

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)**

Институт машиностроения и автомобильного транспорта  
Кафедра «Автотранспортная и техносферная безопасность»

Методические указания к практическим занятиям  
**по дисциплине**  
«Надежность технических систем и техногенный риск»

часть 4

Составитель:  
Киндеев Е.А.

Владимир, 2016

# АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## Критерии приемлемого риска

До недавнего времени нормативы безопасности во всем мире основывались на концепции абсолютной безопасности. Для предотвращения аварий внедрялись инженерные системы безопасности, принимались организационные меры, обеспечивающие высокий уровень дисциплины, строгий регламент работы. Считалось, что такой подход позволяет исключить любую опасность для населения и окружающей среды.

Однако сегодня из-за беспрецедентного усложнения производств и появления принципиально новых технологий, возросшей сети транспортных и энергетических коммуникаций концепция абсолютной безопасности стала неадекватна внутренним законам техносферы и биосферы.

Ресурсы любого общества ограничены. А расходы на повышение безопасности растут экспоненциально, то есть каждый следующий шаг по направлению повышения безопасности обходится обществу всё дороже и дороже. Поэтому пришли к пониманию невозможности создания абсолютной безопасности (нулевого риска). Стремиться следует к достижению такого уровня риска от воздействия опасных факторов, который можно рассматривать как «приемлемый». Его приемлемость должна быть обоснована исходя из экономических и социальных соображений. Необходимость формирования концепции приемлемого (допустимого) риска обусловлена невозможностью создания абсолютно безопасной деятельности (технологического процесса).

*Приемлемый риск* – риск гибели человека, который общество на данном этапе развития готово принять.

Во всех развитых в промышленном отношении странах существует устойчивая тенденция применения концепции приемлемого риска.

Среди подходов, предложенных для обоснования критериальных значений риска, следует отметить метод экономического анализа безопасности, основанный на учете затрат на обеспечение безопасности и потерь от возможных аварий. Концепция нормирования безопасности предлагает задание риска следующим образом:

- абсолютную безопасность невозможно обеспечить, объект может быть только относительно безопасен;

- требования к уровню безопасности формируются на основе «приемлемого риска», связаны с социально-экономическим состоянием общества и являются производными этого состояния;

- риск определяется путем выявления различных факторов, влияющих на безопасность, и их количественной оценки.

Существуют и другие аспекты нормирования безопасности:

- риск не должен превышать уровня, достигнутого для сложных технических объектов с учетом природных воздействий;

- риск должен быть снижен настолько, насколько это практически достижимо в рамках соответствующих ограничений;

- не должно быть составляющих риска, резко превышающих другие составляющие (аналог принципа равнонадежности, применяемого при обеспечении надежности изделий).

Поэтому при оценке приемлемости различных уровней риска можно ограничиться рассмотрением риска лишь тех вредных последствий, которые в конечном счете приводят к смертельным исходам, поскольку для этого показателя существуют достаточно надежные статистические данные. Тогда, например, понятие «экологический риск» может быть сформулировано как отношение величины возможного ущерба, выраженного в количестве смертельных исходов от воздействия вредного экологического фактора, за определенный интервал времени к нормированной величине интенсивности этого фактора.

Таким образом, главное внимание при определении технического, экологического и социального риска должно быть направлено на анализ соотношения возможного экономического ущерба, вредных социальных и экологических последствий, заканчивающихся смертельными исходами.

Общественная приемлемость риска связана с различными видами деятельности и определяется экономическими, социальными и психологическими факторами.

В общем случае под приемлемым риском понимается риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из экономических и социальных соображений.

Пример определения приемлемого риска представлен на рис. 8.1.

При увеличении затрат на совершенствование оборудования технический риск снижается, но растет социальный. Суммарный риск имеет минимум при определенном соотношении между инвестициями в техническую и социальную сферу. Это обстоятельство надо учитывать

при выборе приемлемого риска. При определении социально приемлемого риска обычно используют данные о естественной смертности людей.

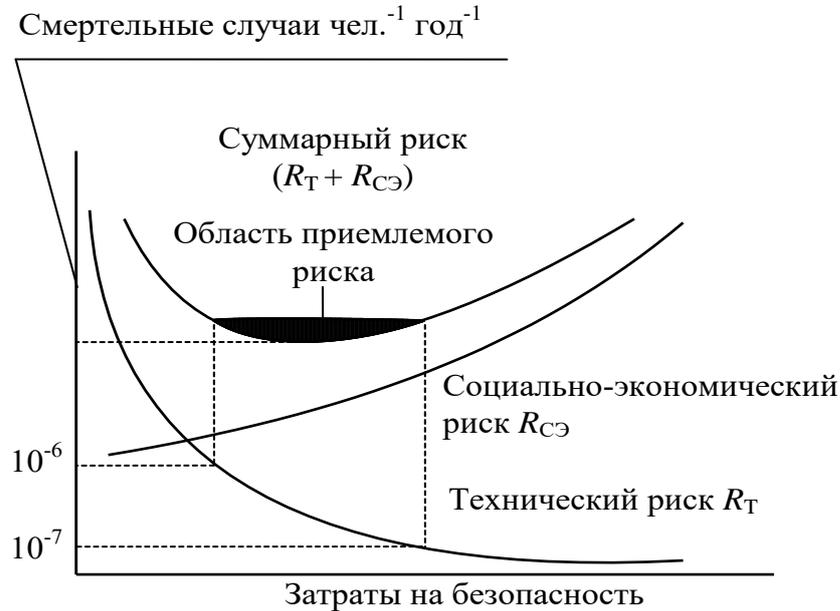


Рис. 1. Определение приемлемого риска

В качестве реперного значения *абсолютного риска* принимают величину летальных исходов (ЛИ):

$$R_A = 10^{-4} \text{ ЛИ/}(чел. \cdot \text{год}).$$

В качестве реперного значения допустимого (приемлемого) риска при наличии отдельно взятого источника опасности принимают:

$$R_D = 10^{-5} \text{ ЛИ/}(чел. \cdot \text{год}); \quad R_D = 10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ НС/}(чел. \cdot \text{год}),$$

где НС – случаи нетрудоспособности.

Для населения величина дополнительного риска, вызванного техногенными причинами, не должна превышать реперное значение абсолютного риска

$$R \leq R_A.$$

Для отдельно взятого источника опасности, учитывая, что индивидуальный риск зависит от расстояния  $R = R(r)$ , условие безопасности можно записать в виде

$$R(r) \leq R_D.$$

В настоящее время по международной договоренности принято считать, что действие техногенных опасностей (технический риск) должно находиться в пределах от  $10^{-7}$  –  $10^{-6}$  (смертельных случаев чел<sup>-1</sup>

<sup>1</sup> · год<sup>-1</sup>), а величина  $10^{-6}$  является максимально приемлемым уровнем индивидуального риска. В национальных правилах эта величина используется для оценки пожарной и радиационной безопасности.

Приемлемый риск сочетает в себе технические, экологические, социальные аспекты и представляет некоторый компромисс между приемлемым уровнем безопасности и экономическими возможностями его достижения, т. е. можно говорить о снижении индивидуального, технического или экологического риска, но нельзя забывать о том, сколько за это придется заплатить и каким в результате окажется социальный риск.

В связи со сложностью расчетов показателей риска, недостатком исходных данных (особенно по надежности оборудования, человеческим ошибкам) на практике часто используются методы анализа и критерии приемлемого риска, основанные на результатах экспертных оценок специалистов. В этом случае рассматриваемый объект обычно ранжируется по степени риска на четыре (или больше) группы с высоким, промежуточным, низким или незначительным уровнем риска. При таком подходе высокий уровень риска считается, как правило, неприемлемым, промежуточный – требует выполнения программы работ по уменьшению уровня риска, низкий – считается приемлемым, а незначительный – вообще не рассматривается, как не заслуживающий внимания.

Таким образом, основные требования к выбору критерия приемлемого риска при проведении анализа риска – обоснованность и определенность.

## **2. Управление риском**

В соответствии с концепцией безопасности населения и окружающей среды практическая деятельность в области управления риском должна быть построена так, чтобы общество в целом получало наибольшую доступную сумму благ.

*Управление риском* – это анализ рискованной ситуации, разработка и обоснование управленческого решения, нередко в форме правового акта, направленного на минимизацию риска.

В принципах управления риском заложены стратегические и тактические цели. В стратегических целях выражено стремление к достижению максимально возможного уровня благосостояния общества в целом, а в тактических – стремление к увеличению безопасности населения и продолжительности жизни. В них оговариваются как

интересы групп населения, так и каждого человека при защите от чрезмерного риска.

Важнейшим принципом является положение о том, что в управление риском должен быть включен весь спектр существующих в обществе опасностей, и общий риск от них для любого человека и для общества в целом не может превышать «приемлемый» уровень.

Схема процесса управления риском представлена на рис. 2.

Для проведения анализа риска, установления его допустимых пределов в связи с требованиями безопасности и принятия управляющих решений необходимы:

- наличие информационной системы, позволяющей оперативно контролировать существующие источники опасности и состояние объектов возможного поражения;

- сведения о предполагаемых направлениях хозяйственной деятельности, проектах и технических решениях, которые могут влиять на уровень техногенной и экологической безопасности, а также программы для вероятностной оценки связанного с ними риска;

- экспертиза безопасности и сопоставление альтернативных проектов и технологий, являющихся источниками риска;

- разработка технико-экономической стратегии увеличения безопасности и определение оптимальной структуры затрат для управления величиной риска и ее снижения до приемлемого уровня с экономической и экологической точек зрения;

- формирование организационных структур, экспертных систем и нормативных документов, предназначенных для выполнения указанных функций и процедуры принятия решений;

- воздействие на общественное мнение и пропаганда научных данных об уровнях техногенного и экологического рисков с целью ориентации на объективные оценки риска.

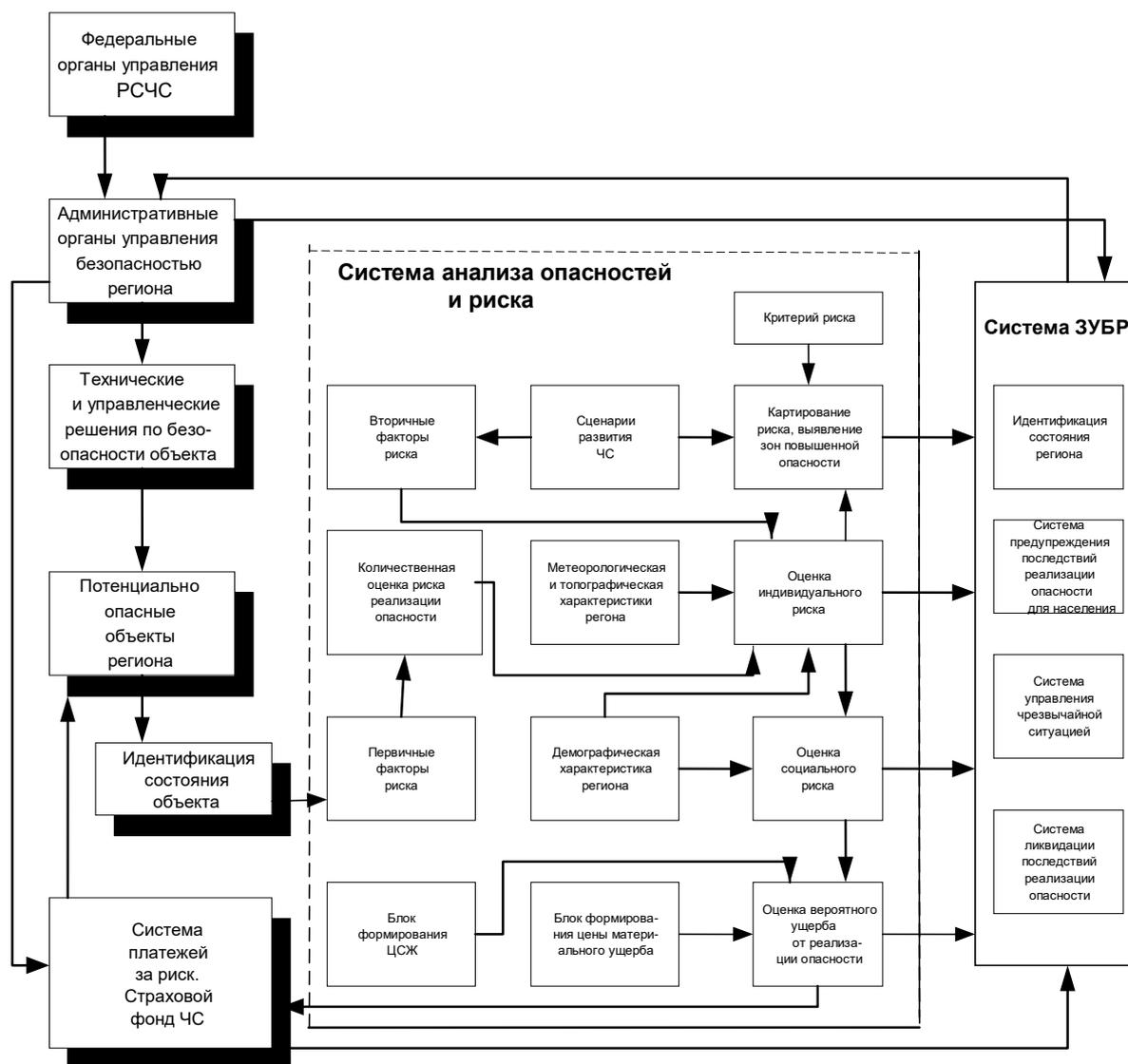


Рис. 2. Схема управления риском

Модель управления риском состоит из четырех частей и этапов.

*Первый этап* связан с характеристикой риска. На начальном этапе проводится сравнительная характеристика рисков с целью установления приоритетов. На завершающей фазе оценки риска устанавливается степень опасности (вредности).

*Второй этап* – определение приемлемости риска. Риск сопоставляется с рядом социально-экономических факторов:

- выгоды от того или иного вида хозяйственной деятельности;
- потери, обусловленные данным видам деятельности;
- наличие и возможности регулирующих мер с целью уменьшения негативного влияния на среду и здоровье человека.

Процесс сравнения опирается на метод «затраты – выгоды».

В сопоставлении «нерисковых» факторов с «рисковыми» проявляется суть процесса управления риском.

Возможны три варианта принимаемых решений:

- риск приемлем полностью;
- риск приемлем частично;
- риск неприемлем полностью.

В настоящее время уровень пренебрежимого предела риска обычно устанавливают как 1 % от максимально допустимого.

В двух последних случаях необходимо установить пропорции контроля, что входит в задачу третьего этапа процедуры управления риском.

*Третий этап* заключается в выборе одной из «типовых» мер, способствующей уменьшению (в первом и во втором случае) или устранению (в третьем случае) риска.

*Четвертый этап* – принятие регулирующего решения – определение нормативных актов (законов, постановлений, инструкций) и их положений, соответствующих реализации той «типовой» меры, которая была установлена на предшествующей стадии. Данный элемент, завершая процесс управления риском, одновременно увязывает все его стадии, а также стадии оценки риска в единый процесс принятия решений, единую концепцию риска.

### **3. Применение теории риска в технических системах**

Проектирование сложных технических систем и конструкций выполняется на основе численных методов с использованием компьютеров. Однако вычисленные на основе таких расчетов параметры и характеристики следует рассматривать как приближенные, которые отличаются от действительных. Отклонения расчетных параметров от действительных представляют собой случайные величины, которые зависят от условий задачи.

Путем применения теории риска можно оценить неточности, возникающие при расчете и проектировании конструкций. Вероятностный метод вычисления риска позволяет получить новую информацию о том, какое влияние на величину риска оказывают разные источники неопределенности в процессе расчета и проектирования конструкции и как это отражается на окончательном проекте.

Однако при использовании численных методов возникают неточности расчета, оценка которых приобретает особое значение при определении вероятного риска.

В инженерных задачах исходные данные часто бывают далеко не полными. Так, например, величина внешних сил изменяется во времени; свойства материала, из которого сделана конструкция, также определяются как средние и имеют разброс. Возникают термины «допустимый предел», «инженерное решение», которые подтверждают отсутствие достаточной точности в исходных данных. В результате для описания вероятности разрушения конструкции возникает понятие «риск», которым характеризуют полученное решение.

В состав крупных сооружений входят объекты, имеющие различную степень ответственности в обеспечении безопасности, например, в гидротехническом узле наиболее ответственным объектом является плотина, менее ответственными – здания, трубопроводы и т. д. Однако желательно принимать для всех объектов одинаковую меру риска. Принцип сбалансированного риска требует, чтобы все объекты, входящие в состав сооружения, проектировались на обеспечение одинаковой степени риска.

При решении многих инженерных задач приходится определять риск, который возникает как результат снижения затрат при производстве и эксплуатации технической системы. Риск определяется на основе обработки статистическими методами большого числа наблюдений. Величина риска зависит от ожидаемой выгоды. Как правило, повышение величины риска приводит к снижению расходов на создание технической системы и увеличению ожидаемой выгоды. Но вместе с тем это повышение может повлечь за собой разрушение технической системы в более короткий срок или с большей долей вероятности. Поэтому определение принимаемой величины риска – весьма ответственная задача, которая может быть правильно решена только путем проведения глубокого статистического анализа.

Функциональная зависимость между величиной риска и ожидаемой выгодой выражается нелинейным законом, как это показано на рис. 3.

Построенная на этом рисунке кривая делит координатную плоскость на две части. Справа от кривой расположены значения, которые могут быть при известных условиях приняты (эта область заштрихована). Точки, расположенные слева от кривой, относятся к неприемлемым значениям.

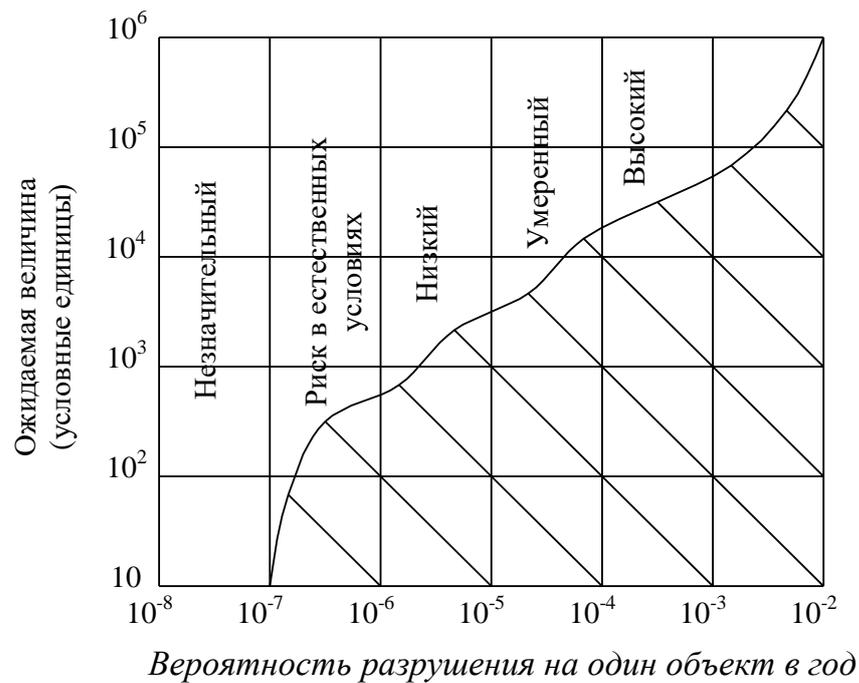


Рис. 3. Зависимость величины риска от затрат

Рассмотрим подробнее физический смысл числового выражения риска. Наиболее полные статистические данные имеются для риска, которым характеризуются несчастные случаи в разных областях производства. Так, например, риск, характеризуемый числом  $10^{-3}$  случаев на одного человека в год, является совершенно неприемлемым. Уровень риска  $10^{-4}$  требует принятия мер и может быть принят только в том случае, если другого выхода нет. Так, риск в автомобильных авариях в Российской Федерации достигает уровня  $2 \cdot 10^{-4}$ . Уровень риска  $10^{-5}$  соответствует естественным случайным событиям, например, несчастным случаям при купании в море, для которых риск исчисляется  $3,7 \cdot 10^{-5}$ . Несчастные случаи, обусловленные риском  $10^{-6}$ , относятся к такому уровню, на который имеется более спокойная реакция, так как считается, что избежать этого риска может каждый, соблюдая элементарные правила предосторожности.

Аналогичным образом величина риска может быть установлена и для каждой технической системы с учетом срока службы, ее значения для общей прочности всего сооружения, а также стоимости, срока восстановления и т. д.

Очень часто для оценки риска принимается частота возникновения аварийных ситуаций, например, число случаев разрушения плотин в год и их негативные последствия — число несчастных случаев, которые вызваны этой аварией.

При проектировании принимаются решения, которые могут увеличить или уменьшить величину риска в процессе эксплуатации конструкции. Для того чтобы оценить влияние неточностей, допущенных при проектировании, следует для данной конструкции оценить вероятные пути, в результате которых может произойти разрушение. Для простейшей конструкции очень часто можно предвидеть единственный путь вероятного разрушения и тогда задача упрощается. Однако для сложных конструкций и сооружений разрушение может развиваться разными путями, имеющими различную вероятность.

Коэффициент надежности вычисляется для каждой намеченной схемы разрушения по формуле

$$F_{rf} = \prod_{i=1}^n (R_i), \quad (1)$$

где  $R_i$  – множитель, характеризующий коэффициент надежности для каждой схемы.

Зависимость между вероятностью  $P$  разрушения, выраженной в процентах, и коэффициентом надежности  $F$  получается в виде  $P = 10\% - F = 3,5$ ;  $P = 1\% - F = 10$ ;  $P = 0,1\% - F = 20$ .

Вероятность того, что разрушение произойдет по выбранной последовательности событий  $D$ , вычисляется по формуле

$$P_D = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)^{m_j}, \quad (2)$$

где  $m_j$  – число участков для выбранной схемы разрушения.

Решая технические задачи, необходимо учитывать риск, возникающий в результате неопределенностей при выборе исходных данных для расчетов. При определении допустимого риска необходимо учитывать вероятность благоприятного и неблагоприятного результатов при эксплуатации проектируемой технической системы. Величина риска находится на основе общих математических методов: теории вероятностей, математической статистики и теории игр. Для измерения величины риска, соответствующего данному варианту решения, проектировщик должен исследовать влияние всех влияющих факторов. Особое значение приобретает определение риска при проектировании новых сооружений и сложных технических систем. Правильное использование теории риска очень часто приводит к тому, что проектируемая техническая система может обойтись дешевле.

Очень часто понятие риска связывают с оценкой возможного ущерба. Для правильного понимания существа вопроса целесообразно

определять риск как возможность отклонения принятого решения от той величины, которая соответствует оптимальным условиям эксплуатации объекта.

Затраты на производство технических систем связаны с принятой при проектировании величиной риска. При большом риске снижается стоимость первоначальных затрат, однако в дальнейшем при неблагоприятном стечении обстоятельств в технической системе могут возникнуть повреждения, ликвидация которых связана с дополнительными расходами. Малая величина риска, принятая при проектировании, потребует увеличения прочности и надежности элементов технической системы, а это повышает стоимость ее производства. Если в процессе дальнейшей эксплуатации не произойдет неблагоприятного стечения обстоятельств, то первоначальное удорожание производства технической системы для увеличения прочности и надежности ее элементов оказывается не нужным. Таким образом, увеличение риска приводит к удешевлению производства, а снижение риска вызывает его удорожание.

#### **4. Оценка риска аварий**

Порядок разработки декларации безопасности опасных производственных объектов учитывает анализ условий возникновения и развития аварий, который включает:

- выявление возможных причин возникновения и развития аварийных ситуаций с учетом отказов и неполадок оборудования, возможных ошибочных действий персонала, внешних воздействий природного и технического характера;
- определение сценариев возможных аварий;
- оценку количества опасных веществ, способных участвовать в аварии;
- обоснование применяемых для оценки опасностей моделей и методов расчета.

Приведенные данные причин пожаров (табл. 1) способствуют проведению идентификации опасных и вредных факторов на объектах хранения нефтепродуктов. Можно выделить следующие опасности: взрыв (В), пожар (П), отравление (О) персонала токсическими веществами, загрязнение (З) окружающей природной среды (ОПС). Все эти нежелательные события могут наступать в случае нарушения технологического регламента работ на объектах или отступления от инструкций. Можно обоснованно полагать, что в значительной мере

указанные опасности будут проявляться совместно, т. е. взрыв будет сопровождаться пожаром, отравлением персонала и загрязнением ОПС.

Таблица 1

Причины пожаров на объектах хранения нефтепродуктов

Причины пожара	Количество пожаров	Процент от общего количества пожаров	Число погибших людей	Процент от общего числа погибших людей
Установленные поджоги	7	3,10	0	0
Неисправность оборудования	58	25,66	6	31,58
НПУЭ:				
- электрооборудования	17	7,52	3	15,78
- печей	1	0,44	0	0
- теплогенерирующих установок	0	0	0	0
- бытовых газовых устройств	0	0	0	0
НППБ электрогазовых работ	25	11,06	0	0
<i>Взрывы</i>	1	0,44	0	0
Самовозгорание веществ и материалов	6	2,65	0	0
Неосторожное обращение с огнем	86	38,05	9	47,37
<i>Грозовые разряды</i>	1	0,44	9	0
<i>Неустановленные</i>	6	2,65	1	5,26
Прочие	18	7,96	0	0

*Примечание.* НПУЭ – нарушение правил устройства и эксплуатации; НППБ – нарушение правил пожарной безопасности.

В свою очередь, пожар может привести к взрыву и последующему воздействию на персонал и ОПС. Загрязнение среды светлыми нефтепродуктами (СНП) – бензином и керосином – в ряде случаев может сопровождаться взрывом и пожаром. В табл. 2 приведены эти опасности в зависимости от стадии технологического процесса и оборудования.

При анализе риска опасных промышленных объектов допускаются самые разнообразные методы, в том числе и экспертные процедуры. В основе последних лежат субъективные оценки, опирающиеся на

известную эксперту информацию. Работа с априорной информацией представляет особую разновидность вероятностных процедур, включая субъективные (персональные) вероятности.

Таблица 2

Опасности технологического процесса и оборудования

Технологическая операция	Функциональный блок (сооружение, оборудование, помещение)					
	СНЭ	ПНС	ТТ	РП	Л	ПХ
Слив, зачистка, налив (железнодорожные цистерны)	В, П, О, З	В, П, О, З	В, П, О, З	В, П, О, З	В, П, О, З	В, П, О, З
Перекачка СНП						
Хранение СНП	В, П, О			В, П, О, З	В, П, О	В, П, О, З
Ремонт резервуаров						
Отбор проб, проведение замеров уровня СНП						

*Примечание.* СНЭ – сливно-наливная эстакада; ПНС – продуктово-насосная станция; ТТ технологический трубопровод (для перекачки СНП); РП – резервуарный парк; Л – лаборатория; ПХ – помещения для хранения СНП, отобранных для анализа.

Для определения вероятности наступления неблагоприятного события, например взрыва  $Q_6$ , надо знать вероятности исходных событий – образование парогазовой смеси  $Q_{2.1}$  и появление источника воспламенения  $Q_{2.2}$ . Для определения вероятности первого исходного события  $Q_{2.1}$  можно использовать данные для показателей, формирующих коэффициент  $K_1$  (частные факторы взрывоопасности), приведенные в табл. 3.

Анализ специфических свойств керосина разных марок и бензинов показал отсутствие у них принципиальных различий. Оба они являются легковоспламеняющимися жидкостями (ЛВЖ), но упругость паров бензина значительно (в среднем на 1 – 2 порядка) выше упругости паров керосина. Поэтому в условиях производства при нормальной температуре в закрытых объемах бензин может образовывать паровоздушные смеси, способные к взрыву от внешних источников, в то время как керосин практически их не образует.

## Взрывопожароопасные свойства бензина и керосина

Показатели, формирующие коэффициент $K_1$	Бензин БР-1	Керосин
Диапазон концентрационных пределов воспламенения	0,02	0,02
Нижний концентрационный предел воспламенения	0,13	0,13
Минимальная энергия зажигания	0,09	0,09
Температура среды	0,01	0,01
Давление среды (избыточное)	0	0
Плотность газа (пара) по отношению к плотности воздуха	0,10	0,10
Объемное электрическое сопротивление	0,06	0,06
Особо опасные характеристики	0	0

Коэффициент  $K_1$ , имеющий достаточно высокое значение (0,41), можно связать с вероятностной составляющей, принимая субъективную вероятность образования паровоздушной смеси бензина, близкой к 0,4. Что касается керосина, то эта величина в значительной мере зависит от его состава. Для авиационных топлив она приближается к 0,4, а для осветительного керосина может быть принята на порядок ниже, т. е. 0,04.

Статистика пожаров и взрывов свидетельствует о том, что источники воспламенения проявляются достаточно часто. Поэтому на этапе оценки опасности можно принять субъективную вероятность появления источника зажигания (воспламенения)  $Q_{2.2}$  равной 0,4 (такой же, как  $Q_{3.13} = 0,40$ ). В этом случае для модели оценки вероятности взрыва бензина он составит  $0,4 \cdot 0,4 = 0,16$ . Иначе говоря, один случай из шести может закончиться взрывом. Для осветительного керосина эта величина на порядок меньше (0,016), т.е. только один случай из 60 будет сопровождаться взрывом.

Наиболее значимым является анализ источников воспламенения. Свой вклад вносят аппаратура с огневым обогревом, искрение и перегрев токоведущих систем, удар и трение. Анализ реальных случаев позволил оценить вклад источников воспламенения равный, 0,14. Из этой величины 0,12 приходится на искрение и перегрев токоведущих частей. Вероятности проявления других источников воспламенения следующие: атмосферное электричество (молния, грозовые разряды):  $Q_{3.10} = 0,05$ ; разряд статического электричества:  $Q_{3.11} = 0,09$ ; тлеющее пламя (транспорт):  $Q_{3.12} = 0,02$ ; открытое пламя (неосторожное

обращение с огнем):  $Q_{3.13} = 0,40$ ; другие источники:  $Q_{3.14} = 0,10$ . Составляющие вероятности более низкого уровня на данном этапе не анализируются.

Для анализа риска применительно к опасным факторам «Взрыв» и «Пожар» использовали данные о 226 пожарах на складах ЛВЖ и ГЖ, имевших в качестве источника загорания ЛВЖ. Эти пожары сопровождались гибелью 19 человек. Отсюда можно в первом приближении определить, что один погибший приходится на 12 пожаров. Считая, что вероятность взрывов и пожаров с участием бензина равна 0,16, получаем вероятность смертельного травмирования, равную 0,013.

Проведенный анализ показал, что потенциальная вероятность аварии на объектах по хранению нефти и нефтепродуктов достаточно высокая. Существенный вклад в эту составляющую вносят ошибки персонала.

Причинами ошибок персонала могут быть рассеянность, привычные ассоциации, низкая бдительность, ошибки альтернативного выбора, неадекватный учет побочных эффектов и неявных условий, малая точность, слабая топографическая, пространственная ориентировка. Важное средство предотвращения аварий в данном случае – четкое соблюдение отраслевых правил, норм и инструкций.