

Федеральное агентство по образованию  
Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра строительной механики

69.05(07)  
М487

А.П. Мельчаков

**РАСЧЕТ И ОЦЕНКА  
РИСКА АВАРИИ И БЕЗОПАСНОГО РЕСУРСА  
ЗДАНИЙ, СТРОЕНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**  
(Методика и ее инженерные приложения)

**Учебное пособие  
для самостоятельной работы студентов**

Челябинск  
Издательство ЮУрГУ  
2005

УДК [69.05:658.562](076.5) + 69.059(076.5)

Мельчаков А.П. Расчет и оценка риска аварии и безопасного ресурса зданий, строений и сооружений. (Методика и ее инженерные приложения): Учебное пособие для самостоятельной работы студентов. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2005. – 44 с.

В учебном пособии представлены нормативная база (регламент) на уровень конструкционной безопасности строительных объектов и методика экспертной оценки риска аварии и безопасного ресурса зданий и сооружений. Регламент и методика разработаны с целью применения их в процедурах технического регулирования уровня конструкционной безопасности строительных объектов, находящихся на различных стадиях инвестиционного цикла. Пособие содержит систематизированное изложение теории прогнозирования риска аварии и ориентировано на реализацию в строительной отрасли Федерального закона «О техническом регулировании».

Пособие предназначено для студентов специальностей 290300– «Промышленное и гражданское строительство» и 291400 – «Проектирование зданий» при изучении ими дисциплины «Инженерная безопасность строительных систем».

В пособии раздел 4.1 разработан аспирантом Шлейковым И.Б., раздел 4.2 – аспирантом Никольским И.С., раздел 4.3 и приложение 1 – аспирантом Рябковым А.Н., а разделы 2.2 и 3.2 – аспирантом Косогоровым В.Г.

Илл. 6, табл. 10, список лит. – 12 назв.

Одобрено учебно-методической комиссией архитектурно-строительного факультета.

Рецензенты: Б.И.Шлейков, С.Б.Шматков.

ISBN 5-696-03053-X

© Издательство ЮУрГУ 2005.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ</b>	
1.1. Понятия и определения теории безопасности .....	5
1.2. Риск и сценарий строительных аварий .....	6
1.3. Функции экспертов и требования при их аккредитации .....	7
<b>2. СТАНДАРТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА</b>	
2.1. Закон распределения риска аварии .....	8
2.2. Стандартные значения риска аварии .....	10
2.3. Регламент конструкционной безопасности объекта .....	14
2.4. Стандарт на уровень надежности несущей конструкции .....	15
<b>3. ФАКТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА</b>	
3.1. Расчет риска аварии строительного объекта .....	16
3.2. Расчет и оценка ресурса зданий и сооружений .....	20
3.3. Пример оценки уровня безопасности строительного объекта .....	22
3.4. Верификация результатов оценки риска аварии .....	30
<b>4. ИНЖЕНЕРНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ</b>	
4.1. Прогноз риска аварии планируемого к возведению объекта .....	32
4.2. Управление риском аварии в процессе возведения объекта .....	36
4.3. Регулирование уровня безопасности подержанных объектов .....	37
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b> .....	39
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1.</b> Экспертная система расчета риска аварии и ресурса .....	40
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2.</b> Нормативные показатели долговечности объектов .....	44

## **ВВЕДЕНИЕ**

Строительная отрасль, как и любая другая отрасль промышленности, характеризуется наличием аварийных ситуаций. Статистика показывает, что в ~80% случаев строительных аварий с обрушением несущих конструкций объекта происходит в результате человеческих ошибок, допущенных при проектировании, возведении и эксплуатации зданий и сооружений. Эти ошибки формируют т.н. внутренний (объектный) риск аварии, от величины которого зависит не только срок службы объекта, но и размер ущерба в случае его аварии. Рост числа аварий и катастроф с участием строительных объектов требует создания адекватной потенциальной угрозе систему обеспечения безопасности в строительстве.

Для конечной строительной продукции (зданий, строений и сооружений) основным видом безопасности является конструкционная, характеризующая способность зданий и сооружений сопротивляться перегрузкам в чрезвычайных ситуациях. В соответствии с Федеральным Законом «О техническом регулировании» такая безопасность трактуется как отсутствие недопустимого риска аварии. Уровень конструкционной безопасности считается достаточным, если фактический риск аварии объекта находится в области приемлемых значений. Границами области служат два стандартных значения риска: нормативное, являющееся максимально-допустимым значением риска аварии для строящихся зданий (сооружений), и предельно-допустимое значение, при достижении которого на эксплуатируемом объекте следует произвести ремонтные работы с целью снижения риска аварии и продления его безопасного ресурса. Существует и третье стандартное значение риска аварии – предельное, при достижении которого физический (конструкционный) износ объекта становится предельным, а способность несущего каркаса сопротивляться действующим нагрузкам исчерпывается.

Область приемлемых значений риска аварии является главной частью технического регламента «Безопасность строительного объекта», практическое применение которого базируется на информации о величине фактического риска аварии строительного объекта. Инструментом для измерения риска аварии служит экспертная система, представляющая собой человеко-машинный комплекс, сочетающий математические методы и информационные технологии с опытом, знаниями и интуицией людей, освоивших профессию «эксперт».

Инженерные приложения регламента и методики измерения фактического риска аварии тесно связаны с процедурами технического регулирования уровня безопасности проектируемых, строящихся и эксплуатируемых (поддержанных) зданий и сооружений. В процедурах регулирования методика измерения фактического риска аварии используется на этапе диагностики технического состояния исследуемого объекта, обеспечивая эти процедуры необходимой информацией, а регламент служит для них нормативной базой.

В целом методика ориентирована на реализацию в строительной отрасли Федерального Закона «О техническом регулировании» применительно к

выпуску и обороту конечной строительной продукции. Методика может применяться:

1. Для декларирования на стадии проекта уровня конструкционной безопасности технически сложных, особо опасных и уникальных зданий и сооружений
2. Для инженерного сопровождения и сертификации соответствия строящихся объектов стандарту конструкционной безопасности
3. Для оценки остаточного ресурса эксплуатации зданий при принятии решения о их реконструкции, реставрации, капитальном ремонте, сносе, «размораживании», перепрофилировании и др.
4. Для оценки стоимости объектов при операциях с недвижимостью (продажа, аренда, обмен, залог, долевое участие и др.)

## **1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

### **1.1. Понятия и определения теории безопасности**

В теории безопасности строительных объектов используются следующие понятия и определения:

1. Объекты строительные – здания, строения и сооружения, предназначенные для безопасного проживания и безопасной жизнедеятельности людей. Для строительных объектов базовым видом безопасности является конструкционная, характеризующая степень защищенности объекта от обрушения его несущих конструкций при возникновении нештатных и непредвиденных внешних воздействий.
2. Безопасность конструкционная – часть промышленной безопасности, связанная с техническим состоянием конструкций несущих каркасов строительных объектов. Трактуются как отсутствие недопустимого риска аварии. Считается достаточной, если риск аварии строительного объекта находится в области приемлемых значений.
3. Авария строительного объекта – абсолютное предельное состояние объекта, соответствующее либо полному разрушению конструкций несущего каркаса, либо возникновению значительных деформаций или потере устойчивости вида деформации конструкций. Достижение таких состояний может привести к полной физической непригодности объекта, значительному материальному ущербу и даже к гибели людей.
4. Риск аварии – число, равное отношению фактической вероятности аварии к ее теоретической величине, вносимой по умолчанию в объект при его проектировании. Является мерой ожидаемого ущерба в случае аварии объекта строительства.
5. Регламент конструкционной безопасности – совокупность стандартных показателей безопасности, включающая стандартные значения риска аварии и стандартные уровни надежности конструкций несущего каркаса объекта.

6. Надежность несущей конструкции – степень соответствия конструкции требованиям проекта в части обеспечения ее прочности, жесткости и устойчивости.
7. Область приемлемых значений риска аварии – основная часть технического регламента, накладывающая ограничения на величину фактического риска аварии строительного объекта. Границами области являются стандартные значения риска аварии: – нормативное и предельно-допустимое.
8. Декларирование – форма подтверждения соответствия объекта требованиям технического регламента на различных стадиях его жизненного цикла. Цель декларирования на стадии проекта – выявление в проекте грубых ошибок и последующее их устранение. Включает определение условий, при которых требованиям регламента будет отвечать конечный продукт. Применяется для технически сложных, особо опасных и уникальных зданий и сооружений.
9. Грубая ошибка – действие участника строительства (эксплуатации) объекта, заключающееся в непреднамеренном отступлении при производстве работ от обязательных требований безопасности. Следствием человеческих ошибок является снижение уровня конструкционной безопасности объекта.
10. Сертификация соответствия – процедура испытания строящегося объекта с целью подтверждения соответствия фактического риска аварии нормативному значению. При сертификации производится отслеживание и устранение грубых ошибок, допущенных при возведении конструкций несущего каркаса строительного объекта.
11. Физический (конструкционный) износ объекта – число в интервале от 0 до 1, характеризующее степень деградации конструкций несущего каркаса строительного объекта под действием системоразрушающих факторов (дефекты, старение, коррозия, усталость и др.).
12. Безопасный остаточный ресурс объекта – интервал времени эксплуатации строительного объекта от текущего момента до момента достижения риском аварии объекта предельно-допустимого значения.
13. Энтропия риска (информационная) – мера неопределенности технического состояния несущего каркаса строительного объекта.

## **1.2. Риск и сценарий строительных аварий**

Риск аварии – векторная величина, регулируемой составляющей которой является объектный риск, формируемый за счет ошибок проектировщиков, поставщиков, строителей, контролеров и др. К нерегулируемым составляющим риска аварии относятся вероятности возникновения внешних непроектных воздействий на объект, различающиеся по частоте проявления и мощности. Экономическими составляющими риска аварии являются затраты на обеспечение конструкционной безопасности, убытки от аварии и выгода от снижения внутреннего риска.

В ~80% случаев аварии зданий и сооружений происходят в результате пересечения двух независимых негативных событий: события, состоящего в неожиданном появлении внешнего непроектного воздействия, провоцирующего аварию, и события, заключающегося в том, что при возведении и/или эксплуатации объекта допущена определенная совокупность человеческих ошибок, снизившая уровень его конструкционной безопасности. При аварии объекта размер ущерба адекватен величине внутреннего (объектного) риска аварии.

Оценка внутреннего (объектного) риска аварии на основе классического вероятностного подхода невозможна [12] по двум причинам. Во-первых, аварии зданий и сооружений являются весьма редкими событиями, а во-вторых, непредсказуемые человеческие ошибки, допускаемые в процессе проектирования, возведения и эксплуатации строительного объекта, вносят существенную неопределенность в реакцию (поведение) несущего каркаса объекта на внешнее воздействие. Степень неопределенности и риск аварии объекта – тесно связанные понятия. Оценка риска аварии должна осуществляться на основе логико-вероятностного подхода, базирующегося на теоремах теории вероятностей (теорема гипотез, теорема полной вероятности и др.), методах теории размытых множеств, приемах нечеткой логики и методах принятия решений в условиях неопределенности.

Величины фактического риска аварии, физического (конструкционного) износа и безопасного ресурса зданий и сооружений взаимосвязаны. Для определения этих величин используется закон распределения риска аварии, являющийся интегральным показателем уровня конструкционной безопасности строительного объекта. При известном законе распределения фактического риска аварии степень неопределенности технического состояния объекта оценивается величиной информационной энтропии, являющейся наиболее представительным показателем этого закона. Закон распределения и показатель его информационной энтропии позволяют отыскать не зависящие от конструктивного решения здания (сооружения) стандартные (инвариантные) значения риска аварии, из которых формируется технический регламент конструкционной безопасности строительных объектов.

### **1.3. Функции экспертов и требования при их аккредитации**

Методика ориентирована на высококвалифицированных экспертов и предъявляет достаточно жесткие требования к уровню их знаний. В частности, ведущий эксперт должен знать и владеть методами принятия решений в условиях неопределенности, методами анализа предельных состояний несущих конструкций, уметь корректно поставить задачу узкому специалисту (расчетчику, проектировщику и др.), решение которой позволит принять оптимальное техническое решение по снижению риска аварии исследуемого объекта.

Требования, предъявляемые к уровню знаний ведущего эксперта при его аккредитации, отличаются от требований к знаниям линейных экспертов. Отличие состоит в том, что требования к знаниям ведущих экспертов

существенным образом выходят за рамки вузовской подготовки инженеров по специальности промышленное и гражданское строительство. Наилучший вариант аккредитации ведущего эксперта реализуется в случае, если претендент на эту роль имеет ученую степень в области строительных наук. Кроме требований к уровню знаний экспертов условиями при их аккредитации являются независимость от производителей строительной продукции и органов исполнительной власти, опыт работы в проектной и/или строительной (подрядной) организации и опыт работы экспертом по оценке технического состояния зданий (сооружений) при наличии соответствующего сертификата. Очевидно, что аккредитованный таким образом эксперт не может быть привлечен иском третьей стороны к судебной ответственности по результатам оценки уровня конструкционной безопасности объекта, поскольку на вопрос «почему это так» он может ответить лишь другому эксперту, аккредитованному по тем же правилам и критериям, что и он.

Важнейшей функцией эксперта является оценка точности и достоверности полученных результатов. Особенно это касается назначения стандартного значения риска аварии, где точность принятого решения имеет прямые экономические последствия. Действительно, даже незначительное ужесточение стандарта приводит к существенному увеличению затрат на его обеспечение, а поскольку общество (государство, собственники, инвесторы) всегда ограничено в средствах, становится понятным важность вопросов верификации.

Не менее важной в условиях рынка функцией эксперта является информационное обеспечение заказчика. Заказчик, прежде чем вкладывать деньги в реализацию технических решений по снижению риска аварии, должен знать насколько повысится уровень безопасности и ресурс принадлежащего ему объекта в результате этого регулирования.

## 2. СТАНДАРТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА

### 2.1. Закон распределения риска аварии

Бытующий в среде строителей тезис о том, что здания и сооружения, имеющие достаточный запас прочности по отношению к внешним воздействиям, надежны и по отношению к человеческим ошибкам, практикой не подтверждается: излишний запас не компенсирует ошибки людей. Более того, эти ошибки в ~80% случаев являются причиной аварий объектов строительства.

В работе [1] утверждается, что к окончанию строительства объекта за счёт ошибок людей фактическая ( $P_{\phi}$ ) вероятность аварии по сравнению с теоретической ( $P_m$ ) величиной возрастает в несколько раз. Этот факт демонстрирует рис.1, на котором приведены законы распределения воздействий  $F$  на объект и его сопротивления  $S$  этим воздействиям. Человеческие ошибки размывают закон распределения сопротивления объекта внешним воздействиям (пунктир на рис.1), что приводит к увеличению вероятности аварии по сравнению с теоретической величиной.



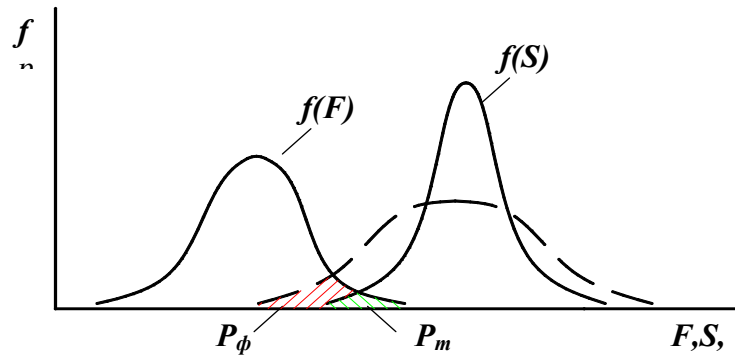


Рис.1 Теоретическая ( $P_m$ ) и фактическая ( $P_\phi$ ) вероятности аварии

На неограниченном множестве « $m$ »-этажных зданий фактическая вероятность аварии объекта может быть представлена в виде  $P_\phi = P_m + P_\delta$ , где  $P_\delta$  – дополнительная вероятность аварии, формируемая за счет ошибок людей, допущенных при проектировании, возведении и эксплуатации строительного объекта. Для определения  $P_\delta$  используется теорема гипотез (формула Байеса) [4], позволяющая пересчитать априорные вероятности в свете информации о допущенных ошибках. Вводится два противоположных события:  $C$  – ошибки в несущих каркасах зданий есть,  $C^*$  – ошибок нет. События  $C$  и  $C^*$  образуют полную группу несовместных событий, идентифицируются в процессе или после строительства, а до начала строительства множество  $C$  пустое. Принимаются следующие обозначения:  $P(C^*) = \nu$  – вероятность, что в построенном здании ошибок нет,  $P(C) = (1-\nu)$  – вероятность противоположного события. Априорные (до начала строительства) вероятности наступления и не наступления аварии зданий (сооружений) известны и соответственно равны  $P_m$  и  $(1-P_m)$ . Из формулы Байеса следует соотношение:

$$P_\delta = P_m P(C/A) / [P_m P(C/A) + (1-P_m)P(C/A^*)],$$

где  $P(C/A)$  – вероятность события  $C$  при условии, если авария произойдет, а  $P(C/A^*)$  – тоже самое, но если авария объекта не произойдет. Приемы нечеткой логики позволяют принять как гипотезу, что условные вероятности  $P(C/A^*) = \nu$ , а  $P(C/A) = 1-\nu$ . Действительно, если авария объекта не произойдет, то реализуется событие  $C^*$ , в противном случае – событие  $C$ . После подстановки этих равенств в байесовское соотношение с учетом, что вероятность  $P_m$  имеет порядок  $\sim 10^{-6}$  [2], имеем:  $P_\delta = P_m(1-\nu)/\nu$ . Сложение  $P_\delta$  и  $P_m$  дает:

$$r = P_\phi / P_m = 1/\nu. \quad (1)$$

В математической модели (1) под параметром  $\nu$  следует понимать уровень конструкционной надежности несущего каркаса здания. Поскольку на практике объективно всегда есть отступления от требований проекта, то в полученной формуле отношение  $P_\phi/P_m$  всегда больше 1. Столь малые вероятности, каковыми являются величины  $P_\phi$  и  $P_m$ , могут быть поняты практиками лишь через свое отношение, являющееся целочисленной величиной. Здесь важно то, что вероятность  $P_m$  как концепт существует (см. рис. 1), и гипотетически

достигается в случае, если при возведении несущего каркаса ни разу не будут нарушены требования проекта. Отношение  $P_{\phi}/P_m$  принимается за величину риска аварии объекта строительства, обозначается символом  $r$  (*risk*) и показывает сколько раз фактическая вероятность аварии выше теоретической, закладываемой по умолчанию в объект при его проектировании.

При отсутствии статистических данных о возможных значениях случайной величины  $r$  для нахождения закона распределения плотности ее вероятностей на некотором ограниченном множестве « $m$ »-этажных зданий сформулируем исходящие из логики и строительной практики следующие аксиомы:

Аксиома 1. Вероятности значений  $r \leq 1$  равны нулю (это действительно так, поскольку обеспечить в процессе строительства теоретический риск аварии не удастся по целому ряду объективных причин).

Аксиома 2. Кривая распределения является строго ассиметричной; мода  $\langle r \rangle$  случайной величины  $r$  сдвинута влево от среднего значения (это действительно так, поскольку существует естественное стремление общества обезопасить среду своего обитания (жизнедеятельности)).

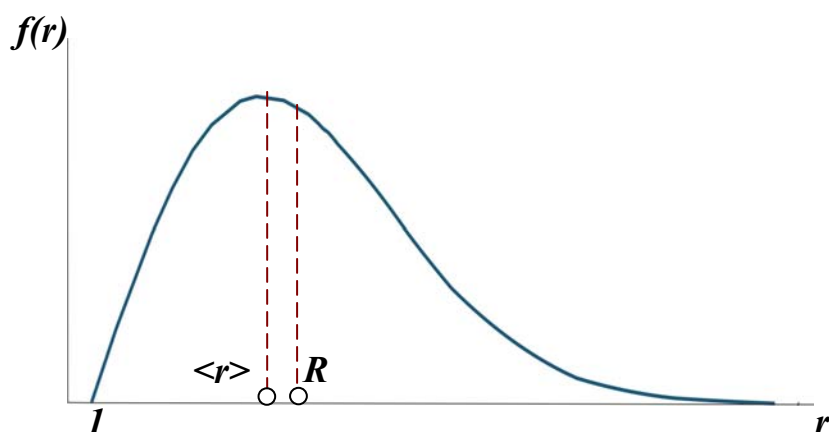


Рис. 2 Закон распределения случайной величины  $r$

Принятым аксиомам отвечает однопараметрическое распределение Рэля [2,4] (рис.2), которое имеет следующий вид:

$$f(r) = (r-1)/\sigma^2 \cdot \exp[-(r-1)^2/2\sigma^2]. \quad (2)$$

Известно [2,4], что в распределения (2) параметр  $\sigma$  связан с математическим ожиданием (средним значением)  $R$  и модой  $\langle r \rangle$  соотношениями:

$$R = 1 + 1,25\sigma, \quad \langle r \rangle = \sigma + 1. \quad (3)$$

Для вероятностного описания случайной величины  $r$  достаточно знать значение одной из вышеприведенных характеристик. Если принять как гипотезу, что «байесовская» основа (1) остается справедливой и для ограниченного множества « $m$ »-этажных зданий, то для определения среднего значения риска  $R$  следует воспользоваться вытекающим из формулы (1) соотношением:

$$R = 1/Mv, \quad (4)$$

где  $Mv$  – математическое ожидание случайной величины  $v$ , численные значения которых находятся в пределах от 0 до 1.

## 2.2. Стандартные значения риска аварии

Закон распределения (2) позволяет отыскать стандартные значения риска аварии, к которым относятся:

- допустимый (нормативный) риск ( $R_n$ ), регламентирующий величину риска аварии объекта после окончания его строительства;
- предельно-допустимый риск ( $R_{nd}$ ), при достижении которого на объекте должны быть произведены ремонтно-восстановительные работы по снижению риска аварии;
- предельный риск аварии ( $R_n$ ), при достижении которого способность объекта сопротивляться действующим на него нагрузкам исчерпывается.

К допустимому (нормативному)  $R_n$  риску аварии предъявляются следующие требования:

1. Он не должен быть выше величины естественного риска аварии.
2. При его назначении должна быть учтена ответственность объекта по тяжести последствий гипотетической аварии.

Одним из показателей естественного риска является математическое ожидание риска аварии на неограниченном множестве « $m$ »-этажных зданий (в естественных условиях). Очевидно, что на таком множестве закон распределения величины  $v$  является симметричным относительно значения  $0,5$ . Поэтому, независимо от вида кривой распределения величины  $v$ , значение  $Mv = 0,5$ . Из формулы (4) следует, что естественный риск аварии объекта строительства  $R=2$ . С учетом второго требования формула для нормативного риска принимает вид:

$$R_n = \alpha, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, размытый в интервале  $1 < \alpha < 2$  и учитывающий ответственность объекта по тяжести последствий гипотетической аварии.

Для конкретного здания (сооружения) коэффициент  $\alpha$  принимается по табл. 1 в зависимости от назначенной экспертом категории ответственности объекта и её ранга (табл.2).

Таблица 1

Значения коэффициентов  $\alpha$

Категория ответственности	1			2			3			4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
коэффициент $\alpha$	1.99	1.91	1.83	1.75	1.67	1.59	1.51	1.43	1.35	1.27	1.19	1.11

Ранги категорий ответственности: 1–ответственность объекта ниже назначенной категории; 2 – ответственность соответствует назначенной категории; 3 – ответственность выше назначенной категории.

Признаки категории ответственности объекта и её ранга

Признаки ответственности объекта	Категория ответственности
Здания и сооружения сезонного или вспомогательного назначения. Малоэтажное строительство, эксплуатация без скопления людей, отсутствие опасных производств, низкая концентрация ценностей и энергоресурсов	1
Здания и сооружения массового строительства, в т.ч. по типовым проектам. Социально и (или) политически значимые объекты при отсутствии опасных производств.	2
Здания более 20-и этажей при высокой плотности застройки, эксплуатация при значительном скоплении людей, высокая концентрация ценностей и энергоресурсов.	3
Уникальные и технически сложные здания и сооружения. Чрезвычайно высокая концентрация ценностей и энергоресурсов.	4

В таблице 1 строительные объекты по ответственности разделены на 12-ть уровней (4-е категории и у каждой категории по три ранга). Такое деление обусловлено экономическими соображениями, поскольку даже незначительное ужесточение стандарта на величину допустимого риска аварии приводит к значительному росту затрат на его обеспечение. Утвержденный в установленном порядке допустимый риск аварии приобретает форму нормативного риска, который в методике обозначен как стандарт конструкционной безопасности объекта строительства.

Предельно–допустимый ( $R_{nd}$ ) и предельный ( $R_n$ ) риски аварии определяются с помощью наиболее представительного показателя закона распределения, каковым является энтропия риска ( $H$ ), предоставляющая информацию о степени неопределенности технического состояния объекта и определяемая по формуле [4]:

$$H = - \sum P(A_i) \log_2 P(A_i), \quad (6)$$

где  $P(A_i)$  –вероятность события, заключающегося в том, что риск аварии находится в  $i$ -м диапазоне значений риска, определяемых уравнением (2).

На рис. 3-а приведен построенный на основе машинного эксперимента с формулами (2) и (6) график функции  $H(R)$  (пунктирная линия), показывающий зависимость энтропии от величины математического ожидания  $R$  закона распределения риска аварии. Для практического применения этот график аппроксимирован уравнением  $H(R) = \log_{2,15} R$  (на рис. 3-а – сплошная линия), на основе которого построена диаграмма (рис.3-б), связывающая изменение скорости роста энтропии с увеличением среднего значения риска аварии  $R$  объекта.

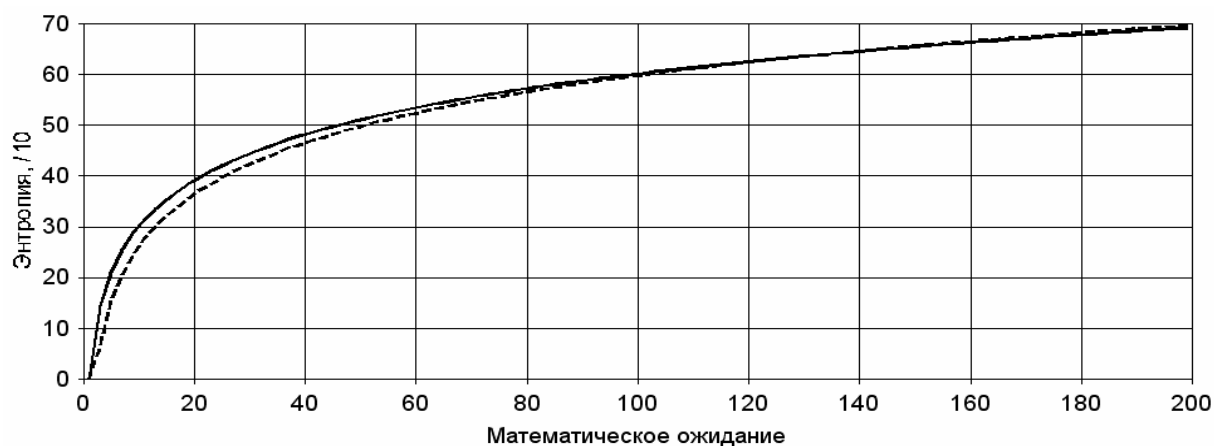


Рис.3-а. Зависимость энтропии от математического ожидания риска аварии

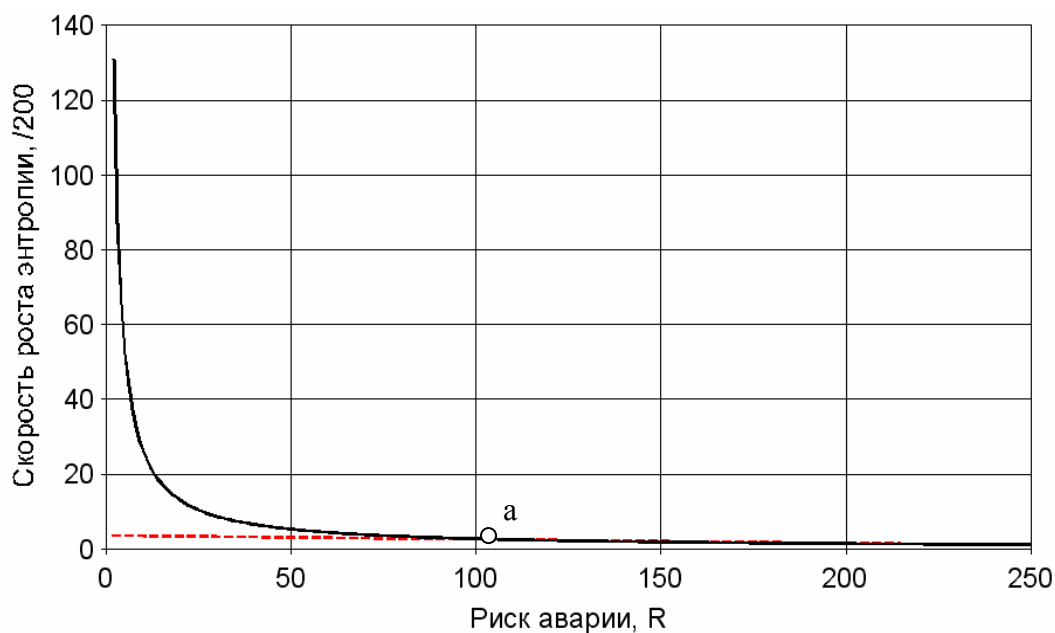


Рис. 3-б. Диаграмма «Скорость роста энтропии – риск аварии».

При анализе технического состояния объекта на основе энтропии риска существенное значение имеет интенсивность изменения скорости роста энтропии [12]. Плавное снижение скорости роста энтропии означает плавный переход объекта в аварийное состояние. Начиная с точки *a* (рис.3-б), интенсивность скорости снижения энтропии становится постоянной. Этот факт свидетельствует о том, что при  $R=102$  заканчивается время безопасной эксплуатации объекта; его состояние становится стабильно аварийным, при котором с высокой долей вероятности в несущих конструкциях объекта могут появиться предвестники аварии – трещины. Величина  $R=102$  характеризует закон распределения риска аварии на подмножестве «*m*»-этажных зданий, находящихся в предельно-допустимом состоянии. На этом подмножестве за предельно-допустимый риск аварии объекта следует принять наиболее вероятное значение риска, каковым является мода закона распределения, определяемая из формул (3) и равная  $\langle r \rangle = R_{nd} = 81,8$ . Как будет показано в разделе 3.4, при достижении объектом предельно-допустимого риска величина его физического (конструкционного) износа составляет ~50%. В работе [9]

доказывается, что при такой величине износа требуется капитальный ремонт здания с целью восстановления способности его несущего каркаса сопротивляться перегрузкам в чрезвычайных ситуациях.

Предельный уровень риска аварии  $R_n$  определится, если прямую линию (пунктир на рис.3-б) продолжить до пересечения с осью  $R$ . Пересечение происходит в условной точке, где величина среднего риска аварии равна  $R = 340$ . В действительности пересечения с осью не происходит, но скорость роста энтропии в окрестности этой точки максимально приближается к нулю, что позволяет принять величину  $R_n = 340$  за предельный риск аварии объекта, при достижении которого конструкционный износ объекта становится предельным, а способность несущего каркаса сопротивляться действующим нагрузкам теоретически исчерпывается. Такое состояние объекта принято считать ветхо-аварийным [9], которое характеризуется появлением множественных трещин, способных превратить несущие конструкции объекта в механизм.

### 2.3. Регламент конструкционной безопасности объекта

Регламент конструкционной безопасности строительного объекта накладывает ограничения на величину фактического риска аварии зданий, строений и сооружений. К главной части регламента относится область приемлемых значений риска аварии, границами которой являются нормативный и предельно-допустимый риски аварии (рис.4). Пока фактический риск аварии объекта остается внутри этой области уровень его конструкционной безопасности считается достаточным.

Основная цель введения регламента на величину риска аварии состоит в обеспечении максимально-возможного безопасного ресурса и срока службы строительных объектов. Из рис.4, на котором показана вся совокупность стандартных значений риска аварии ( $R_n$ ,  $R_{no}$  и  $R_n$ ), следует, что если риск аварии, заложенный в объект к моменту сдачи его в эксплуатацию, нормативный ( $R_n$ ), а грубые ошибки в процессе эксплуатации объекта не допущены, то безопасный ресурс ( $T_0$ ) и срок службы ( $T_c$ ) этого объекта будут наибольшими из возможных значений, зависящих от конструктивного типа здания.

При наличии регламента предоставляется принципиальная возможность через плановые экспертизы, в процессе которых измеряется фактический риск ( $R_f$ ) и выявляются изменения, связанные со старением и износом, и за счет предупредительных мероприятий снижать величину накопленного риска и циклично увеличивать безопасный ресурс объекта (стрелка на рис.4).

Если в построенном объекте фактический риск аварии превышает нормативное значение (пунктирная линия на рис.4), то это приводит к преждевременному исчерпанию безопасного ресурса объекта и, следовательно, к более частым и дорогим капитальным ремонтам. При этом величина потерянного ресурса ( $T_n$ ) существенным образом зависит от величины фактического риска аварии объекта на момент сдачи его в эксплуатацию.

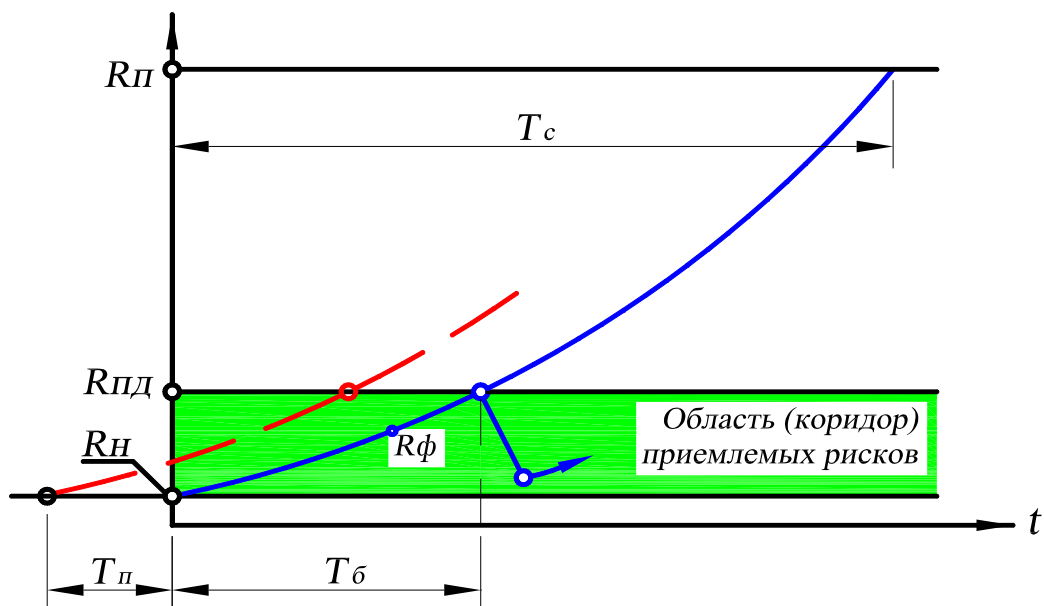


Рис. 4. Регламент риска аварии и ресурс объекта

Наиболее значимым из показателей долговечности объекта является его безопасный ресурс. Если по истечению безопасного ресурса ремонтно-восстановительные мероприятия по снижению риска аварии на объекте произведены не будут, то величина  $(T_c - T_б)$  является временем «дожития» объекта. Однако, в этот период жизни сопротивляемость объекта перегрузкам снижена и использование  $(T_c - T_б)$  ресурса может привести к аварии, а значит и к убыткам, которые будут несоизмеримо выше стоимости предупредительных мероприятий.

Регламент на величину фактического риска аварии выполняет роль нормативной базы при осуществлении процедур технического регулирования риска аварии с целью продления безопасного ресурса строительных объектов. При этом наибольший эффект достигается через регулирование риска аварии на ранних стадиях жизненного цикла объекта – стадиях замысла, проекта и возведения – обозначенных в законе о техническом регулировании как декларирование и сертификация.

#### 2.4. Стандарт на уровень надежности несущей конструкции

Стандарт на уровень надежности несущей конструкции является составной частью технического регламента конструкционной безопасности строительного объекта. К стандартным уровням надежности относятся:

- нормативный ( $p_n$ ), соответствующий нормативному риску аварии объекта;
- предельно-допустимый ( $p_{нд}$ ) уровень, который соответствует предельно-допустимой величине риска аварии объекта.

При определении  $p_n$  и  $p_{нд}$  несущий каркас « $m$ »-этажного здания рассматривается как система, состоящая из последовательно возведенных ( $m+1$ ) подсистем, представляющих собой каркасы нулевого цикла и этажей объекта. Вводится гипотеза, что человеческие ошибки, допущенные в одной из

подсистем, не зависят от ошибок, допущенных в других. Эта гипотеза позволяет для оценки уровня надежности  $\nu$  несущего каркаса объекта применить методы системной теории надежности [2]. При последовательном соединении подсистем величина  $\nu$  равна:

$$\nu = \nu_0 \nu_1 \dots \nu_i \dots \nu_m,$$

где  $\nu_0$  – уровень надежности нулевого цикла (0-этажа);  $\nu_i$  – уровень надежности каркаса  $i$ -го этажа.

Аналогично, в каждой подсистеме объекта в зависимости от его конструктивного решения можно выделить однотипные последовательно возведенные группы несущих конструкций и к этой подсистеме также применить методы системной теории надежности. В результате получим:

$$\nu_0 = p_{01} p_{02} \dots p_{0j} \dots p_{0n_0}, \quad \nu_i = p_{i1} p_{i2} \dots p_{ij} \dots p_{in_i},$$

где  $p_{0j}$  – уровень надежности  $j$ -ой группы на нулевом цикле,  $n_0$  – число групп на нулевом цикле,  $p_{ij}$  – уровень надежности  $j$ -ой группы однотипных конструкций  $i$ -го этажа объекта,  $n_i$  – число групп на  $i$ -м этаже.

Рассмотрим гипотетическое состояние объекта, когда во всех однотипных группах конструкций несущего каркаса средние уровни надежности  $p$  одинаковые и равны  $p_n$ . Средний нормативный уровень надежности каркаса « $m$ »-этажного здания в этом случае будет равен:

$$M\nu_n = \Pi(p_0) \Pi(p_1) \dots \Pi(p_j) \dots \Pi(p_m) = p_n^N, \quad \text{где } N = (n_0 + \sum n_i).$$

Из соотношения (4), представленное в виде  $R_n = 1/M\nu_n$ , окончательно имеем:

$$p_n = (R_n)^{-1/N}. \quad (7)$$

По аналогии:

$$p_{n0} = (R_{n0})^{-1/N}. \quad (8)$$

Формулы (7) и (8) дают средние значения, вокруг которых группируются истинные средние значения уровней надежности конструкций в однотипных группах несущего каркаса объекта соответственно в допустимом и предельно-допустимом его состояниях. Стандартные уровни надежности предназначены для сравнительной оценки фактических уровней надежности несущих конструкций объекта.

В отличие от стандартных значений риска аварии, которые не зависят от этажности и конструктивного решения строительного объекта, т.е. являются инвариантами, стандартные уровни надежности несущих конструкций объекта существенным образом зависят от его конструктивного типа и этажности. Для сравнения в таблице приводятся результаты расчета нормативного уровня надежности конструкций здания каркасно-связевого конструктивного типа и монолитного при одинаковом числе этажей. Расчет произведен по формуле (7), в которой за нормативный риск аварии принята величина равная 2. Из таблицы следует, что чем больше число групп однотипных конструкций на этажах объекта и чем больше число его этажей, тем выше нормативный уровень надежности несущей конструкции.



Конструктивный тип здания	Число этажей	$n_o$	$n_i$	$N$	Нормативный уровень надежности
Каркасно-связевой	4	7	5	27	0,975
	16			87	0,992
Монолитный	4	5	3	17	0,960
	16			53	0,987

### 3. ФАКТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА

#### 3.1. Расчет риска аварии строительного объекта

Расчет фактического риска аварии базируется на экспертной информации о техническом состоянии однотипных групп конструкций несущего каркаса объекта. Информация предоставляется экспертами в виде законов распределения плотности вероятностей фактических уровней надежности конструкций в группах. На рис. 4 показаны типовые законы, позволяющие эксперту отразить на конкретный момент времени техническое состояние групп конструкций несущего каркаса объекта при проведении экспертных работ.

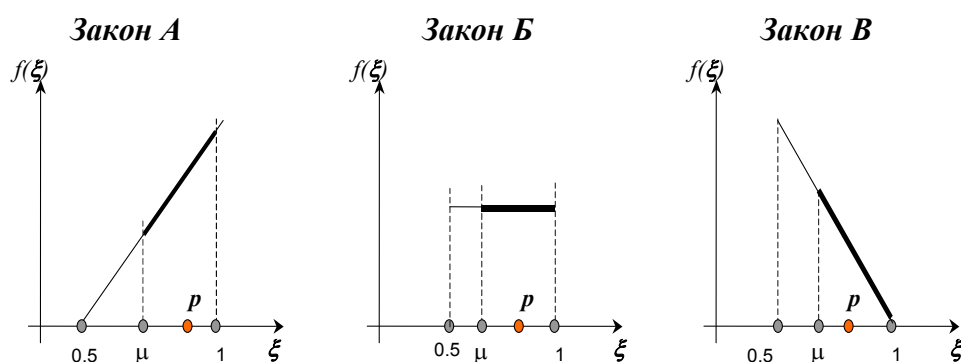


Рис.5. Типовые законы распределения надежностей конструкций

Вид закона распределения зависит от соотношения в группе дефектных и не дефектных конструкций. Если число не дефектных в группе конструкций превышает число дефектных, то принимается закон **А** (рис.5), математическая модель которого имеет вид:

$$f(\zeta) = (2\zeta - 1) / (\mu(1 - \mu)), \quad (9)$$

где  $\zeta$  – уровни надежности конструкций в группе ( $\mu < \zeta \leq 1$ ).

Если число не дефектных и дефектных конструкций в группе соизмеримо, то принимается закон **Б** (рис.5), математическая модель которого имеет вид:

$$f(\zeta) = 1 / (1 - \mu). \quad (10)$$

Если число не дефектных в группе конструкций меньше числа дефектных, то следует принять закон **В** (рис.5), математическая модель которого имеет вид:

$$f(\zeta) = 2(1 - \zeta) / (1 - \mu)^2. \quad (11)$$

При известном законе распределения средние уровни (математические ожидания) надежности в группе несущих конструкций определяются по

следующим формулам:

$$\text{При законе А} - p = 1/(\mu(1-\mu)[-2\mu^3/3 + \mu^2/2 + 1/6]); \quad (12)$$

$$\text{При законе Б} - p = (\mu+1)/2; \quad (13)$$

$$\text{При законе В} - p = 2/(1-\mu)^2[1/6 - \mu^2/2 + \mu^3/3]. \quad (14)$$

Нижняя граница законов характеризует уровень надежности ( $\mu$ ) наиболее дефектной («слабой») в группе конструкции. Значение  $\mu$  определяется на экспертной основе через соответствие «слабой» конструкции требованиям проекта в части обеспечения ее прочности, жесткости и устойчивости. Предельным значением  $\mu$  является величина, равная **0,5**, так как мера соответствия (степень) в отличие от вероятности изменяется в пределах от 0,5 до 1. Доказательством этого факта служит человеческий опыт, измеряющий соответствие голосованием (выборы, суды присяжных и т.д.), где мерой предельного соответствия является величина **0,5**.

Закон распределения уровней надежности конструкций в группе считается сформированным, если определен вид закона (А, Б или В) и найдено значение надежности  $\mu$  для «слабой» в группе конструкции. При известных законах для всех групп конструкций несущего каркаса объекта среднее значение  $R_\phi$  фактического риска аварии этого объекта определится по формуле (15), для построения которой использовано соотношение (4):

$$R_\phi = 1/Mv_\phi = 1/ \Pi(p_0) \Pi(p_1) \cdots \Pi(p_i) \cdots \Pi(p_m). \quad (15)$$

где  $\Pi(p_0)$  и  $\Pi(p_i)$  – соответственно произведение определяемых по формулам (12), (13) и (14) математических ожиданий (средних уровней) надежности групп конструкций несущего каркаса нулевого цикла и  $i$ -го этажа объекта.

Для определения  $\mu$  используется правило, при построении которого применен прием нечеткой логики, основанный на понятии *опасность* «слабых» конструкций, оцениваемой лингвистической переменной «очень» [5]. Правило содержит семь уровней опасности, определяемых признаками в лингвистической форме (табл.3). При этом переменной (*очень*)<sup>4</sup> седьмого уровня опасности присвоена низшая числовая оценка степени соответствия (0,5), что позволило вычислить степени соответствия конструкции требованиям проекта для остальных уровней ее опасности.

Для расширения диапазона устанавливаемых степеней соответствия конструкции требованиям проекта использован еще один прием нечеткой логики, связанный указанием ранга уровня опасности. Вводится три ранга: 1 – при назначенном уровне опасность может быть ниже ("мягкая" оценка уровня); ранг 2 – опасность в среднем соответствует назначенному уровню ("нормальная" оценка уровня); ранг 3 – при назначенном уровне опасность может быть выше ("жесткая" оценка). При "нормальной" оценке уровня опасности степень соответствия (опорные точки) указана в табл.3. Для первого и третьего рангов уровней степени соответствия определяются, если диапазон [1; 0.5] разбить между опорными точками на три интервала: **1.000**; **0.993**; **0.986**; **0.979**; **0.972**; **0.965**; **0.958**; **0.945**; **0.931**; **0.917**; **0.889**; **0.866**; **0.841**;

0.797; 0.752; **0.707**; 0.669; 0.632; **0.595**; 0.564; 0.532; **0.500**. Отбрасывая согласно нечеткой логики крайние (подчеркнутые) значения, и заменяя, согласно той же логики степень соответствия на уровень надежности конструкции, приходим к правилу, показанному в табл. 4. Очевидно, что в полученном таким образом правиле для уровней опасности 0 и 7 ранги не назначаются.

Таблица 3

Связь уровней опасности «слабой» конструкции и степеней ее соответствия требованиям проекта

Уровень опасности	Признак уровня опасности «слабой» конструкции	Значение переменной "очень"	Степень соответствия
1	Отступление от требований проекта <i>незаметное</i>	<i>(очень)<sup>1/8</sup></i>	0.979
2	Отступление от требований проекта <i>незначительное</i>	<i>(очень)<sup>1/4</sup></i>	0.958
3	Отступление от требований проекта <i>заметное</i>	<i>(очень)<sup>1/2</sup></i>	0.917
4	Отступление от требований проекта <i>существенное</i>	<i>(очень)<sup>1</sup></i>	0.841
5	Отступление от требований проекта <i>значительное</i>	<i>(очень)<sup>2</sup></i>	0.707
6	Отступление от требований проекта <i>очень значительное</i>	<i>(очень)<sup>3</sup></i>	0.595
7	Соответствие требованиям проекта <i>предельное</i>	<i>(очень)<sup>4</sup></i>	0.500

Уровни опасности «слабых» конструкций и ранги уровней назначаются ведущим экспертом на основе экспертной информации о техническом состоянии «слабых» в группах конструкций, своего опыта, знаний и интуиции. При назначении уровней опасности от эксперта требуется установить степень принадлежности «слабой» конструкции к одному из абсолютных предельных состояний, к которым относятся:

- местное хрупкое разрушение в ограниченном объеме или сечении конструкции;
- чрезмерное деформирование несущей конструкции, провоцирующее превращение ее в механизм;
- общая или местная потеря устойчивости вида деформации конструкции.

В случае необходимости эксперт может воспользоваться рекомендациями, приведенными в таблице 2П (приложение 1), в которой даны признаки предельных состояний несущих конструкций. Для повышения точности принимаемых решений по приведенному в таблице 4 правилу можно воспользоваться приемом, когда в процедуре назначения уровней опасности «слабых» конструкций и рангов этих уровней участвует несколько ведущих экспертов и окончательное решение принимается коллегиально.

Правило назначения уровня надежности «слабой» конструкции

Уровень опасности «слабой» конструкции	Признак уровня опасности «слабой» конструкции	Ранг уровня	Надежность «слабой» конструкции ( $\mu$ )
0	Дефекты <i>не обнаружены</i>	–	0.993
1	Отступление от требований проекта <i>незаметное</i>	1	0.986
		2	0.979
		3	0.972
2	Отступление от требований проекта <i>незначительное</i>	1	0.965
		2	0.958
		3	0.945
3	Отступление от требований проекта <i>заметное</i>	1	0.931
		2	0.917
		3	0.889
4	Отступление от требований проекта <i>существенное</i>	1	0.866
		2	0.841
		3	0.797
5	Отступление от требований проекта <i>значительное</i>	1	0.752
		2	0.707
		3	0.669
6	Отступление от требований проекта <i>очень значительное</i>	1	0.632
		2	0.595
		3	0.564
7	Соответствие требованиям проекта <i>предельно-низкое</i>	–	0.532

### 3.2. Расчет и оценка ресурса зданий и сооружений

Величины фактического риска аварии, физического (конструкционного) износа объекта и показатели его долговечности (ресурса) взаимосвязаны. В основу математических моделей оценки физического износа и ресурса объектов строительства положены следующие логические гипотезы:

1. Формой модели роста физического износа объекта в процессе его эксплуатации является экспонента. Ее представительными параметрами служат допустимый (нормативный) риск аварии ( $R_n$ ), предельный ( $R_n$ ) и фактический риск ( $R_\phi$ ), зафиксированный через  $T_\phi$  лет эксплуатации объекта.
2. На момент сдачи объекта в эксплуатацию и при условии, что риск его аварии не превышает допустимого (нормативного) значения  $R_n$ , физический износ объекта равен нулю.

3. К моменту времени, когда риск аварии объекта достигает предельного значения  $R_n$ , физический износ объекта становится равным 95 %.

Выбор формы модели физического износа объекта (1-я гипотеза) обоснован исследованиями ресурса конструкций в теории надежности [3], а использование в качестве параметра модели фактического риска аварии учитывает влияние конструктивного решения несущего каркаса объекта (число этажей, однотипных групп конструкций, узловых соединений и т.п.). В основу второй гипотезы положен здравый смысл как один из приемов нечеткой логики, а третья гипотеза введена по аналогии с «гамма» % ресурсом по износу, используемым в теории надежности [3].

Принятые гипотезы позволяют сконструировать логико-вероятностную модель оценки физического износа ( $J_\phi$ ) эксплуатируемого здания (сооружения) на момент времени  $T_\phi$ . Она имеет вид:

$$J_\phi = J(T_\phi) = 1 - \exp \left\{ - [k (R_\phi - R_n) / (R_n - R_n)] \right\}, \quad (16)$$

где  $R_\phi$ ,  $R_n$ ,  $R_n$  – соответственно фактический, допустимый (нормативный) и предельный риски аварии «*m*»-этажного объекта строительства.

Нетрудно видеть, что на момент сдачи объекта в эксплуатацию, когда  $R_\phi = R_n$  формула (16) дает нулевой износ, что соответствует принятой гипотезе. Коэффициент  $k$ , входящий в эту формулу, определяется из гипотезы, что при  $R_\phi = R_n$  физический износ объекта равен 0,95. Этот коэффициент равен  $k=3,0$ .

При найденном коэффициенте  $k$  формула (16) позволяет определить величину предельно-допустимого износа  $J_{nd}$  подстановкой в эту формулу  $R_\phi = R_{nd} = 81,8$ . Если учесть, что  $R_n = \alpha \ll R_{nd}$ , а  $R_n = 340$ , из формулы (16) получим, что износ объекта при достижении им предельно-допустимого риска аварии примерно равен  $J_{nd} = \sim 0,5$  (50%).

В математической модели (16) фактор времени присутствует в неявном виде. Им является зафиксированный момент времени ( $T_\phi$ ), при котором произведена диагностика технического состояния объекта и рассчитан риск его аварии, позволяющий определить по формуле (16) фактическую величину физического износа этого объекта  $J(T_\phi) = J_\phi$  на момент времени  $T_\phi$ . Для расчета безопасного ресурса и срока службы здания (сооружения) по аналогии с выражением (16) зависимость физического износа от времени в явном виде также принимается в виде экспоненты:

$$J(t) = 1 - \exp \left\{ - i_\phi \cdot t \right\}, \quad (17)$$

где  $i_\phi$  – фактическая интенсивность роста физического износа объекта. Величина  $i_\phi$  определяется из условия, что при  $t = T_\phi$  величина износа известна и равна  $J_\phi$ , т.е. из уравнения:  $J_\phi = 1 - \exp \left\{ - i_\phi \cdot T_\phi \right\}$ .

Безопасный ресурс  $T_\phi$  или время эксплуатации объекта до достижения им предельно-допустимого риска аварии  $R_{nd}$  при найденном значении интенсивности найдется из формулы

$$T_\phi = J_{nd} / i_\phi. \quad (18)$$

Безопасный остаточный ресурс  $T_{\delta o}$  подержанного здания определится как разность  $T_{\delta o} = T_{\delta} - T_{\phi}$ . Очевидно, если  $R_{\phi} > R_{nd}$ , безопасный остаточный ресурс подержанного объекта равен нулю.

Предельный срок службы объекта ( $T_c$ ) можно спрогнозировать из условия, что при  $t = T_c$  износ известен и согласно принятой гипотезе равен  $J(T_c) = 0,95$ . При этом условии справедливо соотношение  $k = i_{\phi} \cdot T_c$ , из которого следует, что срок службы объекта можно оценить по формуле  $T_c = k / i_{\phi} = 3 / i_{\phi}$ . Если задан нормативный срок службы ( $T_c$ )<sub>n</sub> объекта, то эта формула позволяет определить нормативный безопасный ресурс ( $T_{\delta}$ )<sub>n</sub> этого объекта. Процедура его определения состоит из двух операций:

1. Из формулы  $(T_c)_n = 3 / i_n$  находится значение нормативной интенсивности физического износа объекта:  $i_n = 3 / (T_c)_n$

2. Значение  $i_n$  вносится в формулу (17) и при этом учитывается, что при  $t = (T_{\delta})_n$  физический износ объекта предельно-допустимый, который равен  $\sim 0,5$ . При 50%-ом износа аргумент у экспоненты в уравнении (17) равен  $0,69$ . Отсюда имеем:  $(T_{\delta})_n = 0,69 / i_n = 0,23 (T_c)_n$ . Безопасные нормативные значения ресурса для групп зданий и сооружений, рассчитанные по этой формуле, приведены в приложении 2. Они позволяют оценить фактический показатель безопасного ресурса объекта.

Показатели долговечности ( $T_{\delta}$ ,  $T_c$ ) объекта зависят от величины риска аварии. Наиболее значимым из этих показателей является  $T_{\delta}$  (безопасный ресурс). Если по истечению безопасного ресурса ремонтно-восстановительные мероприятия по снижению риска аварии на объекте произведены не будут, то величина  $(T_c - T_{\delta})$  является временем «дожития» этого объекта. В этот период жизни сопротивляемость объекта перегрузкам снижена и использование  $(T_c - T_{\delta})$  ресурса может привести к аварии,

### 3.3. Пример оценки уровня безопасности строительного объекта

В качестве примера приводится процедура оценки уровня конструкционной безопасности и ресурса объекта «Поликлиника (блок В) на 1200 посещений в смену в г.Троицке (Челябинская обл.)»

Сведения об объекте:

- Назначение: *Общественное здание (медицинское учреждение)*
- Тип сооружения: *Каркасно-связевое, наружные стены кирпичные*
- Тип фундамента: *Сборные ж/б стаканного типа под колонны, ж/б плиты под диафрагмы, ленточные из сборных бетонных блоков под наружные стены*
- Число этажей: *четыре этажа*

Для исследуемого объекта эксперт по наиболее существенным признакам назначает категорию его ответственности, а ранг категории – по признакам, присущим объекту, но отнесенным в табл. 2 к другим категориям. Результат назначения коэффициента  $\alpha$  оформляется в виде документа 1, форма и содержание которого приведены ниже.

**Документ 1.** Значение коэффициента  $\alpha$  для объекта  
«Поликлиника(блок В) на 1200 посещений в смену в г.Троицке»

Признаки ответственности объекта	Категория ответственности, ранг категории	Коэффициент $\alpha$
Социально значимый объект при отсутствии опасных производств. Эксплуатация при скоплении людей	2.3	1,59
Эксперт	(подпись)	

**Расчет стандартных показателей безопасности объекта**

1. По формуле (5) определяется нормативный риск аварии:

$$R_n = \alpha = 1,59 ;$$

2. По формуле (7) при  $n_o=7$ ,  $n_1= n_2= n_3= n_4= 5$  определяется нормативный уровень надежности несущих конструкций объекта:

$$N = (n_o + \sum n_i) = 27$$

$$p_n = (R_n)^{-1/N} = 1,59^{-1/27} = 0,983$$

3. По формуле (8) определяется предельно-допустимый уровень надежности несущих конструкций

$$p_{nd} = (R_{nd})^{-1/N} = (81,8)^{-1/27} = 0,849$$

Стандартные показатели безопасности сведены в следующую таблицу:

Наименование и обозначения стандартных показателей безопасности		Значения показателей
Нормативный риск аварии	$R_n$	<b>1,590</b>
Предельно-допустимый риск аварии	$R_{nd}$	<b>81,80</b>
Предельный риск аварии	$R_n$	<b>340,0</b>
Нормативный уровень надежности конструкций	$p_n$	<b>0,981</b>
Предельно-допустимый уровень надежности конструкций	$p_{nd}$	<b>0,849</b>

Расчет фактических значений риска аварии исследуемого объекта произведен на основе информации о техническом состоянии однотипных групп конструкций несущего каркаса, зафиксированной в экспертном документе 2 (см. ниже). При подготовке документа 2 эксперты выполнили следующую работу:

- составили перечень групп однотипных последовательно возведенных конструкций несущего каркаса объекта, наименование и номера которых приведены ниже;
- установили для каждой группы вид закона распределения уровней надежности ее конструкций;
- отыскивали в каждой группе наиболее дефектную («слабую») конструкцию;

–сформировали с применением визуальных, инструментальных и других методов исследования информацию о дефектах «слабых» в группах конструкций и произвели их описание;

–назначили для каждой «слабой» конструкции уровень опасности и ранг уровня.

–произвели фото-документирование дефектов и привязку «слабых» конструкций к осям объекта

В нижеследующей таблице приведены наименование и номера групп однотипных последовательно возведенных конструкций несущего каркаса объекта «Поликлиника (блок В) на 1200 посещений в смену в г.Троицке».

Этажи	Номера и наименование групп однотипных конструкций несущего каркаса объекта
0-этаж (Нулевой цикл)	01 Основание под фундаменты наружных стен, колонн и диафрагм жесткости 02 Фундаменты под стены, колонны и диафрагмы 03 Стены подвала наружные, кирпичные 04 Колонны ж/б 05 Ригели ж/б 06 Диафрагмы жесткости 07 Плиты перекрытия рядовые и связевые
1-й, 2-й 3-й и 4-й этажи	11 (21, 31, 41) Стены наружные, кирпичные 12 (22, 32, 42) Колонны ж/б 13 (23, 33, 43) Ригели ж/б 14 (24, 34, 44) Диафрагмы жесткости 15 (25, 35, 45) Плиты перекрытия рядовые и связевые

**Документ 2.** Экспертная информация  
о техническом состоянии конструкций несущего каркаса объекта  
«Поликлиника (блок В) на 1200 посещений в смену в г.Троицке»

Номер группы конструкций	Вид закона (А,Б,В)	Описание дефектов «слабой» группе конструкции	Уровень опасности и ранг уровня
а	б	в	г
01	А	Дефекты не обнаружены	0
02	А	Дефекты не обнаружены	0
03	Б	Кладка без заполнения раствором вертикальных поперечных швов; толщина горизонт. швов до 30 мм.	3.2
04	Б	Отклонение верха колонны от вертикали 30 мм.	3.2
05	Б	Зазор в стыке с колонной 30мм. В опоре подкладка. Эл.сварка (-N), шлак не отбит.	4.1



а	б	в	г
06	Б	Диафрагма непроектная. Состоит из двух частей, зазор между которыми 450мм. Части соединены арматурой из 2-х прутков $\varnothing$ 20мм из стали А1. Эл.сварка (-N).	6.1
07	Б	Несоосность с колонной 60мм. Эл.сварка стыка (-N) ( $L_{ш}=20$ мм, $K_f=3$ мм), антикорр. покрытие отсутствует.	3.3
11	Б	Заполнение вертикальных поперечных швов 20-30%, толщина шва 10-20мм.	3.2
12	Б	Отклонение верха колонны от вертикали 33мм. Антикорр. покрытие отсутствует	3.3
13	Б	Наличие подкладок на прихватках, зазор 20мм. Антикорр. покрытия нет.	4.1
14	Б	Диафрагма непроектная. Состоит из двух частей, совместность работы которых не обеспечена. Отсутствует сварка нижней закладной пластины с колонной.	6.1
15	Б	Несоосность с колонной 60мм. Опираие на ригель менее 40мм. Сварка закладной с колонной (-N).	5.1
21	А	Кладка без заполнения вертикальных поперечных швов. Захватка из разных марок кирпича (М-300 и М-100), разная толщина швов.	3.3
22	Б	То же, что и для группы 14	3.3
23	Б	Зазор в опоре на колоннах до 60мм. Стык через прокладки. Отбит защитный слой, арматура оголена и корродирует.	4.2
24	Б	То же, что и для группы 14	6.1
25	А	Вместо связевой плиты использована плита рядовая с подрубкой и опиранием менее 40мм. Э/св. (-N).	5.2
31	А	Заполнение вертикальных поперечных швов 20-30%, толщина шва 10-20мм.	3.3

а	б	в	г
32	Б	Отклонение верха колонны от вертикали до 30мм. Антикоррозионное покрытие отсутствует	3.3
33	А	Несоосность с колонной 60мм, и как следствие работа ригеля не только на изгиб, но и на кручение. Ригель подрублен, опорная пластина уничтожена, обварка отсутствует.	5.1
34	Б	То же, что и для группы 14	6.1
35	А	Несоосность с колонной 60мм. Опираие на ригель менее 40мм. Сварка закладной с колонной (-N).	5.1
41	А	Заполнение вертикальных поперечных швов 20-30%, толщина шва 10-20мм.	3.3
42	А	Отклонение верха колонны от вертикали непроектное. Антикоррозионное покрытие отсутствует	3.3
43	А	То же, что и для группы 33.	5.1
44	Б	То же, что и для группы 14	6.1
45	А	То же, что и для группы 35	5.1

Для расчета фактического риска аварии исследуемого объекта экспертная информация, зафиксированная в документе 2, должна пройти процедуру формализации, состоящей в определении по уровням опасности и рангам уровней для «слабых» в группах конструкций значений надежности  $\mu$  этих конструкций и расчета по значениям  $\mu$  средних уровней надежности  $p_i$  конструкций в однотипных группах несущего каркаса объекта. Для определения значений  $\mu$  используется правило, приведенное в табл. 4, а расчет средних уровней надежности ( $p_i$ ) конструкций в однотипных группах производится по формулам (12), (13) и (14).

Результаты выполненной формализации показаны в табл.5. Данные таблицы используются для построения диаграммы средних фактических уровней надежности в группах конструкций несущего каркаса объекта (приведена ниже), по которой определяются наиболее «слабые» группы конструкций, а также для расчета фактического риска по формуле (15). При этом фактический риск аварии определяется для каждого «промежуточного» здания, которые можно выделить из исследуемого объекта. Под «промежуточным» зданием понимается часть  $m$ -этажного объекта, содержащая нулевой цикл и  $k = 1, 2, \dots, i, \dots, m$  его этажей.

Таблица 5

Средние уровни надежности групп конструкций исследуемого объекта

№ группы конструкций	Значение $\mu$ для «слабой» конструкции	Средний уровень надежности конструкций в группе ( $p_i$ )
01	0,993	0,997
02	0,993	0,997
03	0,917	0,959
04	0,917	0,959
05	0,866	0,933
06	0,632	0,816
07	0,889	0,945
11	0,917	0,959
12	0,889	0,945
13	0,866	0,933
14	0,632	0,816
15	0,752	0,876
21	0,889	0,947
22	0,889	0,945
23	0,841	0,921
24	0,632	0,816
25	0,707	0,874
31	0,889	0,948
32	0,889	0,947
33	0,752	0,890
34	0,632	0,816
35	0,752	0,890
41	0,889	0,947
42	0,889	0,947
43	0,752	0,890
44	0,632	0,816
45	0,752	0,890

**Расчет фактического риска аварии  
«промежуточных» зданий объекта**

Нулевой цикл

$$(R_{\phi})_0 = 1 / \Pi(p_0) = \\ = 1/0,998 \cdot 0,998 \cdot 0,959 \cdot 0,959 \cdot 0,933 \cdot 0,816 \cdot 0,946 = 1,520$$

1-е промежуточное здание

$$(R_{\phi})_1 = 1 / \Pi(p_0) \cdot \Pi(p_1) = \\ = 1/0,998 \cdot 0,998 \cdot 0,959 \cdot 0,959 \cdot 0,933 \cdot 0,816 \cdot 0,946 \cdot \\ \cdot 0,959 \cdot 0,946 \cdot 0,933 \cdot 0,816 \cdot 0,876 = 2,516$$

### 2-е промежуточное здание

$$(R_{\phi})_2 = 1 / \Pi(p_0) \cdot \Pi(p_1) \cdot \Pi(p_2) = \\ = 1 / 0,998 \cdot 0,998 \cdot 0,959 \cdot 0,959 \cdot 0,933 \cdot 0,816 \cdot 0,946 \cdot \\ \cdot 0,959 \cdot 0,946 \cdot 0,933 \cdot 0,816 \cdot 0,876 \cdot 0,948 \cdot 0,946 \cdot 0,921 \cdot 0,816 \cdot 0,874 = 4,280$$

### 3-е промежуточное здание

$$(R_{\phi})_3 = 1 / \Pi(p_0) \cdot \Pi(p_1) \cdot \Pi(p_2) \cdot \Pi(p_3) = \\ = 1 / 0,998 \cdot 0,998 \cdot 0,959 \cdot 0,959 \cdot 0,933 \cdot 0,816 \cdot 0,946 \\ \cdot 0,959 \cdot 0,946 \cdot 0,933 \cdot 0,816 \cdot 0,876 \cdot 0,948 \cdot 0,946 \cdot 0,921 \cdot 0,816 \cdot 0,874 \cdot 0,948 \cdot \\ \cdot 0,946 \cdot 0,890 \cdot 0,816 \cdot 0,890 = 7,375$$

### 4-е промежуточное здание (объект в целом)

$$(R_{\phi})_4 = 1 / \Pi(p_0) \cdot \Pi(p_1) \cdot \Pi(p_2) \cdot \Pi(p_3) \cdot \Pi(p_4) = \\ = 1 / 0,998 \cdot 0,998 \cdot 0,959 \cdot 0,959 \cdot 0,933 \cdot 0,816 \cdot 0,946 \\ \cdot 0,959 \cdot 0,946 \cdot 0,933 \cdot 0,816 \cdot 0,876 \cdot 0,948 \cdot 0,946 \cdot 0,921 \cdot 0,816 \cdot 0,874 \cdot 0,948 \cdot \\ \cdot 0,946 \cdot 0,890 \cdot 0,816 \cdot 0,890 \cdot 0,948 \cdot 0,948 \cdot 0,890 \cdot 0,816 \cdot 0,890 = 12,723$$

## **Расчет безопасного ресурса и срока службы объекта**

Исходные данные для расчета:

1. Время  $T_{\phi}$  эксплуатации несущего каркаса до начала процедуры диагностики его технического состояния, по результатам которой рассчитан фактический риск аварии объекта.  $T_{\phi} = 2$  года.
2. Стандартные значения риска аварии.  $R_n = 1,59$ ;  $R_{nd} = 81,8$ ;  $R_n = 340$ .
3. Фактический риск аварии объекта.  $R_{\phi} = 12,723$ .
4. Величина безопасного нормативного ресурса для данного типа здания.  $(T_{\phi})_n = 46$  лет (см. приложение 3)

Величину физического износа здания на момент времени  $T_{\phi}$  определим из формулы (16) подстановкой в нее значения  $R_{\phi} = 12,723$ :

$$J_{\phi} (T_{\phi}=1) = 1 - \exp \{- [3 \cdot (12,723 - 1,59) / (340 - 1,59)]\} = 0,094 \text{ (9,4\%)}$$

Величину физического износа здания при достижении его риском аварии предельно-допустимого значения определим из формулы (16) подстановкой в нее значения  $R_{\phi} = R_{nd} = 81,8$ :

$$J_{nd} = 1 - \exp \{- [3 \cdot (81,8 - 1,59) / (340 - 1,59)]\} = 0,508 \text{ (50,8\%)}$$

Фактическую интенсивность  $i_{\phi}$  роста физического износа объекта на момент времени  $t = T_{\phi} = 1$  год определим из формулы (17)

$$J_{\phi} (T_{\phi}=2) = 0,094 = 1 - \exp \{- i_{\phi} \cdot 2 \}$$

В результате имеем:  $i_{\phi} = 0,0494$  (1/год).

Безопасный ресурс объекта прогнозируем по формуле:

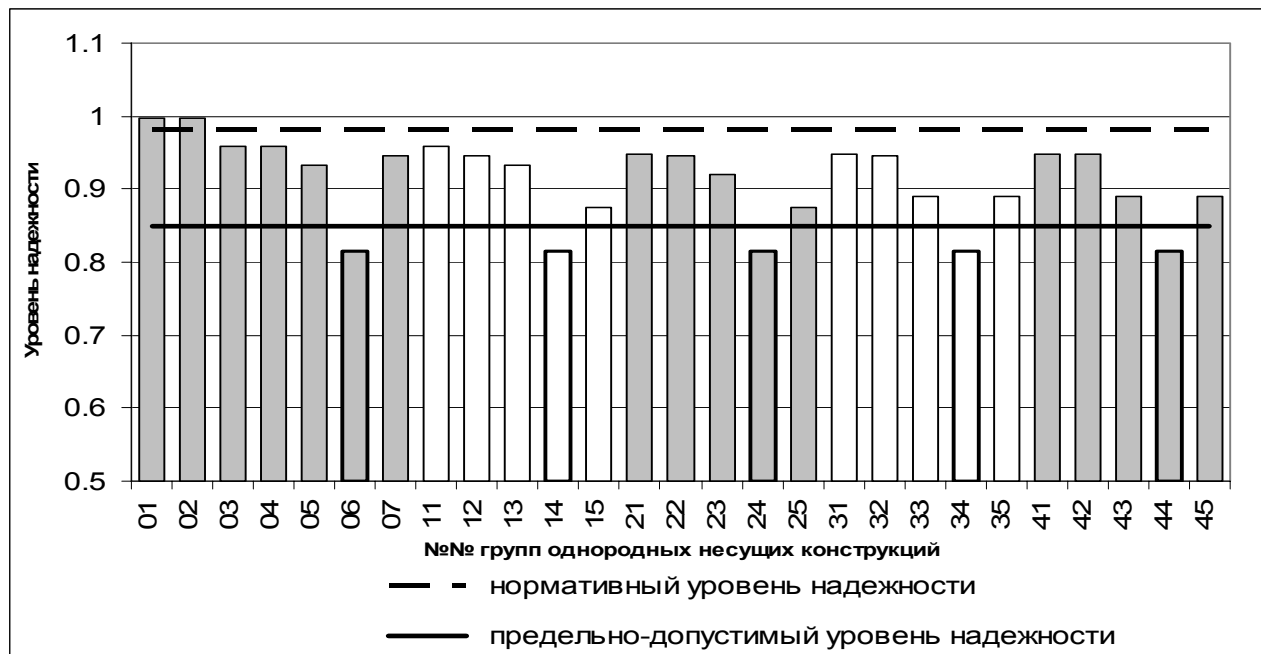
$$T_{\phi} = J_{nd} / i_{\phi} = 0,508 / 0,0494 = 10,3 \text{ (лет)}$$

Срок службы объекта ( $T_c$ ) определим из формулы:

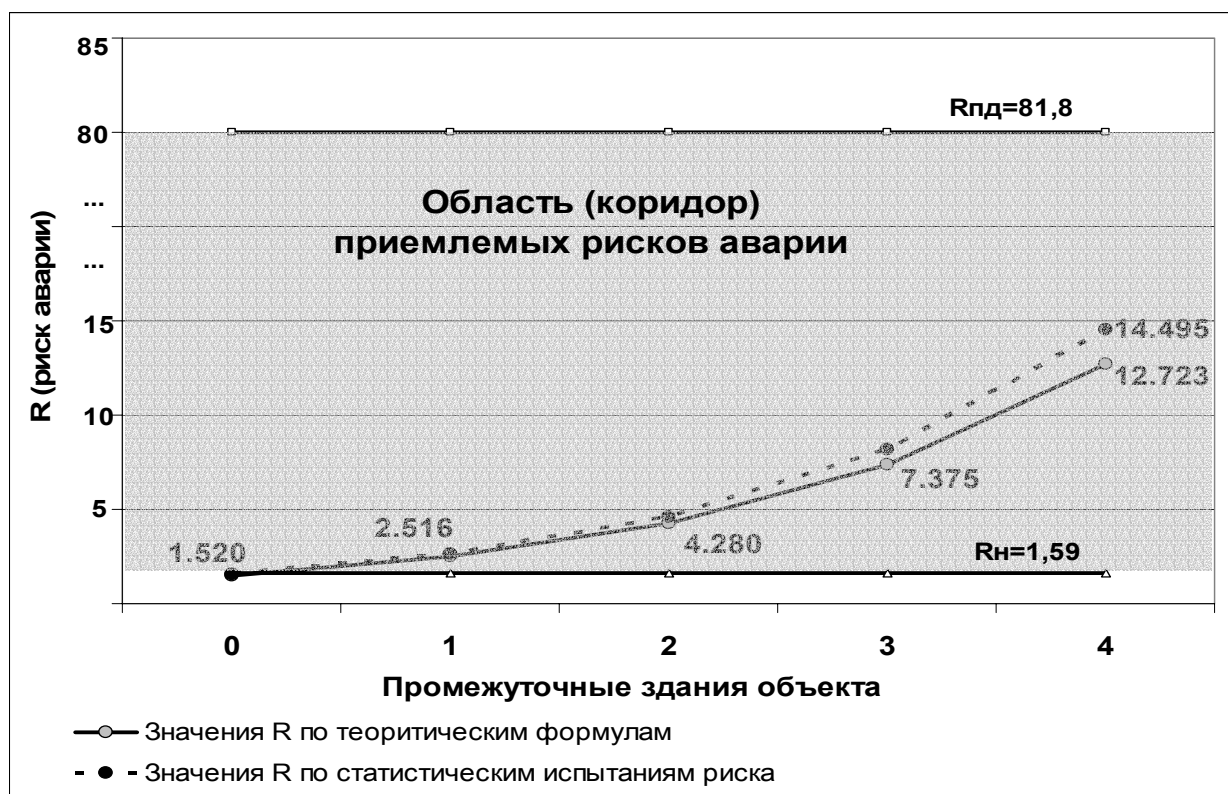
$$T_c = 3 / i_{\phi} = 3 / 0,0987 = 60,8 \text{ (лет)}$$

Ниже приводятся результаты оценки уровня конструкционной безопасности объекта «Поликлиника (блок В) на 1200 посещений в смену в г.Троицке» в визуализированном виде.

### 1. Диаграмма средних фактических уровней надежности групп конструкций несущего каркаса объекта



### 2. Карта риска объекта



### 3.4. Верификация результатов расчета риска аварии

Прямая экспериментальная проверка результатов расчета риска аварии объектов строительства в принципе не возможна, а достоверная статистика по авариям отсутствует. В методике оценка точности и достоверности результатов оценки производится через компьютерное моделирование аварийных ситуаций исследуемого объекта, а необходимые статистические данные отыскиваются методом статистических испытаний риска аварии (метод Монте-Карло). Испытанию подвергается математическая модель, связывающая фактический риск аварии с уровнями надежности конструкций несущего каркаса объекта (см. раздел 2.2):

$$r_{\phi} = 1/v_0 v_1 \dots v_i \dots v_m, \quad (19)$$

где  $v_0 = Pr_{0j}$  – уровень надежности нулевого цикла объекта;  $v_i = Pr_{ij}$  – уровень надежности каркаса  $i$ -го этажа объекта;  $Pr_{0j}$ ,  $Pr_{ij}$  – соответственно произведение фактических надежностей групп однотипных конструкций несущего каркаса нулевого цикла и каркаса  $i$ -го этажа объекта.

Формирование статистического ряда случайных величин  $p_{0j}$  и  $p_{ij}$ , входящих в формулу (18), производится по формуле  $p = \{ p_{0j}, p_{ij} \} = \zeta$ , где  $\zeta$  – случайная величина, распределенная в интервале  $[\mu, 1]$  по законам А, Б или В. Алгоритм построения гистограммы распределения фактического риска аварии исследуемого объекта состоит из двух последовательных операций:

1.  $n_0$  раз на нулевом цикле и  $n_i$  раз на  $i$ -ых этажах разыгрываются значения случайных величин  $\zeta$  по формулам:

$$\text{При законе А} - \zeta = 0,5 + (0,25 + \mu(1-\mu)(q-1))^{0,5};$$

$$\text{При законе Б} - \zeta = \mu + q(1-\mu);$$

$$\text{При законе В} - \zeta = 1 - (1-s)^{0,5},$$

где  $s = q(1-\mu)^2 - \mu^2 + 2\mu$ , а  $q \in [0; 1]$  – равномерно распределенная случайная величина;

2. Полученный массив  $\zeta$  используется для формирования по формуле (19) статистического ряда случайной величины  $r_{\phi}$  и последующего построения гистограммы, по которой определяется среднее значение риска аварии  $R_{\phi}$ .

Процедура верификации состоит в сравнении средних значений риска аварии всех «промежуточных зданий» объекта, полученных по теоретическим формулам и гистограммам. При сравнении средних значений риска аварии оценивается точность и достоверность полученного результата, зависящие от принятых при расчете риска аварии законов распределения уровней надежности конструкций в однотипных группах.

В качестве примера приводится оценка точности и достоверности результата прогнозирования фактического риска аварии несущего каркаса объекта «Поликлиника (блок В) на 1200 посещений в смену в г.Троицке». На рис.6 показана гистограмма для объекта в целом, построенная по  $10^4$  испытаниям риска аварии. Полученную гистограмму можно трактовать как статистический закон распределения риска аварии для подмножества, содержащего  $10^4$  4-х этажных зданий данного конструктивного типа и назначения. Каждый столбец

на гистограмме характеризует ситуацию риска (частоту) определенного числа зданий из этого подмножества. Средне-статистический риск аварии объекта на этом подмножестве составил  $R_{\phi}=14,495$ . По-существу выполнен эксперимент, данные которого синтезированы с использованием компьютерной технологии по программе «Риск».

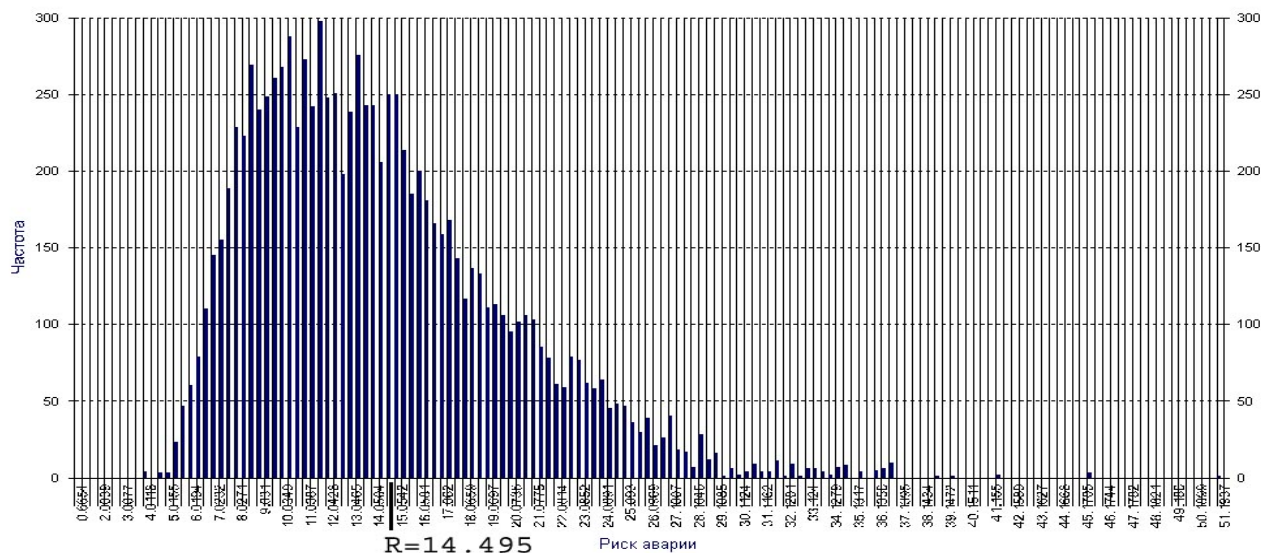


Рис. 6 Гистограмма фактического риска аварии для объекта в целом

Аналогично построены гистограммы риска для остальных «промежуточных зданий» исследуемого объекта. Значения риска аварии, вычисленные по теоретическим формулам методики и полученные на основе эксперимента по гистограммам сведены в следующую таблицу.

«Промежуточные здания» объекта	0	1	2	3	4
Величина риска аварии по формулам методики	1,520	2,516	4,280	7,375	12,723
Величина риска аварии по статистическим испытаниям	1,524	2,545	4,615	8,442	14,495
Отклонение в значениях риска (%)	0,26	1,15	7,83	14,47	13,93

Отличие теоретических и статистических (экспериментальных) результатов для риска аварии составило не более 15-и процентов.

Результаты верификации позволяют утверждать, что точность и достоверность расчета риска аварии объекта «Поликлиника (блок В) на 1200 посещений в смену в г.Троицке» удовлетворительная. С другой стороны неопровержимо доказано, что уровень конструкционной безопасности объекта на момент сдачи его в эксплуатацию не соответствует нормативным требованиям. В таких условиях единственно возможным компромиссом с Государством, являющимся гарантом безопасности среды обитания и жизнедеятельности людей, необходимо осуществить страхование той части риска аварии, которая превышает нормативное значение.

## **Заключение о фактическом уровне конструкционной безопасности объекта**

*«Поликлиника (блок В) на 1200 посещений в смену в г.Троицке»*

1. Из диаграммы средних фактических уровней надежности в группах однородных конструкций несущего каркаса следует, что наибольший «вклад» в риск аварии объекта внесли конструкции групп, обеспечивающих пространственную жесткость несущего каркаса здания (06,14,24,34,44). Средние уровни надежности этих групп ниже предельно-допустимого значения.
2. Из карты риска следует, что риск аварии всех «промежуточных» зданий объекта (кроме нулевого цикла) превысил нормативное значение. Риск аварии объекта в целом в 8 раз выше нормативного значения и составил **12,723**.
3. Из расчета показателей долговечности следует, что фактическое значение безопасного ресурса объекта равно 10,3 года, что в 4,5 раза ниже нормативной величины безопасного ресурса, установленного для такого типа общественных зданий.

**Итоговое заключение:** Построенный объект *«Поликлиника (блок В) на 1200 посещений в смену в г.Троицке»* не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к новым зданиям как по уровню конструкционной безопасности, так и по показателям долговечности. Но, поскольку риск аварии этого объекта находится в области приемлемых значений, он может быть принят в эксплуатацию. Однако через 10 лет с момента ввода его в эксплуатацию состояние объекта можно будет квалифицировать как аварийное, при котором в его несущих конструкциях с высокой долей вероятности будут зафиксированы трещины. Для поддержания требуемого уровня конструкционной безопасности объекта и продления срока его безопасной эксплуатации необходимо осуществлять постоянный мониторинг на предмет появления в несущих конструкциях трещин, а через 10 лет эксплуатации здания этой поликлиники следует начать ремонтно-восстановительные работы для снижения величины риска аварии.

## **4. ИНЖЕНЕРНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ**

### **4.1. Прогноз риска аварии планируемого к возведению объекта**

Целью прогноза и регулирования риска аварии планируемого к возведению здания (сооружения) является увеличение его безопасного срока эксплуатации. Прогноз базируется на результатах экспертизы проекта и систем качества предполагаемых участников строительства объекта.

Расчет ожидаемого среднего значения риска аварии объекта производится по формуле (15), в которой  $p_0$  и  $p_i$  – прогнозируемые средние уровни надежности конструкций в однотипных группах несущего каркаса «*m*»-этажного объекта. Средний уровень надежности  $p$  несущей конструкции определяется через вероятность  $P(B)$  соответствия параметров конструкции требованиям нормативных документов (регламентов) в части обеспечения ее прочности,



жесткости и устойчивости. Из формулы полной вероятности [4] следует, что

$$p = P(B) = \sum P(B/q_i) P(q_i),$$

где  $q = \{ q_i \} = \{ MСП, M^*СП, МС^*П, МСП^*, M^*C^*П, M^*СП^*, МС^*П^*, M^*C^*П^* \}$  – полная группа событий, включающая следующие независимые события:  $M$  – нет ошибок поставщиков материалов (изделий);  $C$  – нет ошибок строителей;  $П$  – нет ошибок проектировщиков;  $M^*$ ,  $C^*$  и  $П^*$  – события, противоположные событиям  $M$ ,  $C$  и  $П$ .

Условные вероятности  $P(B/q_i)$  являются инвариантами, имеющими смысл вероятности соответствия несущих конструкций требованиям безопасности при условии:

$P(B/q_1) = 1$  – ошибок участников строительства нет;

$P(B/q_2) = a$  – есть ошибки только поставщиков;

$P(B/q_3) = b$  – есть ошибки только строителей;

$P(B/q_4) = c$  – есть ошибки только проектировщиков;

$P(B/q_5) \cong ab$  – нет ошибок только проектировщиков;

$P(B/q_6) \cong ac$  – нет ошибок только строителей;

$P(B/q_7) \cong bc$  – нет ошибок только поставщиков;

$P(B/q_8) \cong abc$  – есть ошибки всех участников строительства.

Инварианты в совокупности представляют априорную информацию, которая может быть сформирована из анализа причин случившихся аварий. В РФ [6] ~80% аварий происходят из-за ошибок участников строительного процесса, в т.ч. по вине поставщиков ~ 20% , по вине строителей ~ 50%, а по вине проектировщиков ~ 10%. Следовательно,  $a = 0,8$ ,  $b = 0,5$ ,  $c = 0,9$ . Если обозначить вероятности независимых событий  $M$ ,  $C$  и  $П$  как  $P(M) = \mu_m$ ,  $P(C) = \mu_c$ ,  $P(П) = \mu_n$ , то из формулы полной вероятности следует следующая математическая модель:

$$p = \mu_m \mu_c \mu_n + 0,8(1 - \mu_m) \mu_c \mu_n + 0,5 \mu_m (1 - \mu_c) \mu_n + \\ + 0,9 \mu_m \mu_c (1 - \mu_n) + 0,4(1 - \mu_m)(1 - \mu_c) \mu_n + 0,72(1 - \mu_m) \mu_c (1 - \mu_n) + \\ + 0,45 \mu_m (1 - \mu_c)(1 - \mu_n) + 0,36(1 - \mu_m)(1 - \mu_c)(1 - \mu_n). \quad (20)$$

В полученной модели величины  $\mu_n$ ,  $\mu_m$  и  $\mu_c$  имеют смысл степеней соответствия несущих конструкций требованиям норм (регламентов).

При определении  $\mu_n$  задачами эксперта являются:

1. Отследить наличие в проекте грубых ошибок (примерный перечень грубых ошибок приведен в табл. 6)
2. Оценить уровень опасности обнаруженных в проекте ошибок
3. Принять меры для ликвидации обнаруженных ошибок

Оценка уровня опасности обнаруженных в проекте грубых ошибок производится по правилу, приведенному в табл.7 и являющимся модифицированным вариантом правила, показанного в табл.3.

Таблица 6

## Примерный перечень грубых ошибок проектировщиков

№	Описание возможных грубых ошибок проекта
1	Принятые в проекте физико-механические характеристики грунтов не соответствуют действительному состоянию основания. Отсутствуют лабораторные испытания образцов грунта с ненарушенной структурой
2	При выборе расчетной модели основания инженерно-геологическими изысканиями не выявлены и не учтены характерные зависимости деформирования грунта под нагрузкой
3	Размеры фундамента и положение масс на плане объекта не обеспечивают равномерность осадок
4	Расчетная схема несущего каркаса не соответствует действительной его работе под нагрузкой. Не обеспечена геометрическая неизменяемость расчетной схемы.
5	При вводе исходных данных в программу допущены ошибки в размерностях и величинах нагрузок, сопротивлений, жесткостей. Низкая степень доверия к программе расчета.
6	Несоответствие запроектированных узловых соединений элементов каркаса принятой в расчетной схеме жесткости узлов.
7	Связевые конструкции не обеспечивают требуемой жесткости каркаса объекта

Таблица 7

## Связь степени соответствия с уровнем опасности допущенных ошибок

Уровень опасности	Признак уровня опасности	Степень соответствия
1	Влияние на безопасность <i>незаметное</i>	0.979
2	Влияние на безопасность <i>незначительное</i>	0.958
3	Влияние на безопасность <i>заметное</i>	0.917
4	Влияние на безопасность <i>существенное</i>	0.841
5	Влияние на безопасность <i>значительное</i>	0.707
6	Влияние на безопасность <i>очень значительное</i>	0.595
7	Влияние на безопасность <i>очень высокое</i>	0.500

Уровни опасности и степени соответствия определяются для каждой обнаруженной в проекте грубой ошибки. В совокупности они образуют нечеткое (размытое) множество оценок качества проекта. В соответствии с правилами нечетких множеств окончательная числовая оценка проекта определится по формуле  $\mu_n = \min \{ (\mu_n)_I \}$ .

Для определения  $\mu_m$  и  $\mu_c$  вводится гипотеза о прямой зависимости уровня конструкционной безопасности объекта от эффективности функционирования систем качества организаций – участников инвестиционного строительного процесса. Задачей эксперта является назначение по правилу, приведенному в табл.7, степеней соответствия  $(\mu_m)_I$  и  $(\mu_c)_I$  для всех элементов системы

качества, показанных в табл.8. По аналогии с  $\mu_n$  окончательные числовые оценки систем качества организации-поставщика и подрядной организации определяются по формулам:  $\mu_m = \min \{ (\mu)_m \}$ ,  $\mu_c = \min \{ (\mu)_c \}$ .

Таблица 8

Требования стандарта ИСО 9001 к элементам систем качества

№	Элементы систем качества и требования к ним стандарта ИСО 9001
1	Наличие политики в области качества и системы мотивации качественного труда
2	Соответствие ИТР и рабочих профессий профилю выпускаемой продукции
3	Наличие актуализированных программ повышения квалификации различных категорий работников
4	Соответствие механизмов, оборудования требованиям качества технологических операций
5	Наличие системы технического обслуживания и системы документирования процедур выполнения технологических операций
6	Регулярная внутренняя проверка, проводимая с целью оценки эффективности функционирования системы качества
7	Наличие программ, методик, экспертов с определением их ответственности, форм документирования и регистрации входного и производственного контроля качества продукции.
8	Наличие оборудования, метрологического и лабораторного обеспечения процедур идентификации качества продукции.

Методика декларирования конструкционной безопасности объекта строительства на стадии проекта состоит из следующих операций:

1. Формируется «дерево» состояний объекта в виде иерархической последовательности возведения групп однотипных конструкций его несущего каркаса
2. По формулам (5) и (7) определяются допустимое значение риска аварии  $R_n$  и нормативный уровень надежности конструкций несущего каркаса объекта  $p_n$
3. Определяется числовая оценка проекта  $\mu_n$
4. Определяются и заносятся в табл.9 значения  $\mu_n$ ,  $\mu_m$  и  $\mu_c$  для всех участников инвестиционного строительного процесса.
5. По формуле (20) определяются значения средних уровней надежности  $p$  и заносятся в следующую таблицу.

Группы конструкций несущего каркаса	Организации –поставщики	$\mu_m$	Подрядные организации	$\mu_c$	$p$
...	...	...	...	...	...

6. По формуле (15) определяется ожидаемый после возведения объекта фактический риск аварии  $R_{\phi}$  и сравнивается с величиной нормативного риска  $R_n$
7. Если  $R_{\phi} > R_n$ , то строится диаграмма средних спрогнозированных уровней надежности  $p$  в однотипных группах конструкций несущего каркаса объекта с указанием на диаграмме нормативного уровня надежности конструкций
8. По диаграмме определяются участники строительства, которые потенциально внесут в объект риск аварии, превышающий нормативное значение
9. На основе информации пп. 6, 7, и 8 принимается управленческое решение.

Методика декларирования уровня конструкционной безопасности объекта строительства на стадии проекта и определение условий, когда требованиям такой безопасности будет отвечать конечный строительный продукт, реализована в компьютерной программе «Риск» – версия «Прогноз» (разработчик Шлейков И.Б.)

#### 4.2. Управление риском аварии в процессе возведения объекта

Процедура идентификации риска аварии строящегося здания (сооружения) и его регулирование в процессе возведения объекта производится с целью увеличения безопасного ресурса этого объекта и состоит из следующих операций:

1. Для исследуемого объекта формируется «дерево» состояний объекта в виде иерархической последовательности возведения групп однотипных конструкций его несущего каркаса
2. Определяются стандартные показатели конструкционной безопасности объекта ( $R_n, R_{nd}, p_n, p_{nd}$ )
3. В режиме специальным образом организованной экспертизы устанавливаются законы (А, Б или В) распределения уровней надежностей конструкций в группах.
4. В однотипных группах отыскиваются «слабые» конструкции и для каждой из них определяется уровень надежности ( $\mu$ ).
5. По средним значениям надежностей в группах для каждого этажа строится диаграмма, позволяющая определить группы несущих конструкций, которые вносят наибольший вклад в риск аварии.
6. Принимаются меры по устранению дефектов. Окончательная информация о техническом состоянии несущего каркаса объекта фиксируется в документе 2 (см. раздел 3.3)
7. По информации о техническом состоянии групп конструкций несущего каркаса для каждого «промежуточного» здания объекта осуществляются статистические испытания фактического риска аварии

8. По результатам статистических испытаний строятся гистограммы распределения фактических значений риска аварии, по показателям которых принимается решение о соответствии несущего каркаса объекта требованиям конструкционной безопасности.

*Прим.* «Промежуточное» здание – часть  $m$ -этажного объекта, содержащая нулевой цикл и  $k=1,2,..i..m$  его этажей.

Контроль уровня конструкционной безопасности объекта в процессе его возведения состоит в определении по гистограммам для каждого «промежуточного здания» вероятности  $\lambda$  события, состоящего в том, что фактический риск аварии  $R_f$  не превысит допустимого (нормативного) значения  $R_n$ . Величина  $\lambda$  равна площади закона распределения, заключенной в интервале от 1 до  $R_n$ . «Промежуточное здание» соответствует требованиям конструкционной безопасности, если  $\lambda \geq 0,5$ .

Объект соответствует требованиям конструктивной безопасности, если доказано, что его фактический риск аварии  $R_f$  не превысил допустимого (нормативного) значения  $R_n$ .

Приведенная процедура инженерного сопровождения проекта при определенных условиях (независимость экспертов, наличие утвержденной нормативной базы и др.) совпадает с процедурой сертификационных испытаний несущих каркасов объектов на соответствие требованиям конструкционной безопасности. В отличие от традиционных подходов в методике статистическим испытаниям подвергается риск аварии объекта методом компьютерного моделирования на основе экспертной системы, реализованной в программе «Риск» – версия «Сертификация» (разработчик программы И.С.Никольский).

#### **4.3. Регулирование уровня безопасности подержанных объектов**

Цель регулирования – продление безопасного ресурса подержанного здания (сооружения). Первым и необходимым этапом регулирования является диагностика технического состояния несущего каркаса объекта, осуществляемая по методике, изложенной в главах 2 и 3. В этой методике сведения о техническом состоянии объекта в компактном виде представляются диаграммой средних уровней надежности в однотипных группах конструкций несущего каркаса и картой риска (см. раздел 3.3). Диаграмма и карта риска, а также экспертный документ 2, позволяют извлечь полную информацию о неблагоприятных группах конструкций, внесших наибольший «вклад» в риск аварии исследуемого объекта, и эта информация является основой регулирования уровня конструкционной безопасности подержанных зданий.

Основным принципом регулирования является расследование причин снижения уровня конструктивной безопасности объекта и построение на основе этого расследования оптимальной тактики и стратегии ремонтно-восстановительных работ по снижению риска аварии. Порядок проведения ремонтных работ определяет эксперт. Вначале ремонтными работами необходимо обеспечить безопасность несущих конструкций нулевого цикла,

затем приступить к ликвидации критических дефектов в неблагоприятных группах конструкций несущих каркасов этажей. В случае, если фактический риск аварии находится в области неприемлемых рисков, необходимо прежде, чем начать ремонтные работы, предусмотреть специальные меры безопасности, обязательной из которых является приостановка эксплуатации объекта.

Основным способом снижения риска аварии является ликвидация критических дефектов в реально существующих конструкциях. Если ликвидировать дефекты в конструкции не удастся по техническим причинам или экономическим соображениям, то следует применить дублер-конструкцию, заменяющую и исполняющую функции существующей конструкции в составе несущего каркаса объекта. В этом случае речь уже идет не о снижении риска, а о его поглощении дублер-конструкцией (монолитные пояса жесткости, шпренгельные системы и др.). При этом любое техническое решение по снижению или поглощению риска аварии конкретного объекта должно в обязательном порядке пройти две стадии: расчетную и проектную.

Одним из важнейших принципов регулирования уровня конструктивной безопасности является прогноз ожидаемой ситуации риска аварии объекта и его безопасного ресурса после завершения ремонтно-восстановительных работ. Такой прогноз позволяет, во-первых, убедиться в правильности принятых технических решений, а во-вторых, информирует заказчика о возможном позитивном результате регулирования и, следовательно, стимулирует его вкладывать средства в ремонтные работы.

Методика технического регулирования уровня конструкционной безопасности поддержанных зданий содержит следующие основные этапы:

1. На экспертной системе (прил.2) осуществляется диагностика технического состояния конструкций несущего каркаса подержанного здания и оценка соответствия фактического риска аварии объекта предъявляемым к нему требованиям по конструкционной безопасности
2. Проводится расследование причин снижения уровня конструкционной безопасности объекта и принимаются технические решения по усилению его конструктивных элементов. Эти решения проходят расчетную и проектную стадии, учитывающие роль усиливаемых элементов в системе «основание - несущий каркас»
3. Формируется оптимальная стратегия ремонтно-восстановительных работ и рассчитываются ожидаемые после их проведения уровень риска аварии и безопасный ресурс.
4. Если намеченный риск аварии после восстановительных работ на объекте не достигнут, процедура технического регулирования на объекте возобновляется до достижения запланированного уровня его конструкционной безопасности

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании/ Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1988.
2. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. –М.: Стройиздат, 1982.
3. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. –М.: Машиностроение, 1990.
4. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей.–М.: Наука,1969.
5. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976.
6. Мельчаков А.П. Оценка надежности возведенных строительных конструкций на основе методов теории размытых множеств. 7-е Уральские академические чтения. Екатеринбург: Изд. УралНИИпроект, 2002.
7. Мельчаков А.П. К теории прогнозирования риска аварии объектов строительства. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура». 2001. –Выпуск 1
8. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука, 1981.
9. Попов Г.Т., Бурак Л.Я. Техническая экспертиза жилых зданий старой застройки. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1986.
- 10.Ржаницин А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978.
- 11.Скоробогатов С.М. Принцип информационной энтропии в механике разрушения инженерных сооружений и горных пластов. – Екатеринбург: Изд. УрГУПС, 2000.
- 12.Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска/ Пер. с англ. В. С. Сыромятникова, Г. С. Деминой. Под общ. ред. В. С. Сыромятникова.–М.: Машиностроение, 1984.

**Экспертная система расчета риска аварии и ресурса**

Основным элементом экспертной системы является база знаний, которая структурирована в три независимых блока.

**Блок 1.** База данных, предназначенная для автоматизированного определения стандартных и фактических значений риска аварии несущего каркаса исследуемого объекта строительства.

База данных содержит информацию о «дереве» состояний объекта в виде иерархической последовательности возведения групп однотипных конструкций несущего каркаса, являющимся управляющим механизмом регламента для сбора информации. База данных включает в себя:

1. Общие сведения об объекте (назначение объекта, адрес строительной площадки, срок строительства или эксплуатации).
2. Сведения об участниках строительства (заказчик-инвестор, генподрядчик, проектная организация, ответчик за инженерно-геологические изыскания, поставщики материалов и изделий).
3. Сведения конструктивного характера (тип здания, число этажей, тип фундамента и основных несущих конструкций).
4. Сведения о грунтовой обстановке (вид грунта основания, особые свойства грунта, характеристика грунтовых вод).
5. Сведения о примененных материалах и изделиях (тип, марка, прочностные характеристики).
6. Сведения о нагрузках (полезная, временная, постоянная на фундамент, несущие стены и перекрытия).

Регламент экспертных работ определяется «деревом» состояний объекта и перечнем конструкций и их параметров, ответственных за безопасность объектов строительства (табл. 1П).

Таблица 1П

Примерный перечень конструкций и их параметров, ответственных за безопасность зданий и сооружений

№	Группы несущих конструкций, вид и характер контролируемых параметров
1.	ЕСТЕСТВЕННОЕ ОСНОВАНИЕ
1.1	Несущая способность основания (по нарушениям естественной структуры основания – разуплотнения грунта при суффозии (размыве), оттаивании после замораживания, замачивании, при переходе фундаментов в зиму без утепления основания с пучинистыми грунтами)
2.	СВАЙНОЕ ОСНОВАНИЕ
2.1	Несущая способность свайного поля в составе фундамента (по отклонению положения свай, отказу свай, конструкции стыка свая-ростверк, по наличию и виду грунта под подошвой ростверка)
3.	ФУНДАМЕНТЫ И СТЕНЫ ПОДЗЕМНОЙ ЧАСТИ ЗДАНИЯ ИЗ



БЛОКОВ	
3.1	Установка подушек и блоков (по перевязке блоков, заполнению торцевых замков раствором, марке раствора, отклонению рисков разбивочных осей и отметок опорных поверхностей)
4. СБОРНЫЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ	
4.1	Установка элементов (по отклонению положения после постоянного закрепления; по качеству монтажных узловых соединений, устройству платформенных стыков )
4.2	Качество сварных швов, антикоррозионного покрытия, замоноличивания стыков, водо и воздухоизоляции стыков
5. КОНСТРУКЦИИ ИЗ КАМНЯ, КИРПИЧА И БЛОКОВ	
5.1	Качество кладки (по толщине швов, системе перевязки, креплению кладки (в т.ч. в зимнее время), по отклонению размеров и положения кладки, по наличию пустых швов)
6. КОНСТРУКЦИИ ИЗ МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА	
6.1	Установка элементов (по количеству и качеству установки арматуры, качеству сварных швов, толщине защитного слоя, по отклонению положения и размеров завершенных конструкций)
6.2	Прочность бетона (по наличию трещин в бетоне, по возможному замораживанию бетона в процессе возведения конструкций)
7. КОНСТРУКЦИИ ИЗ МЕТАЛЛА	
7.1	Установка элементов (по отклонению положения после постоянного закрепления; по качеству исполнения узловых соединений)
7.2	Качество сварных швов, антикоррозионного покрытия, замоноличивания стыков, водо и воздухоизоляции стыков

Наиболее ответственным этапом является экспертиза основания. При экспертизе основания регламент требует выполнения следующих операций:

1. Оценить соответствие грунта основания данным проекта (по отсутствию инородных грунтов, выходов скалы и/или дресвы, заполнению выемок малосжимаемым образованием, растительного слоя, линз льда, снега и др.). Способы оценки: визуальный, зондирование, бурение.

2. Установить при разуплотнении грунта основания причины разуплотнения (замачивание, суффозия и др.) и замерить мощность нарушенного слоя.

3. Проверить при набухающих, элювиальных, просадочных и пучинистых грунтах уровень грунтовых вод, установить зоны замачивания и замерить глубину увлажнения.

4. Произвести (при необходимости) отбор проб грунта для испытания в лаборатории с целью получения исходных данных для расчета осадок основания. Испытанию подлежат: плотность грунта ( $\text{тс}/\text{м}^3$ ), модуль деформации (МПа), угол внутреннего трения (град.), удельное сцепление (КПа) и мощность слоя (м.), входящие в формулы для определения осадок.

**Блок 2. Блок формализации, предназначенный для приведения экспертной информации к однозначному (формализованному) виду.**

Блок формализации содержит правила, позволяющие сгладить неопределенность экспертной информации о техническом состоянии объекта и свести ее в ранг показателей, необходимых для прогноза фактического аварии (вид законов распределения надежностей в группах конструкций, уровни надежности «слабых» в группах конструкций). Для назначения уровней надежности «слабых» конструкций блок формализации содержит правило из раздела 3.2. и банк данных о признаках предельных дефектов несущих конструкций (таблица 2П).

Таблица 2П

Признаки предельных дефектов конструкций несущего каркаса объекта

№	Группы несущих конструкций и характеристика (значения) предельных дефектов
1.	<b>ЕСТЕСТВЕННОЕ ОСНОВАНИЕ</b>
1.1	Полное замачивание грунта основания на глубину более 0,5 м.
1.2	Замачивание просадочных, набухающих и элювиальных неводонасыщенных грунтов основания до степени влажности более 50%.
1.3	Промораживание водонасыщенных грунтов под подошвой фундамента на глубину более 3 см.
1.4	Промораживание элювиальных пучинистых грунтов основания и переход основания в зиму без утепления
2.	<b>СВАЙНОЕ ОСНОВАНИЕ</b>
2.1	Отсутствие зазора под подошвой ростверка при пучинистых грунтах
2.2	Сквозные вертикальные трещины в ростверке
3.	<b>ФУНДАМЕНТЫ И СТЕНЫ ПОДЗЕМНОЙ ЧАСТИ ЗДАНИЯ ИЗ БЛОКОВ</b>
3.1	Сквозные вертикальные трещины в цоколе
3.2	Повреждения и разрушения блоков
4.	<b>СБОРНЫЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ</b>
4.1	Диагональные трещины по углам ж/б стеновых панелей, вертикальные трещины в стыках, местах установки балконных плит, перемычек.
4.2	Непроектные смещение колонн от вертикали
4.3	Смещения ж/б панелей, трещины в панелях, разрушения узлов крепления.
4.4	Глубокие поперечные трещины в плитах перекрытия с оголением арматуры, заметный прогиб плит
4.5	Трещины на опорных участках плит перекрытия
5.	<b>КОНСТРУКЦИИ ИЗ КАМНЯ, КИРПИЧА И БЛОКОВ</b>
5.1	Вертикальные трещины в колоннах, простенках
5.2	Разрушение и расслоение кладки, нарушение связи отдельных участков кладки
5.3	Следы увлажнения стен
6.	<b>КОНСТРУКЦИИ ИЗ МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА</b>

6.1	Трещины в различных направлениях в растянутой зоне конструкции
6.2	Следы постоянного увлажнения бетона атмосферными и агрессивными водами
6.3	Оголение и сильная коррозия арматуры, разрывы арматуры
6.4	Крупные выбоины и сколы бетона в сжатой зоне конструкции
6.5	Низкая прочность бетона в сжатой зоне конструкции
7.	КОНСТРУКЦИИ ИЗ МЕТАЛЛА
7.1	Сильная ржавчина на поверхности
7.2	Заметные деформации конструкции
7.3	Разрушения стыков
7.4	Выбоины и отбитые места со сквозными трещинами
7.5	Наличие трещин усталостного характера
7.6	Несоответствие класса стали проекту

**Блок 3.** Блок логических выводов, предназначенный для оценки уровня конструкционной безопасности и безопасного ресурса исследуемого объекта строительства

Блок включает набор алгоритмов, позволяющих на основании сведений базы данных и формализованной экспертной информации определить средние значения уровней надежности в каждой группе однотипных конструкций несущего каркаса исследуемого объекта, найти среднее значение риска аварии для каждого «промежуточного» здания объекта и осуществить верификацию полученных результатов. По стандартным и фактическим показателям риска аварии определяются показатели ресурса исследуемого объекта, а через сравнение фактического риска аварии с нормативными или предельно-допустимыми показателями устанавливается соответствие этого объекта требованиям конструкционной безопасности.

В экспертной системе предусмотрен **пользовательский интерфейс** для передачи информации заказчику в визуализированном виде. К такой информации относятся:

1. Диаграмма средних фактических уровней надежности в однотипных группах конструкций несущего каркаса объекта с указанием на диаграмме нормативного и предельно-допустимого уровней надежности конструкций
2. Карта риска с информацией о нормативном, предельно-допустимом и фактических значениях риска аварии. Фактические риски приводятся для всех «промежуточных зданий» исследуемого объекта строительства
3. Значения показателей ресурса исследуемого объекта строительства, к которым относятся время до достижения объектом предельно-допустимого риска аварии (безопасный остаточный ресурс) и время до достижения объектом предельного риска аварии (долговечность).

Реализация экспертной системы осуществлена в компьютерной программе «Риск» (разработчик программы Рябков А.Н.)

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Нормативные показатели долговечности объектов

№	Группы зданий (сооружений)	Норм. срок службы (лет) $(T_c)_н$	Безоп. норм. ресурс (лет) $(T_о)_н = 0,23(T_c)_н$
<b><i>ЗДАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ И ОБЩЕСТВЕННЫЕ</i></b>			
1	Здания общественные, уникальные, особо капитальные, каркасно-монолитные	250	57,5
2	Здания общественные, капитальные, с ж\б или металлическими каркасами	200	46
3	Здания производственные, с ж\б или металлическими каркасами, со стенами из каменных материалов, крупных блоков и панелей	150	34,5
4	Здания одноэтажные бескаркасные со стенами из каменных материалов, крупных блоков и панелей, с ж\б, металлическими или кирпичными колоннами	100	23
<b><i>ЖИЛЫЕ ЗДАНИЯ</i></b>			
5	Здания монолитные, каркасно-монолитные, особо капитальные	200	46
6	Здания каменные, особо капитальные, стены крупнопанельные, кирпичные с толщиной стен 2,5-3,5 кирпича или кирпичные с ж\б или металлическим каркасом, перекрытия ж\б	150	34,5
7	Здания капитальные, стены крупноблочные, кирпичные толщиной 1,5 - 2,5 кирпича, перекрытия ж\б	100	23
<b><i>СООРУЖЕНИЯ</i></b>			
8	Тоннели и станции метрополитена, железнодорожные тоннели всех конструкций	500	115
9	Атомные станции	150	34,5
10	Мосты ж\б, бетонные и каменные	100	23
11	Мосты металлические и плотины ж\б	50	11,5

**Примечание.** Приведенные в таблице сроки службы зданий и сооружений при практическом использовании требуют согласования с заказчиком, уточняющим нормативные сроки в зависимости от характера производства, предполагаемой реконструкции и др. обстоятельств.