологический риск; $R_{ijk}(E_{\mathcal{E}})$ – потенциальный риск экологического ущерба для j -й компоненты экосистемы на i -м участке трассы при реализации k -го сценария аварии; $Y_{\mathcal{E}j}^{уд}$ – удельный экологический ущерб для j -й компоненты экосистемы; M – масса аварийного выброса нефти на i -м участке трассы нефтепровода при реализации k -го сценария аварии; $f_i(M)$ – плотность распределения частот аварийных выбросов нефти на i -м участке трассы; $P_{jk}(E_{\mathcal{E}})$ – параметрический закон поражения j -й компоненты экосистемы при условии реализации k -го сценария аварии; b_j^{\lim} – повышающий коэффициент за сверхлимитное загрязнение j -й компоненты экосистемы; K_{ij} – коэффициент инфляции при оценке ущерба для j -й компоненты экосистемы; C_j – комплекс, определяющий ставку платы за загрязнение j -й компоненты экосистемы; $[M_{\min}, M_{\max}]$ – определяемый профилем трассы диапазон возможных аварийных выбросов нефти на рассматриваемом i -м участке нефтепровода; n –

число шагов дискретизации трассы нефтепровода; m – число рассматриваемых компонент экосистемы; z – число сценариев развития аварии на рассматриваемом участке трассы.

Последовательность количественной оценки экологического риска, подробно раскрытая нами в работах [82, 13, 77, 251, 252], включает: расчет массы аварийного выброса нефти M_i на i -м участке магистрали с учетом профиля трассы и режима перекачки, определение удельного экологического ущерба $U_{эj}^{УД}$ для j -й компоненты экосистемы на рассматриваемой территории, обоснование параметрического закона поражения j -й компоненты экосистемы $P_j(E_э)$, построение регрессионной модели реализации всего спектра возможных аварий на i -м участке магистрали нефти $f_i(M)$.

При выполнении расчетов процесса аварийного опорожнения нефтепровода учитывается как напорный режим ($M_{нпр}$), когда нефть перекачивается насосными агрегатами нефтеперекачивающих станций до их отключения, так и самотечный режим ($M_{ср}$), когда движение потока вызывается разностью высот геодезических отметок вдоль трассы нефтепровода. При этом в самотечном режиме учитывается реальный профиль трассы и решается система нелинейных уравнений Бернулли для течений в левой и правой от аварийного отверстия ветвях трубопровода для переменного во времени, по мере истечения нефти, движущего напора, рис.1.24. Расчет массы аварийного выброса нефти реализован нами программно в среде Mathcad 2001 Professional.

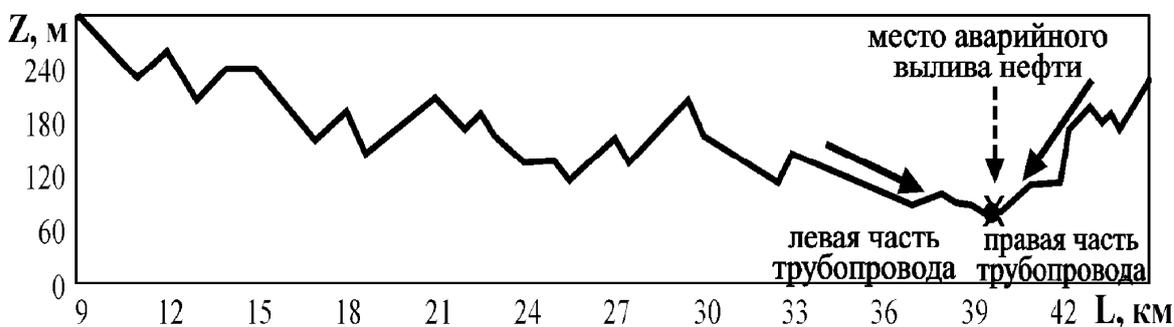


Рис.1.24. Реальный профиль трассы магистрального нефтепровода

В качестве основной характеристики экологической опасности магистрального нефтепровода в пораженном состоянии рассматривается масса нефти, участвующая в аварии. Поэтому показан характер распределения массы неконтролируемого выброса нефти по частотам реализации аварии [82], то есть плотность частот аварийных выбросов на i -м участке трассы $f_i(M)$. Функция $f_i(M)$ определяется методами регрессионного анализа. Процедура построения регрессионной модели состоит из следующих, в достаточной степени самостоятельных этапов.

На первом этапе разрабатывается всё множество возможных сценариев развития аварии и для каждого из них рассчитывается масса неконтролируемого выброса нефти. Её величина для данного профиля i -го участка трассы,

при прочих равных условиях, зависит от следующих случайных параметров: размера аварийного отверстия и полного времени истечения, определяемого временем остановки перекачки, временем закрытия задвижек, временем ликвидации утечки аварийно-восстановительными бригадами. В этой связи в качестве основных параметров сценария, в значительной степени определяющих массу вылившейся нефти на i -м участке трассы, рассматриваются диаметр аварийного отверстия $d_{усл}$ и время истечения t . По результатам расчета определяется множество неконтролируемых выбросов нефти для различных эквивалентных диаметров аварийного отверстия (d_i) и различных сценариев развития аварий (Sc_j) и формируется матрица масс $\|M_{ij}\|$, вид которой показан на рис.1.25.

	Sc_1	Sc_2	Sc_3	Sc_4	Sc_5	Sc_j	Sc_m
d_1	M_{11}	M_{12}	M_{13}	M_{14}	M_{15}	M_{1j}	M_{1m}
d_2	M_{21}	M_{22}	M_{23}	M_{24}	M_{25}	M_{2j}	M_{2m}
d_i	M_{i1}	M_{i2}	M_{i3}	M_{i4}	M_{i5}	M_{ij}	M_{im}
d_n	M_{n1}	M_{n2}	M_{n3}	M_{n4}	M_{n5}	M_{nj}	M_{nm}

Рис.1.25. Матрица масс аварийных выбросов нефти

На втором этапе построения регрессионной модели пораженного состояния объекта определяется множество вероятностей реализации принятых к рассмотрению сценариев развития экологических аварий. Используя данные о характере протекания аварий, с учетом экспертных оценок, моделируются плотности распределения вероятностей размера аварийного отверстия и времени остановки истечения нефти соответственно распределением Вейбулла $P(d_{усл})$ и показательным распределением $P(t)$. На их основе формируется матрица вероятностей появления соответствующих аварийных ситуаций $\|P_{ij}\|$. Значения вероятностей для каждой ячейки сформированной матрицы масс (рис.1.25) получают дискретизацией функций $P(d_{усл})$ и $P(t)$.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i(d_{усл}) = \int_{D_i}^{D_{i+1}} f(d_{усл})d(d), \quad i = \overline{1, n}; \\ P_j(t) = \int_{T_j}^{T_{j+1}} g(t)dt, \quad j = \overline{1, m}; \\ n = \frac{D_{max}}{\delta d}, \quad m = \frac{T_{max}}{\delta t}, \end{array} \right. \quad (1.21)$$

где $f(d_{усл})$, $g(t)$ и $P(d_{усл})$, $P(t)$ – плотности распределения и вероятности, соот-

ветственно, условного диаметра аварийного отверстия и времени остановки насосов; D_{\max} , T_{\max} - предельные, в рассматриваемых сценариях развития аварии, значения случайных величин $d_{\text{усл}}$ и t ; δd и δt – шаги дискретизации функций.

Фиксированные значения вероятностей для каждой ij -й ячейки определяем следующим образом:

$$P_{ij} = P_i(d_{\text{усл}}) \cdot P_j(t) = \left[\int_{D_i}^{D_{i+1}} f(d_{\text{усл}}) d(d_{\text{усл}}) \right] \cdot \left[\int_{T_j}^{T_{j+1}} g(t) dt \right]. \quad (1.22)$$

На основе анализа ретроспективной информации по статистике аварий и причинам их возникновения на линейной части магистралей транспорта нефти, с привлечением методов экспертных оценок локальных условий эксплуатации нефтепровода на рассматриваемом i -м участке трассы, определяется локальная результирующая частота экологической аварии $\lambda_{\text{л}}$. На основе полученных данных формируется матрица частот реализации сценариев аварий $\|\lambda_{ij}\| = \lambda_{\text{л}} \times \|P_{ij}\|$. Полученный массив данных по аварийным выбросам $\|M_{ij}\|$ и частотам их появления $\|\lambda_{ij}\|$ обрабатывается методами регрессионного анализа в системе *STATGRAPHICS Plus v-3.0*. На его основе определяется регрессионная зависимость плотности распределения частот экологических аварий от массы аварийных выбросов нефти на рассматриваемом участке трассы, характер которой представлен на рис.1.26.



Рис.1.26. Регрессионная зависимость аварийных сбросов нефти в водоток при разгерметизации реального нефтепровода на подводном переходе реки

Вид регрессионной модели и значения ее параметров в значительной степени определяются исходной базой данных и зависят от конструктивно - технологических характеристик и технического состояния рассматриваемого участка трассы, структуры причин аварий, уровня наблюдаемости системы и степени автоматизации нефтепровода, внешних локальных условий эксплуатации, топографиче-

ских особенностей местности и других факторов. По результатам регрессионного анализа видно, что плотность частот аварийных выбросов нефти для рассматриваемого локального участка трассы имеет степенное распределение $f(M) = \beta \cdot M^{-\alpha}$. Функция $f_i(M)$ – важная характеристика объекта, позволяющая оценить рассматриваемый участок трассы как источник экологической опасности.

Одним из главных вопросов при выборе способов и средств защиты окружающей среды являются ожидаемые последствия реализации опасности, связанные с воздействием поражающих факторов на ее системы. С этой целью нами обосновывается параметрический закон поражения экосистем на прилегающей к нефтепроводу территории. Принятая функция распределения вероятности поражения экосистем в зависимости от массы аварийного выброса нефти приведена на рис.1.27.

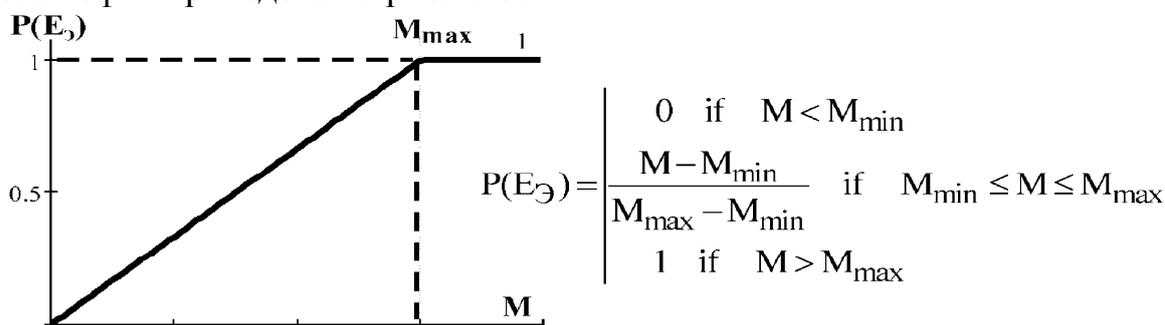


Рис.1.27. График и функция равномерного распределения вероятности поражения экосистем в зависимости от массы аварийного выброса нефти

Вышеизложенный подход позволяет учесть весь спектр возможных аварийных утечек нефти и частот их реализации для каждого i -го участка трассы магистрального нефтепровода и на этой основе выработать комплекс инженерных решений, позволяющий снизить экологический риск нанесения ущерба экосистемам природной среды. Методы технико-экономической оценки промышленной и экологической безопасности и практика снижения техногенных рисков подробно рассмотрены нами в монографии [82]. Характер изменения экологического риска в зависимости от массы аварийного выброса нефти для различных участков реальной трассы магистрального нефтепровода имеет вид, показанный на рис.1.28.

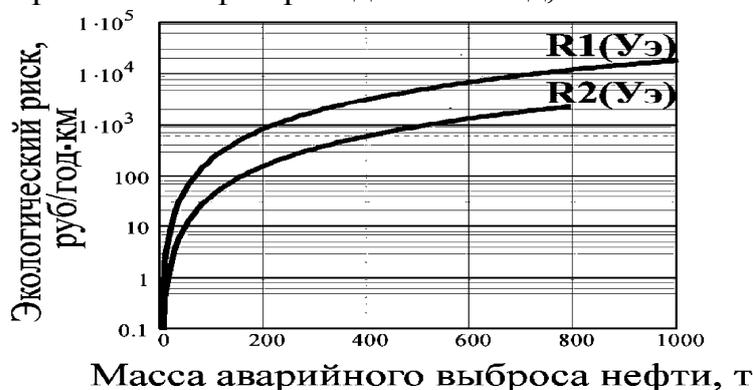


Рис.1.28. Экологический риск для участков реальной трассы магистрального нефтепровода

Продольный профиль трассы разбивается на участки с шагом дискретизации 1 км. Для каждого из них рассчитывается массив данных по аварийным выбросам нефти. Используя полученный массив данных об аварийных разливах нефти для каждого километра трассы рассчитан экологический риск нанесения ущерба экосистемам на прилегающих к каждому i -му участку трассы территориях. На основании проведенных расчетов построена гистограмма распределения экологического риска вдоль реальной трассы магистрального нефтепровода РНУ с шагом дискретизации 1 км, представленная на рис.1.29.

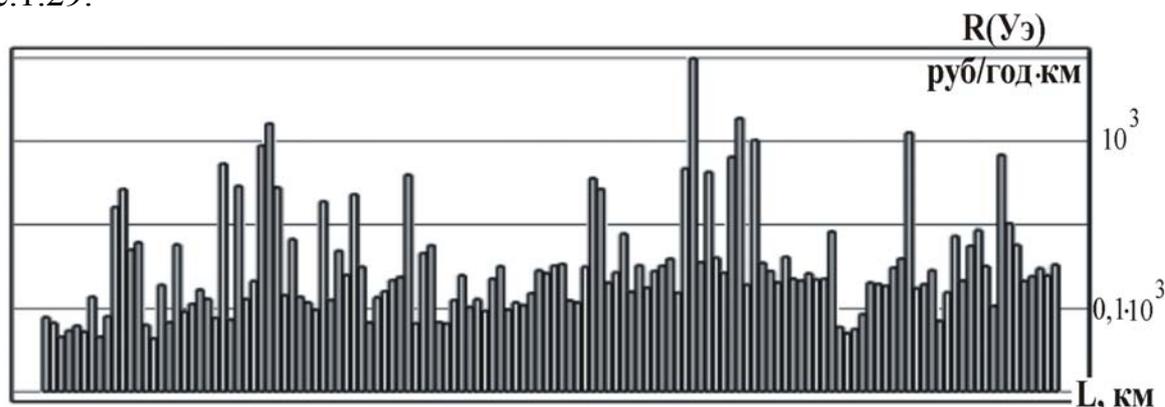


Рис.1.29. Распределение экологического риска вдоль реальной трассы магистрального нефтепровода

Гистограмма распределения экологического риска вдоль линейной части нефтепровода позволяет ранжировать участки трассы по уровню опасности загрязнения экосистем окружающей среды. Эти участки приняты в качестве приоритетных в проведении первоочередных мероприятий в РНУ по защите окружающей среды и выработке инженерных решений, направленных на снижение риска.

Одним из таких участков трассы является переход магистрального нефтепровода через крупную реку. Выполненный сравнительный анализ [13, 77, 82, 252] технологической конструкции наземной части подводного перехода через реку и продольного профиля трассы линейной части подводного участка трубопровода с позиций определения сценариев возможных аварий и оценки количества нефти, способной участвовать в аварии, позволил констатировать, что наиболее уязвимым местом, с точки зрения экологической безопасности, являются камеры приема и запуска очистных и диагностических снарядов (КЗПС) на левом берегу. Эти камеры, независимо от режима работы нефтепровода, находятся под давлением, имеющим постоянную составляющую статического давления правого, более высокого, берега. Риск нанесения экологического ущерба в результате разгерметизации КЗПС левого берега со сбросом нефти в водоток реки, как показали расчеты, составляет значительную величину $2,86 \cdot 10^4$ руб/год·км, что в 3 – 3,5 раза выше уровня экологического риска линейной части подводного участка трубопровода. Это обосновывается более высокой частотой прогнозируемых аварий технологи-

ческого оборудования КЗПС, включающего большое количество запорной арматуры и камеры приема и запуска очистных и диагностических устройств. Для снижения величины экологического риска была предложена и реализована на практике установка на трубопроводе правого берега обратного клапана, отсекающего в случае аварии подводный переход от нефтепровода с высотными отметками $H > 83,0$ м. Кроме того, произведена обваловка территории КЗПС левого берега, исключив тем самым попадание нефти в реку. Предложенные инженерные решения позволили снизить экологический риск загрязнения реки в случае аварии на технологическом оборудовании подводного перехода до величины $3,36 \cdot 10^3$ руб/год·км.

Выводы к главе 1

1. Рассмотрены теоретические основы количественной оценки риска техногенных аварий на потенциально опасных объектах техносферы. Получен комплекс математических моделей и разработаны аналитические методы квантификации и анализа риска промышленных предприятий различного назначения, как части управления промышленной безопасностью. Предложен достаточно универсальный инструмент количественной оценки индивидуального и социального риска и картирования на топографической карте прилегающих селитебных территорий потенциального и коллективного риска гибели людей при авариях на химически опасных объектах. Описанные методы количественного анализа риска позволяют получить объективную информацию о степени опасности объекта, ранжировать прилегающую территорию по уровню коллективного и потенциального риска, выявить зоны и территории, где уровни риска достигают или превышают значения, при которых необходимо ужесточение контроля или принятия определенных мер по обеспечению безопасности производственного персонала и населения.

2. Разработана методология анализа и практика снижения экологических рисков аварий на магистральных нефтепроводах и на этой основе разработана методика определения экологических рисков магистрального транспорта нефти, в которой предложен достаточно универсальный и приемлемый инструмент оценки последствий аварий на магистральных нефтепроводах - экологический риск. Впервые предложена и реализована математическая модель расчета риска развития аварии на прилегающей к объекту территории с возможным загрязнением экосистем с учетом параметрического закона их поражения. На основании разработанной методики проведен анализ безопасности и расчет экологического риска функционирования линейной части магистрального нефтепровода в реальных конкретных условиях функционирования с учетом программы диагностирования, профилактических мероприятий, рельефа местности и т.п. Результаты анализа позволили обосновать и внедрить инженерные мероприятия по охране окружающей среды на наиболее опасных участках, в том числе водном переходе через крупную реку, заключающиеся в установке дополнительных запирающих устройств, дополнительных амбарах для сборки нефти, обваловке территории, камерах сбора нефти при запуске диагностических снарядов и др.